

RAPPORT METHODOLOGIQUE

Version juillet 2014

Mise en œuvre du Référentiel hydromorphologique ultra-marin (RHUM)

Adaptation du système relationnel d'audit hydromorphologique (SYRAH)
dans les DOM



MANDATAIRE
Rémy MARTIN
remy.martin@asconit.com



SOUS-TRAITANT
Loïc GROSPRETRE
lgrospretre@dynamiquehydro.fr



SOUS-TRAITANT
Régis VIGOUROUX
regis.vigouroux@hydrecolab.com

ASCONIT CONSULTANTS
Parc scientifique Tony Garnier
6-8 espace Henry Vallée
69366 LYON cedex 07

DYNAMIQUE HYDRO
18 av. Charles de Gaulle
69370 ST DIDIER AU MONT D'OR
Tel : 04 78 83 68 89

HYDRECO - Laboratoire environnement
de Petit Saut - BP 823
97388 KOUROU cedex
Tel : 05 94 32 40 79

SOMMAIRE

1. PREAMBULE	6
1.1. CONTEXTE DU PROJET « RHUM »	6
1.2. L'HYDROMORPHOLOGIE OUTRE-MER	7
1.2.1. Antilles françaises	7
1.2.2. Ile de la Réunion	8
1.2.3. Mayotte.....	9
1.2.4. Guyane	9
1.3. OBJECTIF.....	10
2. ELABORATION DU RESEAU HYDROMORPHOLOGIQUE	11
2.1. CONSTRUCTION DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE SIMPLIFIE	11
2.1.1. Principe général.....	11
2.1.2. Corrections géométriques & attributaires de la couche hydrographique de référence	12
2.1.3. Calcul des rangs de Strahler.....	13
2.2. SECTORISATION ET CARACTERISATION HYDROMORPHOLOGIQUES DES COURS D'EAU.....	15
2.2.1. Sectorisation SYRAH : rappel méthodologique	15
2.2.2. Sectorisation RHUM : sources des données et caractérisation des variables	18
2.2.3. Sectorisation RHUM : méthodologie	25
2.2.4. Sectorisation RHUM : longueur minimale des tronçons	27
2.2.5. Sectorisation RHUM : spécificité Guadeloupe & Martinique	28
2.2.6. Sectorisation RHUM : spécificité Guyane	28
2.2.7. Sectorisation RHUM : spécificité Ile de la Réunion	29
2.2.8. Sectorisation RHUM : spécificité Mayotte	30
2.2.9. Caractérisation des tronçons hydromorphologiques.....	30
2.2.10. Limites des sectorisations	31
2.2.11. Largeur des lits mineurs	32
2.3. TYPOLOGIE DES TRONÇONS	35
2.3.1. Variables prises en compte et typologie détaillée.....	35
2.3.2. Typologie simplifiée et vue d'ensemble des principaux types.....	37
2.3.3. Limites des typologies	42
3. ESTIMATION DES ALTERATIONS HYDROMORPHOLOGIQUES POTENTIELLES	43
3.1. GENERALITES SUR LES MODELES BAYESIENS.....	44
3.1.1. Principe	44
3.1.2. Architecture des modèles adaptée aux DOM	45
3.2. FACTEURS PRIS EN COMPTE DANS LES MODELES BAYESIENS	47
3.2.1. Terminologie	47
3.2.2. Les processus hydromorphologique étudiés	47
3.2.3. Elément de qualité : Le Régime Hydrologique	48
3.2.4. Elément de qualité : La continuité de la rivière.....	51
3.2.5. Elément de qualité : La morphologie.....	52
3.3. MISE EN ŒUVRE DES CALCULS	54
3.3.1. Unités d'analyse : USRA et USI.....	54
3.3.2. Zones d'extraction de données	56
3.3.3. Calculs des indicateurs	56
3.3.4. Descripteurs : Mise en classe des indicateurs.....	58
3.3.5. Remplissage des tables de probabilités conditionnelles	58
3.3.6. Exécution des calculs d'altération.....	60

3.3.7.	<i>Evaluation synthétique et changement d'échelle</i>	61
3.4.	LECTURE DES RESULTATS	64
3.4.1.	<i>Synthèse globale</i>	64
3.4.2.	<i>Probabilités d'altération à l'échelle des masses d'eau</i>	64
3.4.3.	<i>Probabilités d'altération à l'échelle des USRA</i>	65
3.4.4.	<i>Les données brutes à l'échelle des USRA</i>	66
3.5.	PISTES D'AMELIORATION	67
3.5.1.	<i>Qualité des données brutes</i>	67
3.5.2.	<i>Prise en compte de nouveaux descripteurs</i>	68
3.5.3.	<i>Spécificités des rivières intermittentes</i>	68
3.5.4.	<i>Ajustement des modèles aux données existantes</i>	68
3.5.5.	<i>Limites de la mise en classe des descripteurs/indicateurs</i>	69
3.5.6.	<i>Nombre de classes à revoir : cas de la franchissabilité des barrages</i>	69
3.5.7.	<i>Ajustement des règles d'agrégation</i>	69
3.5.8.	<i>Concertation autour des modèles et des tables de probabilités conditionnelles</i>	70
3.5.9.	<i>Formation des gestionnaires</i>	70
4.	ANNEXES	71
4.1.	CARACTERISATION DE LA LARGEUR RELATIVE DES FONDS DE VALLEE ALLUVIAUX	72
4.1.1.	<i>Guadeloupe</i>	72
4.1.2.	<i>Martinique</i>	72
4.1.3.	<i>Guyane</i>	73
4.1.4.	<i>Réunion</i>	74
4.1.5.	<i>Mayotte</i>	74
4.2.	HIERARCHISATION DES CONFLUENCES MAJEURES	75

SOMMAIRE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Dénombrement des tronçons avant sectorisation	14
Tableau 2 : Variables retenues dans la sectorisation et la typologie	19
Tableau 3 : Evaluation du classement des confluences majeures et mineures sur les bassins versants tests.	21
Tableau 4 : Dénombrement des tronçons après sectorisation par les confluences majeures.....	21
Tableau 5 : Longueur minimale (en mètre) des tronçons hydromorphologiques	27
Tableau 6 : Largeur de lit mineur théorique de l'île de la Réunion.....	33
Tableau 7 : Largeur de lit mineur théorique en Martinique	34
Tableau 8 : Largeur de lit mineur théorique en Guadeloupe	34
Tableau 9 : Largeur de lit mineur théorique à Mayotte	34
Tableau 10 : Largeur de lit mineur théorique en Guyane	34
Tableau 11 : Mise en classe des pentes et des rangs de Strahler dans la typologie détaillée	36
Tableau 12 : Construction de l'intitulé des types pour la typologie détaillée	36
Tableau 13 : Dénombrement des types de cours d'eau simplifiés	41
Tableau 14 : Eléments et paramètres de qualité hydromorphologique	43
Tableau 15 : Principales pressions rencontrées	46
Tableau 16 : Liste des obstacles	47
Tableau 17 : Paramètres de qualité hydromorphologique	48
Tableau 18 : Longueur maximale des USRA	55
Tableau 19 : Longueur maximale des USI	55
Tableau 20 : Remplissage d'une table de probabilité	60
Tableau 21 : Exemple de table d'un descripteur	60
Tableau 22 : Résumé des poids relatifs attribués à chaque paramètre élémentaire	61

SOMMAIRE DES FIGURES

Figure 1 : Exemples de sectorisation basée sur la largeur relative du fond de vallée.....	23
Figure 2 : Visualisation des fonds de vallées (ombrage et pente)	29
Figure 2 : Exemples de fonds de vallée à substrat mixte alluvial/rocheux.	32
Figure 3 : Carte du zonage des lits mineurs de l'île de la Réunion.....	33
Figure 4 : Typologie simplifiée des cours d'eau des Caraïbes et de l'île de la Réunion	38
Figure 5 : Typologie simplifiée des cours d'eau de Mayotte	39
Figure 6 : Typologie simplifiée des cours d'eau de Guyane	40
Figure 7 : Agrégation des facteurs de pressions dans l'approche bayésienne.	44

Ce rapport méthodologique à destination des utilisateurs des résultats du projet RHUM s'accompagne :

- D'un rapport technique présentant les outils et leurs fonctionnements
- D'une annexe (annexe 1) présentant les descripteurs du modèle bayésien « îles ».
- D'une annexe (annexe 2) présentant les descripteurs du modèle bayésien « Guyane ».
- D'une annexe (annexe 3 à 7) présentant les arbres de chaque département d'outre-mer.
- Des cartes de la typologie des cours d'eau pour chaque département d'outre-mer.
- Des cartes des paramètres, des éléments et de l'état hydromorphologique de chaque département d'outre-mer.

Le présent document a pour objectif de présenter les différentes phases du projet. Il doit permettre à l'utilisateur de comprendre la démarche, d'avoir un regard critique sur les résultats et de mettre en évidence les limites et les points d'amélioration à apporter.

Les auteurs de cette note méthodologique sont :

- Rémy MARTIN, chef de projet, géomaticien (ASCONIT consultants)
- Pascal PLUVINET, géomaticien (ASCONIT consultants)
- Virginie GIRARD, docteur en hydrobiologie (ASCONIT consultants)
- Loïc GROSPRETRE, docteur en hydromorphologie (Dynamique Hydro)

1. Préambule

1.1. Contexte du projet « RHUM »

Dans le cadre de la mise en place de la Directive Cadre sur l'Eau les acteurs désignés pour définir l'état écologique ont besoin d'information sur l'hydromorphologie. L'IRSTEA a été mandaté par le MEEDDAT pour élaborer une méthode d'analyse qui permet de disposer des données sur l'ensemble du territoire national. Le projet SYRAH qui a vocation à remplacer le SEQ-physique a été développé selon une approche à deux échelles :

- Le premier niveau dit « large échelle » spatialise l'information hydromorphologique à travers les zones hydrographiques de la BD Carthage. Il a pour but de fournir des éléments d'appréciation pour l'ensemble des aménagements et des usages identifiés comme présentant un risque potentiel d'altération morphologique.
- Le second niveau à plus grande échelle (découpage des cours d'eau en tronçons géomorphologiques) permet une analyse plus fine des aménagements et usages à l'origine de la perturbation morphologique.

SYRAH fournit un axe général d'analyse dans le cadre de la mise en œuvre de la DCE, mais permet également d'enrichir les évaluations plus locales à élaborer, afin de définir les actions à réaliser pour améliorer la situation physique des cours d'eau.

L'objectif de la prestation est d'élaborer le RHUM (référentiel hydromorphologique ultra-marin) qui est une adaptation de SYRAH sur les cinq départements d'outre-mer (Guadeloupe, Martinique, Guyane, île de la Réunion et Mayotte), car ces territoires répondent également aux obligations de la DCE.

Afin de replacer l'étendue de ce référentiel par rapport au référentiel métropolitain (SYRAH), quelques chiffres marquants ont été mis en avant. Le linéaire cumulé de cours d'eau en métropole est de 515 785 km¹. A titre de comparaison, pour les départements d'outre-mer il est de 204 568 km (sur une superficie totale de 89 490 km²) :

- Guyane : 192 000 km
- Martinique : 4 156 km
- Guadeloupe : 3 725 km
- Ile de la Réunion : 3 587 km
- Mayotte : 1 100 km

Ce linéaire cumulé de cours d'eau en outre-mer correspond approximativement à l'équivalent du réseau de trois des six agences de l'eau métropolitaines (202 841 km linéaire sur un territoire de 270 935 km²) :

- Loire Bretagne : 135 493 km
- Seine Normandie : 55 083 km
- Artois-Picardie : 12 265 km

¹ IRSTEA (H.PELLA, E.SAUQUET, A.CHANDESIRIS), juin 2006 « Construction d'un réseau hydrographique simplifié à partir de la BD Carthage ».

1.2. L'hydromorphologie outre-mer

1.2.1. Antilles françaises

Bien que la DCE impose la prise en compte de l'hydromorphologie dans le cadre du programme de surveillance, en Guadeloupe et en Martinique, les connaissances sur cette thématique sont encore lacunaires. Quelques ouvrages et connaissances scientifiques sur les cours d'eau locaux sont disponibles, mais ils concernent principalement les caractéristiques géomorphologiques des cours d'eau du massif de la Montagne Pelée. Toutefois la prise en considération de l'hydromorphologie, avec la mise en œuvre de test du protocole Carhyce sur les stations suivies en Martinique, s'amorce depuis 2011. L'adaptation de l'outil SYRAH aux DOM va également permettre d'avancer à la fois en terme de connaissance de base sur le fonctionnement des milieux aquatiques et donc de gestion des milieux.

Trois types de cours d'eau, sont communément observés dans les Antilles Françaises :

- Les rivières de la Basse-Terre en Guadeloupe et du Nord de la Martinique s'écoulent dans la majeure partie de leur cours dans des vallées encaissées. Il s'agit de rivières pérennes, très réactives d'un point de vue hydrologique et turbulentes d'un point de vue hydraulique. La taille du substrat du fond du lit témoigne de la forte énergie des écoulements en crue (blocs, galets,...). Ce dynamisme est principalement lié au relief pentu et aux fortes pluies. L'importance de la pente, la faible perméabilité du substrat, sont responsables d'une grande nervosité de la rivière en période de précipitations et de tarissements assez fréquents en période d'étiage.

Sur ce type de cours d'eau, les différentes caractéristiques hydromorphologiques varient très rapidement et très régulièrement. Il est donc souvent difficile d'annoncer des comportements « médians » et de définir des valeurs caractéristiques moyennes, telles que la largeur du lit par exemple. De plus, les zones amont sont souvent à la fois peu accessibles et sous couvert forestier, ce qui rend leur étude délicate à partir de prospection terrain ou de photo-interprétation.

- Au sud de la Martinique ou sur Grande Terre en Guadeloupe, les rivières sont moins nombreuses. Cela est dû à des précipitations plus faibles et à des reliefs plus doux. Ces cours d'eau peuvent être intermittents en période d'étiage. En Martinique, les têtes de bassins versants peuvent montrer des pentes importantes mais plus l'embouchure est proche, plus les pentes deviennent faibles. On peut alors observer une intrusion d'eau marine. C'est dans ces zones de balancement des marées que sont observées les mangroves.
- Enfin, en Martinique comme en Guadeloupe, le troisième type de cours d'eau correspond aux bassins versants de taille importante, supérieure à 100 km². En Martinique, ces cours d'eau se situent dans les plaines, et en Guadeloupe, principalement sur la côte-au-vent de la Basse-Terre. Leurs vallées sont très encaissées à l'amont, s'élargissent en zone intermédiaire de plaine et se termine généralement par une zone de mangrove. Ces cours d'eau sont connus pour la complexe gestion des risques qu'ils peuvent engendrer. En effet, la forte pluviométrie locale sur les zones amont très pentues peut provoquer des crues plus ou moins violentes et dévastatrices dans les zones aval à pente modérée, victimes d'hypersédimentation et urbanisées .

L'hydromorphologie en Martinique et en Guadeloupe conditionne le bon fonctionnement des écosystèmes aquatiques et son étude permet également de pouvoir identifier des zones d'altération à risque, en bordure du cours d'eau ou sur le bassin versant, pouvant conduire à une dégradation ou uniformisation de l'état écologique et biologique. Cela peut être également un angle d'approche pour la définition des trames bleues dans le cadre des SRCE.

1.2.2. Ile de la Réunion

Les milieux aquatiques continentaux de La Réunion, composés de rivières pérennes et de zones humides, sont peu nombreux malgré le régime de pluies très abondantes.

En effet, sur les 750 ravines que compte l'île, on ne dénombre que 13 cours d'eau présentant un écoulement pérenne tout au long de l'année permettant l'installation d'une faune et d'une flore aquatique permanentes. Même pour ces rivières, les débits d'étiage sont généralement faibles alors que les débits de crue sont très importants.

Les zones humides se sont également peu développées : on ne compte que trois étangs littoraux et des mares d'altitude.

En 2007, la situation des 24 masses d'eau « cours d'eau » et 3 masses d'eau « plan d'eau » était la suivante :

- 4 masses d'eau en bon état écologique.
- 4 masses d'eau en état moyen.
- 19 masses d'eau dans un état écologique mauvais ou médiocre.

Les ravines, bien que fortement ancrées dans le rapport des réunionnais à leur territoire, sont des milieux trop souvent dévalorisés et peu protégés qui constituent fréquemment des exutoires des activités humaines: décharge sauvage, braconnage...

Les cours d'eau et les plans d'eau côtiers sont par ailleurs marqués par des pollutions émises par l'agriculture, l'assainissement autonome, les travaux ou l'extraction de matériaux en rivière.

Ces pollutions affectent particulièrement les zones aval et littorales où les activités humaines sont plus denses.

Toutefois, ce sont les prélèvements d'eau qui constituent la principale source de dégradation de ces milieux. En effet, douze des treize rivières pérennes de l'île sont aménagées pour la production d'électricité, l'agriculture ou l'alimentation en eau potable. Ces prélèvements conduisent à des baisses importantes des débits voire à des interruptions de la continuité hydraulique fortement préjudiciables (ex. : Rivière-des-Galets).

A La Réunion, les peuplements piscicoles sont soumis à de nombreuses pressions anthropiques telles que la pêche traditionnelle (les pêcheries de bichiques), le braconnage en rivière (pêche à l'eau de Javel), ou encore les aménagements sur les rivières qui se sont développés depuis les années 1950 afin de répondre aux besoins de développement de l'île (prises d'eau pour l'irrigation, eau potable, hydroélectricité, endiguement pour la protection des crues, radiers, ...). Du fait du caractère migrateur des espèces de poissons et macro crustacés de La Réunion (espèces migratrices diadromes c'est-à-dire que les espèces migrent alternativement des eaux douces à la mer pour accomplir leur cycle biologique), le maintien de la continuité longitudinale et transversale, continuité écologique à la fois entre le milieu marin et le milieu aquatique continental, est essentiel au maintien des espèces migratrices qui sont dépendantes de ces interconnexions pour pouvoir assurer leur cycle de vie.

Cependant, la connaissance de cette faune présente à ce jour de nombreuses lacunes et les connaissances scientifiques sont très récentes.

1.2.3. Mayotte

Petite-Terre ne présente pas de cours d'eau permanent mais le réseau hydrographique de Grande-Terre est quant à lui composé de nombreuses ravines et cours d'eau (26 rivières sont définies comme pérennes et sont au moins de rang 3 dans la classification de Strahler). Il existe un contraste pour les débits entre la saison sèche et celle des pluies, mais aussi entre les rivières du Nord et du Sud.

Les perturbations sur les rivières portent tant sur la quantité de la ressource en eau que sur sa qualité. Les eaux superficielles constituent l'essentiel de l'adduction d'eau potable et la demande ne cesse de croître. L'augmentation des habitations non règlementées en bordure des cours d'eau accentue les problèmes de qualité et de ressource liés aux facteurs biogéographiques et anthropiques. Il n'est pas rare de trouver des zones défrichées ou des points de lessive le long des cours d'eau, ainsi que des tas de déchets dans le lit obstruant le bon écoulement des eaux.

Les connaissances des caractéristiques des ouvrages et notamment de l'existence ou non d'une continuité écologique, d'ouvrage de franchissement piscicole ou encore du maintien du débit réservé, sont des éléments clés pour évaluer leur pression sur la qualité et le fonctionnement des cours d'eau. En période d'étiage, la faible alimentation du cours d'eau en aval de certaines prises d'eau pour lesquelles aucun débit minimum n'a été défini, peut en effet influencer sur la qualité physicochimique des eaux (concentration des substances polluantes) mais aussi sur les peuplements aquatiques.

La caractérisation de l'impact des pressions sur l'hydromorphologie est une démarche qui a été très récemment abordée par les équipes de recherches. Bien que ce volet soit une composante à part entière des écosystèmes, son évaluation reste difficile à appréhender et le travail de calibration des méthodes (SYRAH, CARHYCE, ROE, ICE) a été peu ou pas entamé à Mayotte.

Néanmoins, une étude actuellement en cours concernant les problématiques de franchissabilité piscicole, traduites par un indicateur de franchissabilité pour différentes espèces, pourra être exploitée. Mais ce travail, ainsi que les données recueillies lors des suivis de réseau de surveillance de qualité hydrobiologique (RCS), donnent également des clés sur les autres impacts potentiels qu'il sera important de synthétiser et de cartographier de manière à identifier l'évolution probable à horizon 2021.

1.2.4. Guyane

En Guyane, le contexte hydromorphologique est très particulier et les données relatives aux obstacles à l'écoulement sont quasi-inexistantes. Seuls deux grands ouvrages sont présents : le barrage de Petit-Saut et la centrale hydroélectrique de Saut Maman Valentin.

De plus, avec plus de 450 espèces de poissons d'eau douce et saumâtre connues à ce jour, les capacités physiques de franchissement des espèces sont très peu connues.

Cependant, de nombreuses études des fleuves guyanais ont permis de définir une répartition amont-aval des peuplements ichtyologiques. En effet, la zonation longitudinale des fleuves (L Tito de Morais, L Lauzanne, Zonation longitudinale des peuplements ichtyques avant mise en eau de la retenue de Petit-Saut, 1990) met en évidence 3 grands types de systèmes : biefs, petits affluents (criques) et sauts.

De plus, l'étude de la biogéographie des poissons d'eau douce (Thierry BOUJARD et Luis TITO DE MORAIS, 1992) permet d'expliquer en remontant au pléistocène pourquoi l'ichtyofaune est scindée en deux blocs, l'un oriental, qui proviendrait d'un refuge situé au nord de l'embouchure de l'Amazone, l'autre occidental, qui proviendrait d'un refuge situé à l'ouest de la Guyane.

Il conviendra donc de définir une liste de catégorie d'espèces ICE pour chaque zone biogéographique.

Les données hydrométriques disponibles remontent au début des années 50 et sont issues des suivis réalisés par l'ORSTOM. Depuis 2003 le réseau est géré par la DEAL. L'interprétation de ces séries de mesures permettra de définir les conditions hydrauliques de chaque fleuve afin de les confronter aux données de la structure physique des obstacles.

Le réseau hydrographique guyanais est aussi caractérisé par un linéaire très important de « petites masses d'eau » qui représente plus de 70% du réseau. Deux thèses sont actuellement en cours au sein du laboratoire Hydreco pour l'étude biologique de ces hydrosystèmes. Une typologie est ainsi définie et la connaissance approfondie des habitats permettra d'appréhender la répartition des espèces inféodées à ces milieux.

Pour les fleuves, une typologie des cours moyens des fleuves a été définie par Merona et TejerinaGaro en 2000 et 2006 lors de la mise en place de l'indice poisson.

1.3. Objectif

Ce rapport présente la méthodologie mise en place pour répondre à toutes les phases de construction du RHUM, qui sont les suivantes :

Phase 1 : Elaboration d'un réseau hydromorphologique

- Construction d'un réseau hydrographique simplifié
- Découpage des cours d'eau en tronçons géomorphologiques homogènes (sectorisation)
- Caractérisation des tronçons par le renseignement de variables naturelles et élaboration de la typologie des tronçons vis à vis du fonctionnement hydrologique

Phase 2 : Extraction des indicateurs bruts

- Découpage en unités spatiales de recueil et d'analyse (USRA)
- Préparation et calcul des zones d'analyse (buffer)
- Préparation des couches de données

Phase 3 : Définition des risques d'altération

- Création des légendes et des indicateurs
- Analyse des risques d'altération
- Synthétisation des risques aux échelons supérieurs

La volonté du comité de pilotage était de mettre en place une méthodologie inspirée de SYRAH, adaptée au contexte d'outre-mer et commune aux cinq DOM. Le rapport présente donc la méthode mise en œuvre et met également en avant les ajustements méthodologiques sur chaque territoire, pour tenir compte des spécificités hydromorphologiques « locales » ou pour des questions purement techniques (selon la nature et la qualité des données mises à disposition).

2. Elaboration du réseau hydromorphologique

L'élaboration du référentiel hydromorphologique consiste dans une première phase à créer un réseau de référence, c'est-à-dire à sectoriser le référentiel cours d'eau (BD Carthage) en tronçons hydromorphologiques homogènes et à définir une typologie.

Cette première phase se décompose en trois étapes majeures :

- La construction du réseau hydrographique simplifié (§ 2.1)
- Le découpage des cours d'eau en tronçons géomorphologiques homogènes (§ 2.2)
- La classification de chaque tronçon (§ 2.3)

2.1. Construction du réseau hydrographique simplifié

2.1.1. Principe général

L'élaboration des indicateurs et l'évaluation des altérations du RHUM reposent intégralement sur des calculs de paramètres et d'indicateurs extraits depuis un référentiel hydrographique, en l'occurrence les BD Carthage sectorisées. Il est donc indispensable de simplifier et surtout de corriger géométriquement chaque référentiel hydrographique de référence.

En métropole, l'IRSTEA² a réalisé un réseau hydrographique simplifié à partir de la BD Carthage, pour les raisons suivantes :

- Problème de connexion entre les arcs des tronçons amont-aval
- Problème de direction des arcs (digitalisation de la polyligne n'étant pas toujours dans le sens de l'écoulement)
- Complexité de l'écoulement naturel (canaux, chenaux multiples...)
- Problème d'homogénéité de codification des tronçons entre agences de l'eau

L'IRSTEA a construit un réseau simplifié en ne considérant qu'un seul drain principal par zone hydrographique, dont les arcs sont jointifs et bien orientés d'amont en aval afin de permettre la modélisation de l'écoulement naturel. Ce réseau a servi de couche de travail pour le découpage des tronçons hydromorphologiques.

Lors de la mise en œuvre de SYRAH, un réseau de travail a été créé associant la géométrie de la BD Topo (car plus précise 1/5000^{ème}, contre 1/50 000^{ème} pour la BD Carthage) et les attributs de la BD Carthage (car plus renseignés et plus exhaustifs), afin de pouvoir calculer les indicateurs selon la géométrie de la BD Topo.

Pour le RHUM, il n'est pas nécessaire de caler la BD Carthage sur la BD Topo, car les BD Carthage outre-mer sont plus récentes que la version métropolitaine et se basent déjà sur la BD Topo (sauf pour la Guyane, mais la BD Topo Guyane n'est pas disponible).

² IRSTEA (H.PELLA, E.SAUQUET, A.CHANDESIRIS), juin 2006 « Construction d'un réseau hydrographique simplifié à partir de la BD Carthage »

La BD Carthage de chaque DOM est donc le référentiel de base du RHUM pour la sectorisation et la détermination des altérations.

Cependant, afin de permettre la modélisation des écoulements et l'automatisation des calculs géomatiques, elle a fait l'objet de différentes corrections :

- Géométriques : discontinuité d'écoulement, erreur de sens d'écoulement, entités multipartites...
- Attributaires : correction des identifiants cours d'eau, recalcul des rangs de strahler...

2.1.2. Corrections géométriques & attributaires de la couche hydrographique de référence

Avant de sectoriser les cours d'eau en tronçons hydromorphologiques il est nécessaire de disposer d'une couche hydrographique de travail ne contenant que les entités in fine intégrées au RHUM et géométriquement correctes afin de faciliter ensuite les traitements automatiques.

1. Filtre sur les entités hydrographiques du RHUM

Le RHUM ne porte que sur les entités naturelles. Les éléments artificiels (canaux, chenaux, aqueducs, fossés..) ont été retirés de la couche hydrographique de travail qui a été constituée à partir de la couche « tronçons hydrographiques » de la BD Carthage. A noter que certaines entités artificielles ont été conservées pour assurer la continuité du réseau hydrographique.

Le RHUM ne porte également que sur le drain principal de chaque cours d'eau. En d'autres termes les tresses, bras secondaires ont été retirés.

Un script POSTGIS permet de retirer automatiquement les entités non concernées par le RHUM, généralement via les informations attributaires présents dans les BD Carthage (code milieu, nom de l'entité, rang non renseigné...).

2. Corrections géométriques

Plusieurs erreurs topologiques ont été constatées sur les différentes BD Carthage.

- Aux confluences, il est parfois observé une absence de connexion avec le nœud aval soit parce que l'entité est trop courte ou trop longue.
- Il y a quelques discontinuités d'écoulement entre deux tronçons d'un même cours d'eau soit pour un problème topologique (trou), soit pour un problème attributaire car il y a une erreur de codification dans la BD Carthage.
- Certaines entités sont multipartites. Il s'agit d'entités n'ayant aucune connexion hydraulique mais ayant le même identifiant. Cela correspond à une erreur de code cours d'eau. Généralement elles ont été corrigées automatiquement, en affectant l'identifiant amont et aval lorsqu'il est identique au tronçon intermédiaire, n'ayant pas la même codification.

Cette correction est globalement marginale, toutefois une table de correspondance a été créée pour la Guyane, car un trop grand nombre de tronçons a fait l'objet d'une correction manuelle.

L'ordre de grandeur de ces erreurs topologiques est généralement centimétrique. Généralement une tolérance d'accrochage de 2mètres a été définie. Un script POSTGIS a été conçu et adapté aux spécificités de chaque DOM pour corriger automatiquement ces erreurs.

2.1.3. Calcul des rangs de Strahler

Dans le cadre de la construction du RHUM, le rang de Strahler est utilisé notamment pour :

- calibrer les filtres spatiaux (largeur des zones tampon pour le recensement des pressions riveraines),
- estimer la largeur moyenne des lits,
- fixer la longueur minimale des tronçons.

Le rang de Strahler est un indicateur imparfait de la « taille » des tronçons de cours d'eau, c'est à dire des débits liquides et solides, de la largeur moyenne du lit, de la superficie de bassin.

Suite à une analyse des BD Carthage et des rangs fournis, aux défauts intrinsèques de cet indicateur s'ajoutent ceux des couches SIG des réseaux hydrographiques où les têtes de bassin (rang 1) sont parfois surreprésentées. En effet, selon l'intensité du relief et la forme du bassin versant, le rang peut augmenter plus ou moins vite :

- certains petits sous bassins, de forme quasi-circulaire et au relief marqué, présentent un réseau dense et ramifié de ravines et obtiennent un rang élevé à l'exutoire (5-6)
- alors que des bassins plus grands, en plaine par exemple mais surtout de forme plus allongée, conservent un rang plus faible (3-4).

Par conséquent, l'utilisation des rangs tels que fournis avec les BD Carthage peut aboutir à des découpages incohérents dans un territoire peu homogène, avec :

- des largeurs théoriques de lit totalement aberrantes,
- des tronçons trop longs pour être homogènes dans les petits cours d'eau pourtant pourvus d'un rang élevé,
- des zones tampons trop étroites dans les grands cours d'eau à faible rang.

Les rangs ont donc été recalculés pour retrouver des valeurs plus représentatives de la taille du cours d'eau.

Ce sont en particulier les tronçons de tête de bassin très courts qui ne s'apparentent pas toujours à de réels cours d'eau (ravines, fossés) et sur lesquels les enjeux sont faibles ou inexistantes, qui peuvent générer ces problèmes méthodologiques. Aussi, les cours d'eau de tête de bassin (initialement en rang 1) et d'une longueur inférieure à 500m dans la plupart des DOM et 700m en Guyane ont été classés en rang 0 et n'entrent pas dans le calcul de l'ordination. La conséquence directe est une diminution des rangs maximum sur chaque DOM. En guise d'exemple, le rang 6 disparaît en Martinique et Guadeloupe, le rang 5 disparaît à Mayotte et les rangs 1-2-3 deviennent plus longs et plus représentatifs du bassin qu'ils drainent. En Guyane, le Maroni reste le seul cours d'eau de rang 8.

Ces cours d'eau ou portions de cours d'eau ne sont pas écartés du RHUM, mais uniquement du calcul de l'ordination. Ils forment un tronçon hydromorphologique à part entière, mais ne seront pas subdivisés en USRA.

Les longueurs minimales pour écarter les têtes de bassin ont été fixées après les observations suivantes :

- Antilles françaises : 500m donne l'ordination la plus représentative de la taille des cours d'eau, car des entités restent « trop longtemps » en rang faible avec une longueur minimale de 550m et inversement avec 450m.
- Guyane : 700m est correct compte-tenu de la densité du chevelu. L'impact sur le calcul des rangs est mineur.
- Ile de la Réunion : 500m améliore légèrement les rangs 2 et 3. L'impact du changement est mineur sur ce DOM car peu de cours d'eau de rang 1 sont inférieurs à 500m.
- Mayotte : certains rangs augmentent beaucoup trop vite avec un seuil inférieur à 500m (exemple : rang 2 dès 0,2km², rang 3 dès 1km²). A noter qu'avec les rangs actuels au sein du bassin du Dembéni, c'est son affluent le Songoro mbili qui a la valeur de rang la plus élevée, en raison de la densité de son chevelu amont.

Les rangs de strahler sont calculés automatiquement avec un script R.

A l'issue de cette étape de construction d'un réseau hydrographique simplifié, chaque DOM dispose d'une couche SIG des cours d'eau intégrant les rangs de strahler. Au sein de cette couche, chaque cours d'eau est morcelé à chaque changement de rang.

Cette dernière correspond à la couche de travail de base pour l'étape suivante de sectorisation.

Le tableau suivant donne le nombre et la médiane des longueurs par rang de cours d'eau et par DOM :

Tableau 1 : Dénombrement des tronçons avant sectorisation

Strahler	Guadeloupe		Martinique		Guyane		Réunion		Mayotte	
	Nb	Long	Nb	Long	Nb	Long	Nb	Long	Nb	Long
0	1 020	0.38	5 437	0.23	26 445	0.41	4	0.41	327	0.34
1	1 833	0.83	1 992	0.73	45 144	1.12	726	2.65	657	0.87
2	455	0.90	402	0.80	8 402	1.73	223	2.28	171	0.66
3	107	2.39	106	2.10	1 951	3.70	57	4.36	31	0.77
4	26	5.89	16	5.95	454	7.50	18	2.73	6	2.69
5	1	19.69	1	15.91	91	23.56				
6					24	62.74				
7					9	88.99				
8					1	361.5				

Nb = nombre de tronçons Long = Longueur médiane en Kilomètres

2.2. Sectorisation et caractérisation hydromorphologiques des cours d'eau

2.2.1. Sectorisation SYRAH : rappel méthodologique

En guise d'introduction à la sectorisation des tronçons hydrographiques en tronçons hydromorphologiques homogènes, il convient de rappeler les définitions, principes et limites listés dans le rapport méthodologique du projet SYRAH-CE (VALETTE et al. 2008)³.

2.2.1.1. Définition : tronçon hydromorphologique homogène

La sectorisation géomorphologique des cours d'eau a pour objet de distinguer, au sein d'un cours d'eau entier, des entités spatiales emboîtées présentant un fonctionnement naturel homogène. Les entités emboîtées sont le Secteur, le Tronçon, le Sous-tronçon et le Faciès. Les secteurs sont généralement identifiés à partir des hydroécorégions de niveau 1 et 2 (HER1 et HER2). Une fois le premier niveau mis en place, l'étude s'intéresse plus particulièrement aux échelles inférieures de sectorisation, notamment celle du tronçon. Ainsi, « le tronçon géomorphologique homogène devrait être l'entité de référence fondamentale pour toute démarche et les développements de SYRAH-CE ».

Un tronçon homogène doit en théorie, selon les lois de la géomorphologie fluviale, présenter des caractéristiques géomorphologiques homogènes : géométrie du lit, pente, sinuosité, style fluvial, etc. Si un tronçon homogène présente des portions de son linéaire manifestement différentes les unes des autres, on peut alors suspecter une ou plusieurs altérations hydromorphologiques.

Les explications ci-avant sont essentielles pour comprendre le principe fondamental des méthodologies SYRAH et RHUM et le rôle de la sectorisation dans cette étude : le découpage des cours d'eau en tronçons naturellement homogènes a pour but de s'affranchir tant que possible de l'influence des contrôles naturels pour mieux évaluer l'influence des pressions anthropiques.

2.2.1.2. Caractéristiques retenues pour la sectorisation SYRAH

Afin de discriminer les tronçons hydrographiques de métropole, il a été nécessaire de sélectionner des variables de contrôle de la dynamique fluviale. Elles ont été choisies en raison de leur capacité à expliquer les formes fluviales et donc à pouvoir, plus aisément, déceler les altérations ultérieurement. Parmi les variables de contrôle de la morphologie fluviale, quatre caractéristiques hydromorphologiques ont été retenues :

- les apports liquides et solides
- le substrat dominant du fond de vallée
- la largeur du fond de vallée alluvial
- la pente du lit

³ Laurent VALETTE et al. 2008, « SYstème Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau, Principes et méthodes de la sectorisation hydromorphologique »

Le nombre de critères discriminants a volontairement été réduit dans un souci de lisibilité et de pertinence. En effet, les variables choisies suffisent à caractériser la morphologie du cours d'eau et cela évite la redondance entre celles-ci.

Les apports liquides et solides se matérialisent par la taille des cours en termes de débit. La variable retenue est l'ordination du rang de Strahler. Une limite de tronçon est placée à chaque changement de rang de la rivière, c'est-à-dire après chaque confluence avec un affluent de taille équivalente. On considère que ce sont des confluences majeures présentant une augmentation significative de débit. En pratique, à partir du rang 4, les confluences avec les cours de rang n-1 délimitent des tronçons. A partir du rang 5, les confluences avec les rivières de rang n-2 sont également prises en compte. Une autre couche d'information a été utilisée et se nomme « Ecoulements annuels moyens ». Elle correspond à une base de données des écoulements moyens en France (Sauquet, 2005). Tous les calculs ont été effectués à partir de chroniques de débits mensuels de plus de mille stations, provenant de la Banque HYDRO. Cette information a ensuite été extrapolée, puis compilée, pour les besoins de cartographie, sur la base du zonage hydrologique de la BD Carthage. Ses champs « cumul des modules interannuels » et « cumul des débits spécifiques » ont permis :

- De donner un ordre de grandeur plus précis que le rang de Strahler pour la discrimination hydrologique ;
- De quantifier l'importance relative des apports des affluents et donc leur effet sur une éventuelle modification des processus géodynamiques.

La nature du substrat dominant a été utilisée lorsque le fond de vallée n'était pas alluvial. Elle permet de renseigner sur la nature des apports de versants ou des apports solides des différents affluents, la dynamique fluviale, le type de crue... Cette variable a été appréciée à partir des cartes géologique (BRGM, 1/50 000).

La largeur du fond de vallée alluvial représente l'extension maximale du lit majeur et par conséquent l'espace de liberté du cours d'eau. Une limite de tronçon a été placée à chaque changement important et brutal de la largeur du fond de vallée. Le fond de vallée alluvial a été déterminé sur les cartes géologique (BRGM, 1/50 000) par la bande d'alluvions modernes (sigles Fz et Fyz) et avec l'aide d'un buffer altimétrique, « matérialisant » la forme et la largeur du lit majeur.

La pente du lit caractérise l'énergie du cours d'eau et sa capacité de mobilisation et de transport de sédiment d'une part, et d'appréhender le degré de contrainte de la dynamique latéral du cours d'eau d'autre part. Cette variable a été jugée à partir du MNT 50m (issu BD Alti (IGN)).

Il a été décidé d'imposer une taille minimale aux tronçons hydromorphologiques homogènes. Cette taille minimale évolue en fonction de la taille du cours d'eau, appréhendée par le biais du rang de Strahler. Le principe de la taille minimale ne s'applique évidemment pas lorsque la longueur du cours d'eau est naturellement inférieure à la longueur minimale des tronçons définie.

2.2.1.3. Principes de la sectorisation SYRAH

En résumé, la majeure partie de la sectorisation pour le projet SYRAH en métropole a été effectuée par expertise hydromorphologique manuelle grâce à une visualisation conjuguée, sous SIG, de toutes les variables discriminantes (largeur, pente du fond de vallée, ordination de Strahler et nature du substrat). Il est important de noter que les coupures dues à un changement de rang de Strahler sont réalisées automatiquement par une extension du logiciel SIG, mais que l'expert en a quand même tenu compte dans sa démarche manuelle.

La sectorisation a consisté à placer, sur une nouvelle couche de données, des traits de sectorisation sécants à la couche du réseau hydrographique à l'endroit où l'opérateur estime que l'évolution des variables de contrôle provoque une modification du fonctionnement morphodynamique du cours d'eau. Les points d'intersection des deux couches vont servir de base au découpage des arcs du réseau hydrographique et donc à la création des tronçons homogènes.

Dans un second temps, la couche contenant les limites des hydroécotones de niveau 2 a permis de valider la sectorisation, voire de la rectifier. Cependant, il y a généralement une bonne corrélation entre les limites d'hydroécotones et celles des tronçons homogènes fixées par l'opérateur

2.2.1.4. Limites de la sectorisation SYRAH-CE en métropole

Même si les principales limites constatées lors du système d'audit SYRAH-CE sont dus aux différentes données utilisées, une limite difficilement quantifiable est celle de l'interprétation des données par l'expert. Les choix sur l'importance ou non d'un changement morphologique peuvent être contestée selon les points de vue des hydromorphologues. Ainsi, la sectorisation, complètement cohérente avec l'objectif global de l'audit national, est cependant légèrement influencée par les choix d'un opérateur et il convient d'en tenir compte au moment de l'interprétation.

Les autres problèmes concernent :

- La simplification du réseau « Carthage Simplifié Cemagref » qui a été créé de manière automatique à partir de la BD CARTHAGE présente plusieurs imperfections liées à l'alternance de tronçons de cours d'eau naturel et de tronçon de cours d'eau artificiel.
- La couverture partielle du territoire métropolitain par les cartes géologiques au 1/50 000.
- Le manque de différenciation des types alluvions sur certaines cartes géologiques anciennes
- Le rang de Strahler, donnée essentielle pour la sectorisation, a été à l'origine de plusieurs problèmes, malgré de nombreuses rectifications. Chaque agence de l'eau a numérisé les rivières de son territoire et la densité de cours d'eau retenus varie donc d'une agence à l'autre. Cela a nécessité un recalibrage du rang de Strahler à l'échelle nationale.
- La mauvaise prise en compte de discontinuités trop petites pour faire l'objet de tronçons complets respectant la taille minimale des tronçons
- La difficulté à déterminer la dynamique morphologique naturelle du cours d'eau lorsque le tronçon est fortement artificialisé.

2.2.1.5. RHUM : adaptation de la méthode SYRAH-CE

Dans le cadre de la présente étude (RHUM), il convient de conserver les fondements de la sectorisation réalisée dans le cadre de SYRAH. Cependant, le contexte physiographique et les données disponibles dans chaque DOM ont été pris en compte pour établir une méthode adaptée par :

- L'ajustement de seuils à chaque territoire (Ex : taille minimale des tronçons)
- La prise en compte de nouvelles données ou inversement l'abandon de certaines données incomplètes ou peu précises (Ex : intégration des sauts à la sectorisation des cours d'eau de Guyane et non prise en compte de la géologie à Mayotte car peu fiable).
- Le choix de traitements géomatiques spécifiques (Ex : choix d'une nouvelle méthode pour identifier les confluences majeures afin de pallier au manque de données sur les débits et surtout aux problèmes majeurs inhérents à l'ordination de Strahler).

2.2.2. Sectorisation RHUM : sources des données et caractérisation des variables

Le tableau suivant présente les principales variables (ou groupes de variables) qui contrôlent le fonctionnement des cours d'eau. Les variables retenues pour la sectorisation puis la typologie et les indicateurs utilisés à cet effet sont également présentés.

Rappelons que la non prise en compte des contrôles anthropiques est volontaire car elle constitue l'un des principaux fondements méthodologiques de l'étude : la sectorisation en tronçons naturellement homogènes a pour objectif de s'affranchir tant que possible de l'influence des contrôles géomorphologiques naturels pour mieux évaluer l'influence des pressions anthropiques sur l'état des cours d'eau.

Variables de contrôle	Sectorisation		Typologie	
	prise en compte	indicateur	prise en compte	indicateur
Apports liquides et solides	OUI (identification des confluences majeures)	pourcentage d'augmentation de la longueur cumulée du réseau hydrographique au droit de chaque confluence (un seuil de 35% a été défini pour distinguer les confluences mineures des confluences majeures)	OUI (classification selon la taille des cours d'eau)	rang de Strahler
Largeur relative du fond de vallée alluvial	OUI	discontinuités de la largeur du fond de vallée alluvial détectées à partir des courbes de niveau, des cartes géologiques et du MNT ou MNE (ombrage et pente)	OUI (2 classes : fond étroit ou fond modéré à large)	rapport d'encaissement évalué à partir des autres indicateurs et des buffers altimétriques
Substrat dominant du fond de vallée	OUI (dominance alluviale ou dominance rocheuse et/ou colluviale)	emprise relative des alluvions d'après les cartes géologiques	OUI (2 classes : fond à dominance alluviale ou à dominance rocheuse et/ou colluviale)	emprise relative des alluvions d'après les cartes géologiques
Pente du lit	OUI	ruptures de pente détectées à partir des courbes de niveau (assisté d'un traitement automatique permettant de détecter les ruptures les plus importantes)	OUI (4 classes : rivières, rivières torrentielles, torrents à charriage et torrents à laves)	pente moyenne des tronçons évaluée à partir du MNT ou MNE
Climat	NON	-	OUI à une échelle large	HER 1 ou 2
Biogéographie (faune et flore)	NON	-	NON	-
Activités et implantations anthropiques	NON	-	NON	-

Tableau 2 : Variables retenues dans la sectorisation et la typologie

Globalement, nous retrouvons les mêmes variables de contrôle de la dynamique fluviale retenues par l'IRSTEA dans la méthodologie métropolitaine de sectorisation. Néanmoins, quelques adaptations ont été réalisées en fonction des données disponibles et du contexte de chaque DOM. Celles-ci sont détaillées dans les parties suivantes de ce rapport.

2.2.2.1. Apports liquides et solides

Les apports liquides et solides constituent « les 2 variables de contrôle majeures de la dynamique fluviale » (Malavoi et Bravard 2010). Ces apports sont pris en compte différemment selon l'étape de traitement : sectorisation ou typologie.

Dans le cadre de la sectorisation, il s'agit d'identifier les principales discontinuités des flux liquides et solides liées aux confluences majeures. Il s'agit du premier paramètre de sectorisation, puisque la méthodologie impose un changement de tronçon à chaque changement de rang de Strahler. En plus des confluences entraînant un changement de rang, une limite de tronçon doit être placée à chaque confluence dite majeure, c'est-à-dire aux confluences avec un cours d'eau de rang inférieur mais dont les apports liquides et solides sont significatifs.

Comme évoqué précédemment, dans la méthode SYRAH, les confluences majeures ont été identifiées à partir du rang 4 avec les cours d'eau de rang n-1, et de rang n-2 à partir du rang 5. Lors de la mise en application de cette règle sur les bassins versants tests, nous avons constaté qu'elle entraînait des erreurs importantes : certaines confluences étaient identifiées comme majeures à tort, alors qu'au contraire de véritables confluences majeures étaient omises.

Afin d'améliorer la sectorisation sur chaque DOM, nous avons modifié la règle d'identification des confluences majeures : un affluent est considéré comme majeur si sa longueur représente au moins 35% de la longueur du cours d'eau principal avec lequel il conflue. C'est donc le pourcentage du linéaire cumulé amont qui devient le 1^{er} critère de sectorisation.

Les discontinuités des liquides et solides sont classiquement évaluées à partir des superficies de drainage (traitements longs et parfois impossibles au regard des données disponibles). Elles peuvent l'être à partir des longueurs de cours d'eau à condition que la densité de drainage soit à peu près homogène, et c'est le cas dans cette étude (proportionnalité entre la longueur de cours d'eau et la superficie de bassin versant). La densité de drainage correspond en fait au rapport de ces 2 dernières grandeurs et s'exprime en km/km². Lorsqu'elle est homogène, il y a alors proportionnalité entre la longueur de cours d'eau et la superficie de bassin versant. Par conséquent, se baser sur les longueurs de cours d'eau revient au même que se baser sur la superficie de bassin. La densité de drainage ne doit pas nécessairement être homogène sur l'ensemble du DOM pour que cela soit valable. Il suffit qu'elle soit homogène au sein de chaque bassin versant.

L'objectif de ce critère étant d'identifier les augmentations significatives de débits à partir de la taille des cours d'eau qui confluent, le choix du seuil de 35% s'est effectué en 2 temps :

- De manière théorique dans un 1^{er} temps : un affluent dont la longueur ne représente que 10% du cours d'eau principal ne contribuera pas suffisamment aux débits de ce dernier pour entraîner un changement notable dans son fonctionnement ; un seuil de 90% est au contraire trop élevé. Aussi avons-nous d'abord proposé de retenir comme majeures les confluences entraînant une augmentation d'environ un tiers (soit 30 à 35%) de la longueur cumulée du cours d'eau.

- De manière empirique dans un 2^{ème} temps : après le test d'un seuil à 30%, nous avons estimé que le seuil identifiait trop de confluences majeures par rapport à notre avis d'expert. Nous l'avons alors remonté à 35%.

Nous précisons que sur chaque bassin versant test de chaque DOM, il y a eu une comparaison des classements des confluences (majeures ou mineures) obtenus à partir des superficies de bassin versant (méthode de référence) et des longueurs cumulées. Selon le DOM, la méthode basée sur les longueurs permet de classer correctement 88 à 96% des confluences comme le montre le tableau 3.

Tableau 3 : Evaluation du classement des confluences majeures et mineures sur les bassins versants tests.

	Guadeloupe	Martinique	Guyane	Réunion	Mayotte
Taux global de confluences bien classées	88,1%	94,5%	95,6%	96,4%	95,1%
Taux de confluences majeures détectées	82,0%	95,5%	87,1%	92,3%	88,2%

Nota : Les pourcentages exprimés dans le tableau évaluent les résultats de la méthode de classement basée sur les longueurs de cours d'eau par rapport à la méthode de référence basée sur les superficies de drainage (dans les 2 cas, le seuil de 35% d'augmentation de l'une ou l'autre de ces variables – longueur de cours d'eau ou superficie de drainage - est appliqué pour dissocier les confluences mineures et majeures) .

A titre d'exemple, la méthode utilisée en métropole ne permet de classer correctement que 61% des confluences sur le bassin test de l'île de la Réunion. Ce changement méthodologique constitue donc une amélioration majeure de la sectorisation hydromorphologique.

Dans le cadre de la typologie des tronçons, la prise en compte des apports liquides et solides a pour but de rendre compte de l'intensité globale de ces flux, c'est-à-dire de la taille des cours d'eau. Le rang de Strahler est cette fois approprié.

Le tableau suivant indique le nombre et la valeur médiane des longueurs par rang à l'issue de la sectorisation par les confluences majeures.

Tableau 4 : Dénombrement des tronçons après sectorisation par les confluences majeures

Strahler	Guadeloupe		Martinique		Guyane		Réunion		Mayotte	
	Nb	Long	Nb	Long	Nb	Long	Nb	Long	Nb	Long
0	1027	0.38	5492	0.23	26542	0.41	4	0.41	329	0.34
1	2005	0.76	2589	0.58	50022	1.00	726	2.65	728	0.78
2	519	0.83	528	0.71	9846	1.43	267	1.66	182	0.66
3	127	1.94	120	1.87	2382	2.94	79	2.68	34	0.88
4	33	4.52	22	3.31	554	5.54	19	2.90	6	2.69

Strahler	Guadeloupe		Martinique		Guyane		Réunion		Mayotte	
	Nb	Long	Nb	Long	Nb	Long	Nb	Long	Nb	Long
5	1	19.69	1	15.91	119	16.18				
6					28	53.27				
7					11	59.97				
8					2	180.77				

Nb = nombre de tronçons Long = Longueur médiane en Kilomètres

2.2.2.2. Substrat dominant du fond de vallée

La nature du fond de vallée contrôle à la fois la dynamique verticale du lit (possibilité d'incisions), sa dynamique latérale (en lien avec la largeur du fond de vallée) et la présence d'une nappe d'accompagnement. La prise en compte de cette variable doit donc permettre de différencier 2 grands types de fonds de vallée :

- les fonds de vallée à dominance alluviale, au sein desquels le cours d'eau peuvent développer une certaine dynamique verticale (avec par exemple un risque d'incision ou de pavage en cas de prélèvements de matériaux ou de rupture du transport solide en amont, ce qui n'est pas le cas sur un substrat rocheux) ainsi que des échanges nappe-rivière, voire une dynamique latérale en érodant ses berges (de manière plus ou moins intense en fonction de la largeur du fond de vallée mais les fonds de vallée alluviaux sont rarement étroits).
- les autres fonds de vallée, à dominance rocheuse voire colluviale, qui ne développeront généralement ni l'un ni l'autre. En fait, la stricte différence entre roches et colluvions peut être complexe à déterminer, et même à définir car la distinction roche mère-altérite-colluvion ne fait pas toujours consensus, et est dans tous les cas difficile à évaluer à notre échelle d'analyse.

Cette information ne doit donc pas être confondue avec le substrat du seul lit mineur. En effet, nombreux cours d'eau seront encaissés dans un fond de vallée rocheux mais pourront tout de même présenter en surface, mais sur une épaisseur faible, une majorité de matériaux transportés sur une distance suffisante pour être considérés comme alluvions. Pour autant, ces tronçons ne développeront ni nappe d'accompagnement ni dynamique verticale et/ou latérale.

La nature du substrat est identifiée depuis les cartes géologiques du BRGM à minima au 1 : 50 000ème. Un point de sectorisation est placé dès que le cours d'eau change de substrat si les longueurs minimales sont respectées.

2.2.2.3. Largeur relative du fond de vallée alluvial

La largeur du fond de vallée alluvial représente la largeur du fond de vallée délimité par les pieds de versants à l'exclusion des éventuelles formations rocheuses. Elle contrôle à la fois la dynamique latérale des cours d'eau (possibilités de migrations, présence de zones annexes) et leur fourniture sédimentaire (nature et intensité des apports en matériaux depuis les berges ou les versants). Cette largeur doit cependant être appréciée de manière relative, c'est-à-dire en proportion de la largeur moyenne théorique du lit mineur. Les cours d'eau considérés comme encaissés, où le poids du contrôle exercé par les versants rocheux est important, correspondent donc aux tronçons dont le fond de vallée alluvial est de largeur égale ou à peine plus large que le lit mineur.

Comme proposé dans le CCTP, il est possible de distinguer 3 classes pour cette variable :

- les tronçons fortement encaissés dont la largeur du fond de vallée alluvial est inférieure à 2 fois la largeur moyenne théorique du lit mineur ;
- les tronçons moyennement encaissés dont la largeur du fond de vallée alluvial est comprise entre 2 et 10 fois la largeur moyenne théorique du lit mineur ;
- les tronçons peu ou pas encaissés dont la largeur du fond de vallée alluvial est supérieure à 10 fois la largeur moyenne théorique du lit mineur.

Pour éviter toute sursectorisation, nous avons considéré qu'une succession d'élargissements et rétrécissements pouvait constituer une homogénéisation du tronçon.

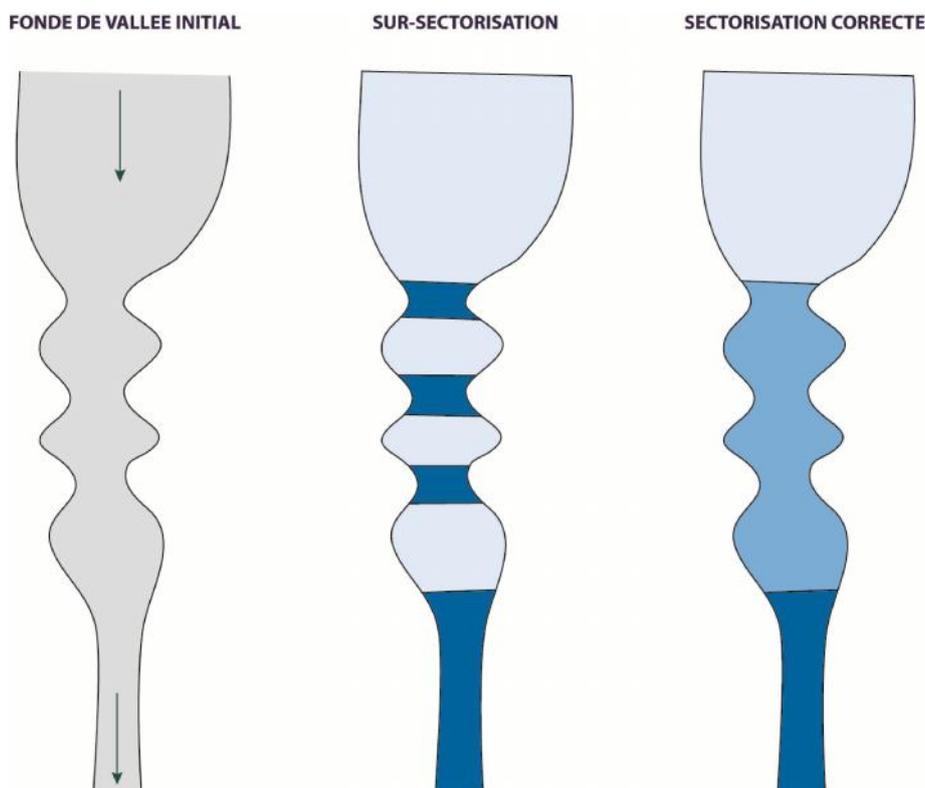


Figure 1 : Exemples de sectorisation basée sur la largeur relative du fond de vallée

Pour le projet SYRAH, la largeur du fond de vallée a été appréciée à partir d'un buffer altimétrique censé représenter l'emprise du fond de vallée (principe du buffer by rise). Le buffer altimétrique est construit à partir du MNT, en fonction d'une hauteur de X mètre par rapport à l'altitude du lit Z. A chaque point du réseau hydrographique, le buffer s'étend alors perpendiculairement au cours d'eau, en rive gauche et en rive droite, jusqu'à l'altitude Z+X censée représenter l'altitude des pieds de versants. Le paramètre X peut être ajusté en fonction de la taille du cours d'eau.

Sur les DOM, les résultats de ce traitement avec les MNT Litto3D (créés à partir d'un script ArcGIS/PYTHON interne) ne sont que très rarement représentatifs de l'emprise des fonds de vallée : la majorité des cours d'eau se voient attribuer un rapport d'encaissement faible (qui correspond à un fond de vallée modéré à large) alors qu'il s'agit pour l'essentiel de ravines fortement encaissées dans leur fond de vallée. Aucun ajustement de la hauteur X en fonction du

rang des cours d'eau n'a permis d'obtenir un résultat satisfaisant. Nous avons donc du apporter 3 modifications à cette méthode.

La première modification porte sur l'identification des discontinuités de largeur de fond de vallée dans l'étape de sectorisation. En plus des buffers altimétriques, plusieurs sources de données complémentaires ont été exploitées : les courbes de niveau du SCAN 25, le MNT et les rasters de pentes et d'ombrage créés à partir du MNT, ainsi que l'emprise des alluvions sur les cartes géologiques disponibles. De manière générale, nous avons privilégié l'analyse via l'ombrage qui permet mieux de rendre compte du point de rupture de pente entre les versants et le fond de vallée (c'est-à-dire du pied de versant).

La deuxième modification concerne le nombre de classes retenues pour caractériser l'encaissement des tronçons après sectorisation. Etant donné les difficultés de traitement, nous n'avons retenu que 2 classes :

- les tronçons à fond de vallée étroit dont la largeur du fond de vallée alluvial est inférieure à 2 fois la largeur moyenne théorique du lit mineur ;
- les tronçons à fond de vallée modéré à large dont la largeur du fond de vallée alluvial est supérieure ou égale à 2 fois la largeur moyenne théorique du lit mineur.

La troisième modification porte sur la caractérisation de l'encaissement des tronçons sectorisés, c'est-à-dire le choix entre les 2 classes « fond étroit » ou « fond modéré à large ». En effet, Le classement à partir des buffers altimétriques, qui représentent mal le lit majeur et la largeur théorique, s'est avéré inefficace. Pour pallier ce problème, nous nous sommes appuyés sur les relations naturelles existant entre la pente, le substrat dominant du fond de vallée et sa largeur relative. Les critères de détermination du degré d'encaissement ont été calés par comparaison entre ces 2 premières variables (pente et substrat dominant) et les degrés d'encaissement (fond étroit ou modéré à large) déterminés visuellement par l'expert géomorphologue. Pour les rangs élevés, la totalité des tronçons a généralement été prise en compte ; pour les rangs faibles, seuls les tronçons des bassins tests ainsi qu'un échantillon de tronçons des autres HER ont été pris en compte. Ces critères peuvent différer selon :

- le DOM étudié ;
- la HER dont fait partie le tronçon (à l'exception de Mayotte et de l'île de la Réunion où les HER ne constituent pas un facteur discriminant) ;
- la taille des cours d'eau (critères spécifiques pour chaque rang).

Ces critères sont présentés dans l'annexe 4.1.

2.2.2.4. Pente du lit

La pente du lit renseigne sur l'énergie du cours d'eau et donc sa capacité à mobiliser et transporter les sédiments.

Pour l'étape de sectorisation nous avons identifié les principales ruptures de pentes, à partir desquelles la pente aval devient 2 fois supérieure ou inférieure à la pente du tronçon amont.

Depuis le MNT, nous déterminons les courbes de niveau (espacement de 10m d'altitude) et calculons à chaque intersection entre une courbe de niveau et le cours d'eau la pente en amont et en aval de chaque intersection sur la portion de cours d'eau déjà morcelée par les confluences majeures (car il s'agit du 1er critère de sectorisation). L'opérateur identifie ensuite la rupture principale sur cette portion et recalcule via un script R les éventuelles ruptures restantes en tenant

compte de l'ensemble des critères de sectorisation. L'objectif est d'identifier les éventuelles successions de ruptures de pentes sur le cours d'eau, en évitant toutefois la sur-sectorisation. Ce cas de figure est principalement rencontré sur l'île de la Réunion.

2.2.2.5. Climat

Le climat est une variable de contrôle majeure mais son influence s'exerce à une échelle relativement large. Il ne s'agit donc pas d'un critère de sectorisation car celle-ci est réalisée à une échelle fine (échelle tronçon).

Le climat doit cependant être pris en compte dans la typologie pour distinguer les grands types de masses d'eau, telles que les oppositions côtes « au vent » et « sous le vent » sur l'île de la Réunion (Est-Ouest) et en Guadeloupe (Basse Terre – Grande Terre). La Martinique est également marquée par un contexte climatique différent entre le nord et le sud de l'île. Ce sont alors les HER (Hydro-Eco Régions) de niveau 2 qui rendent compte de l'influence du climat.

2.2.2.6. Biogéographie (faune-flore)

L'influence de la faune et de la flore régionales peut s'avérer importante dans certains systèmes fluviaux mais à une échelle très large car la présence d'une espèce donnée au sein d'un DOM est considérée comme une constante (absence ou présence). Sa répartition peut en revanche être variable au sein d'un DOM mais elle est contrôlée par les autres variables (hommes, relief, climat). Cette variable de contrôle n'est donc pas prise en compte directement mais elle l'est implicitement.

2.2.2.7. Activités et implantations anthropiques

Les pressions anthropiques et leur impact sur l'hydromorphologie des cours d'eau sont l'objet de cette étude. Elles ne doivent pas être prises en compte à ce stade, la sectorisation et la typologie établies ne devant rendre compte que de la variabilité naturelle des tronçons.

2.2.3. Sectorisation RHUM : méthodologie

2.2.3.1. Principes de sectorisation

La sectorisation consiste à placer des points de découpe sur le réseau hydrographique permettant ensuite de sectionner les cours d'eau en tronçons hydromorphologiques homogènes.

Afin de tester l'étape de sectorisation et d'optimiser certains traitements, la sectorisation a été testée et « calibrée » sur un bassin versant test pour chaque DOM.

- Guadeloupe : bassin versant de la rivière Capesterre
- Martinique : bassin versant de la rivière Lorraine
- Guyane : bassin versant de l'Approuague
- Réunion : bassin versant de la rivière des Marsouins
- Mayotte : bassin versant de la rivière Ourovéni

Une sectorisation manuelle, qui sert de sectorisation de référence, a été réalisée sur ces bassins par l'hydromorphologue. En parallèle un découpage semi-automatique a été réalisé par les géomaticiens avec des scripts POSTGIS à partir des mêmes données. En fonction de la sectorisation de référence, les scripts ont été adaptés, ainsi que les valeurs seuils notamment pour la détection des confluences majeures (pourcentage de linéaire amont) et pour les valeurs de ruptures de pente.

L'objectif des scripts est d'homogénéiser et de faciliter le travail d'interprétation entre les opérateurs, et de minimiser les temps de sectorisation compte-tenu de l'important chevelu à traiter (204 568 km de cours d'eau).

Cette première phase a fait l'objet de nombreux tests et échanges entre l'hydromorphologue et les géomaticiens pour adapter au mieux les outils, sous la forme d'une validation itérative.

La sectorisation repose sur cinq grandes étapes :

1. Le premier niveau de sectorisation est automatique et correspond aux changements de rang et aux confluences majeures.
2. La seconde étape est « manuelle » et repose sur une analyse visuelle de la nature du substrat dominant et des variations de largeur du fond de vallée alluvial.
3. La troisième étape est également « manuelle » et repose sur une analyse des ruptures majeures de pentes, avec l'appui d'un indicateur automatique visuel.

Lors des étapes 2 & 3, chaque opérateur positionne sur le réseau un point de découpe tout en renseignant le critère majeur qui a motivé la découpe.

4. La quatrième étape est automatique et vérifie le respect des règles topologiques définies :
 - Chaque point est accroché sur un cours d'eau (respect topologique), sinon il est corrigé automatiquement.
 - La longueur minimale des tronçons est vérifiée (pour éviter la sur-sectorisation et s'assurer qu'à proximité des confluences le point n'a pas été placé sur l'affluent par rapport à l'échelle de travail). Dans le cas contraire, les points concernés sont identifiés automatiquement puis corrigés manuellement.
5. La cinquième étape est automatique et correspond au découpage du réseau de travail par la couche de points de sectorisation ainsi créée.

2.2.3.2. Clés d'interprétation

Cette partie énonce les clés d'interprétation générales mises en œuvre sur l'ensemble des DOM. Toutefois, il y a parfois des règles spécifiques à chaque DOM en raison des données utilisées et/ou des spécificités locales. Celles-ci sont précisées dans le sous-chapitre suivant.

L'échelle de sectorisation est le 1/10 000^{ème}.

Afin d'omettre aucun cours d'eau, la sectorisation est réalisée zone hydrographique par zone hydrographique, d'amont en aval pour chaque cours d'eau, en commençant systématiquement par le premier cours d'eau rencontré sur le drain principal de la zone hydrographique et/ou de l'affluent considéré.

Chaque critère est analysé par ordre d'importance sur l'ensemble des cours d'eau de la zone avant de passer au critère suivant. Pour rappel l'ordre est le suivant : apports liquides et solides, nature du substrat dominant, largeur du fond de vallée alluvial, rupture de pente. S'il y en a, les spécificités de chaque DOM interviennent en dernier.

- Privilégier la sectorisation aux confluences : en cas de modification d'une des variables à proximité d'une confluence, qu'elle soit majeure ou non, le point de découpage est placé à la confluence.
- Succession de variations d'un même critère : ne pas sur-sectoriser. Les variations rapprochées d'un même critère peuvent en fait être considérées comme une hétérogénéité intrinsèque au tronçon dit homogène, qui caractérise ce dernier. Les points de découpe doivent être placés en amont et en aval de ces répétitions de changement.
- Succession de critères de sectorisation : conserver en priorité la variable ayant le plus d'impact hydromorphologique sur le tronçon considéré. En cas de doute et/ou de non-discrimination possible, la sectorisation la plus en aval est retenue.
- Respecter la longueur minimale des tronçons, même en cas de modification géomorphologique, sauf pour les cas exceptionnels (cf. ci-dessous).
- Ne pas sectoriser les rangs 0.

2.2.4. Sectorisation RHUM : longueur minimale des tronçons

Afin d'éviter une sur-sectorisation des cours d'eau, des longueurs minimales ont été définies par DOM et par rang de cours d'eau après une analyse sur les bassins versants tests.

Tableau 5 : Longueur minimale (en mètre) des tronçons hydromorphologiques

Strahler	Guadeloupe	Martinique	Guyane	Réunion	Mayotte
0	-	-	-	-	-
1	200	200	-	200	200
2	400	300	-	400	200
3	600	500	-	800	300
4	1 000	800	1 500	1500	400
5	1 500	1 000	3 000		
6			4 000		
7			6 000		
8			15 000		

Conformément à la méthode SYRAH, rappelons qu'une tolérance de 10% est acceptée par rapport aux valeurs présentées dans le tableau 4. Naturellement des tronçons encore plus courts existent lorsque deux confluences modifiant le rang sont trop proches (sinon il serait impossible d'attribuer un rang unique et cohérent à ces tronçons).

En revanche, aucune sectorisation (sauf exceptionnellement certaines embouchures) n'a été réalisée si cette longueur n'est pas respectée, quelle que soit l'importance de la variable majeure,

y compris les confluences majeures (en dehors des changements de rang). En conséquence des confluences majeures ont été retirées automatiquement, selon les règles suivantes :

- Confluence majeure trop proche d'une confluence de changement de rang
- Confluence majeure trop proche d'une autre confluence majeure. Nous conservons la confluence majeure selon les règles énoncées en annexe 4.2.
- Confluence majeure trop proche d'une fin « naturelle » de tronçon (océan ou confluence non majeure avec un cours d'eau).

Comme énoncé précédemment, exceptionnellement certains tronçons inférieurs à la longueur minimale ont été conservés. Il s'agit de l'embouchure des cours d'eau majeurs (rangs à minima de 4), sur lesquels il est constaté une modification de l'ensemble des variables majeures (pente, largeur et forme de la vallée...), compte-tenu du relief marqué dans les contextes insulaires.

2.2.5. Sectorisation RHUM : spécificité Guadeloupe & Martinique

En dehors des adaptations méthodologiques précédemment évoquées, aucune spécificité n'est appliquée sur ces DOM.

2.2.6. Sectorisation RHUM : spécificité Guyane

La Guyane est le plus vaste territoire et le moins marqué par le relief. La majeure partie du territoire est recouverte par la canopée et la précision des données disponibles est moindre que sur les autres DOM.

Les données géologiques à l'échelle du territoire sont les cartes du BRGM au 1:500 000ème contre à minima le 1:50 000ème en métropole et dans les autres DOM. Cette donnée ne peut pas être utilisée sans entraîner des imprécisions voire des erreurs majeures dans l'identification de la nature du substrat dominant en fond de vallée. A défaut de disposer d'une autre source d'information plus fiable, cette variable de contrôle n'est pas systématiquement prise en compte dans la sectorisation. Néanmoins, elle permet d'apprécier, lorsque cela est possible, les discontinuités en termes de largeur de fond de vallée alluvial en complément du MNT.

La variable « pente du lit » est également retirée de la sectorisation car les pentes sont faibles sur ce territoire, voire très faibles pour les très grands cours d'eau. Il est donc difficile d'évaluer précisément cette variable. Par ailleurs, elle présente peu d'intérêt contrairement aux autres DOM qui présentent des reliefs nettement plus marqués et au sein desquels ce critère joue un rôle primordial dans le fonctionnement hydromorphologique.

En revanche, les sauts rocheux sont intégrés à la sectorisation car leur prise en compte est d'autant plus importante à la fois qu'il s'agit de changements très brutaux de pente et qu'il est très difficile d'évaluer précisément la pente en Guyane. Cette variable est prise en compte en dernier dans l'ordre chronologique de la sectorisation et que sous certaines conditions :

- un saut unique ne constitue pas un point de découpe car la longueur du saut est toujours trop faible pour justifier de différencier un tronçon. En revanche, un point de découpe peut coïncider avec un saut lorsqu'une autre variable diffère sensiblement en aval et en amont (largeur du fond de vallée ou nature du substrat dominant). Le rétrécissement du fond de vallée favorise par exemple les affleurements rocheux, donc la formation de saut. Mais dans ce cas, ce n'est pas le saut qui motive la découpe, ce sont les autres critères.
- une succession de sauts peut en revanche être prise en considération. C'est le cas si cette succession s'étale sur seulement une partie d'un tronçon déjà sectorisé par un autre critère. En revanche, si les sauts s'étalent sur la totalité d'un tronçon, cela ne présente

aucun intérêt : la succession de sauts constitue alors une hétérogénéité intrinsèque au tronçon dit homogène, qui caractérise ce dernier.

Outre les confluences majeures, la principale variable de contrôle restante pour sectoriser ce DOM est la largeur du fond de vallée alluvial. Celle-ci est appréciée avec un traitement des ombres depuis le MNT. Pour faciliter la lecture visuelle de ce paramètre, nous l'avons couplé à un raster des pentes des versants. Rappelons que le MNT utilisé en Guyane est un MNE dont les altitudes correspondent à la canopée. L'interprétation visuelle de l'emprise des fonds de vallée à partir de ce MNE peut donc être faussée par la canopée.

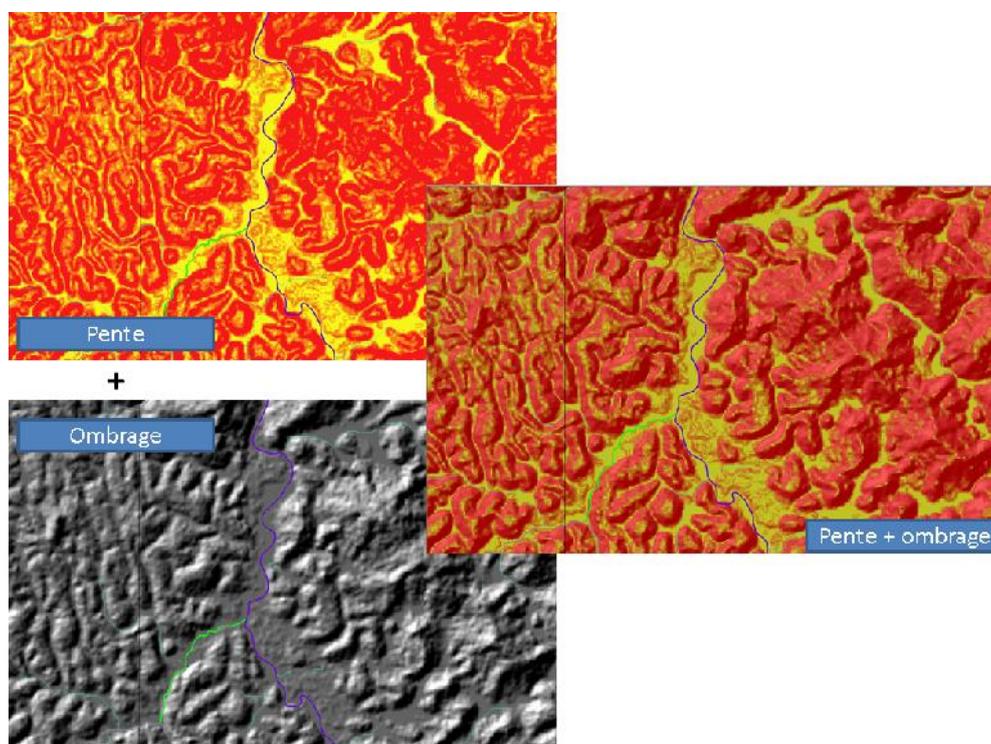


Figure 2 : Visualisation des fonds de vallées (ombrage et pente)

Compte-tenu du peu de données fiables disponibles, il a été décidé de ne sectoriser les cours d'eau qu'à partir du rang 4. Les cours d'eau de rangs inférieurs seront uniquement sectorisés par les confluences majeures.

Par ailleurs, précisons que les tronçons en anastomoses n'ont pas été différenciés des autres tronçons car, malgré le manque de données sur ce territoire, et malgré le fait qu'il s'agit d'une caractéristique importante des cours d'eau pour leur analyse comme pour leur gestion, leur prise en compte est contraire au fondement méthodologique de l'étude (cf. 2.2.1.1). Les anastomoses constituant un style fluvial particulier, le paramètre pris en compte serait donc alors le style fluvial. Or ce dernier est une variable de réponse des systèmes fluviaux qui résulte de l'ensemble des variables de contrôle, naturelles et anthropiques. La sectorisation ne doit reposer que sur les variables de contrôle naturelles. L'étude ayant pour but d'évaluer l'influence des pressions anthropiques, la prise en compte du style fluvial biaiserait les résultats de l'évaluation.

2.2.7. Sectorisation RHUM : spécificité Ile de la Réunion

En plus des cours d'eau de rang 0 (cf. 2.1.3 calculs des rangs de Strahler) qui ne sont jamais sectorisés, les membres du COPIL de ce DOM ont également souhaité retirer de la sectorisation les cours d'eau exclus du domaine public fluvial. Ces derniers sont généralement des cours d'eau temporaires, en eau uniquement pendant les périodes pluvieuses.

Comme nous l'avons évoqué précédemment la classification des fonds de vallées a été obtenue en tenant compte des règles énoncées dans l'annexe 3.1. Toutefois seize tronçons ont été corrigés à posteriori à dire d'expert, puisque les règles sur ces tronçons aboutissent à une erreur flagrante de classe d'encaissement. Il n'a pas été possible d'améliorer le résultat sans commettre d'erreur sur d'autres tronçons. Nous avons donc créé une couche de tronçons en exception aux règles.

2.2.8. Sectorisation RHUM : spécificité Mayotte

D'après le BRGM, nous ne pouvons pas tenir compte de la carte géologique pour identifier les fonds de vallées alluviaux, car il y a une continuité entre colluvions et alluvions à Mayotte. En effet, les fonds de vallée sont généralement encombrés d'alluvions alimentées par les colluvions de versant. Concrètement, ces alluvions correspondent à la phase grossière des colluvions (du sablo-graveleux au bloc métrique). Des alluvions anciennes caractérisées par une phase très grossière recouverte par des dépôts fins est souvent présente dans les fonds de vallée. Même si le terme de terrasse est un peu abusif puisque l'épaisseur des alluvions anciennes ne doit pas dépasser 4-5 mètres, celles-ci sont bien en cours d'incision par les cours d'eau actuels. Lors de la réalisation de la carte géologique, il a donc été pris par principe que toute ravine, capable de lessiver ces colluvions et d'en transporter une fraction, serait considérée comme colmatée par des alluvions. Aussi le tracé des alluvions suit les ravines de manière systématique à partir du tracé de la carte IGN. Les alluvions anciennes ont été cartées au cas par cas.

Par ailleurs, la précision des données géologiques cartographiées est largement inférieure à la largeur de la plupart des fonds de vallée.

Cette variable est donc retirée de la sectorisation.

2.2.9. Caractérisation des tronçons hydromorphologiques

A l'issue de la sectorisation, nous avons renseigné pour chaque tronçon des informations dont celles permettant de les caractériser en fonction des critères naturels ayant servis au découpage :

- Pente (%) du lit
- Classe d'encaissement du tronçon
- Largeur moyenne des buffers altimétriques 1m, 5m et 10m.
- HER niveaux 1 et 2
- Nature du substrat dominant

Chaque information a été obtenue automatiquement par des scripts de traitements SIG. La pente a été calculée en obtenant les altitudes amont et aval directement depuis chaque MNT.

La largeur moyenne des tronçons pour chaque buffer résulte de la moyenne des transects placés automatiquement sur les tronçons selon un espacement variable selon les rangs des cours d'eau.

La nature du substrat est obtenue via une jointure spatiale. Neufs points sont placés aléatoirement et de manière automatique sur le tronçon. Le substrat dominant est celui qui comporte cinq points ou plus. Nous avons utilisé des points plutôt qu'un pourcentage de longueur pour pallier aux problèmes de précision géométrique et d'échelle entre les données.

Concernant les HER, nous avons affecté l'HER du point médian situé sur le tronçon, pour les mêmes raisons que le substrat rocheux. Il y a toutefois moins d'écart géométrique entre les HER et les tronçons issus de la BD Carthage. Le point médian suffit à obtenir l'information recherchée.

Ces informations de caractérisation ont permis à l'hydromorphologue d'établir les différentes typologies de cours d'eau.

2.2.10. Limites des sectorisations

Compte-tenu des données utilisées sur chaque territoire, nous souhaitons mettre en avant quelques limites à la méthode utilisée.

Au niveau des confluences majeures, le script ne permet pas de tenir compte des successions très rapprochées de confluences mineures qui occasionnent une augmentation rapide des débits et qui occasionnent donc les mêmes implications qu'une confluence majeure. Seul un œil d'expert permettrait d'identifier systématiquement ces cas de figure. Toutefois, nous précisons qu'ils ont été très rarement observés par l'hydromorphologue de l'équipe projet sur les bassins versants tests.

Concernant les MNT de chaque DOM (en dehors de la Guyane), nous avons utilisé les Litto3D de l'IGN (résolution 1m). Ces derniers ont été dégradés à une résolution de 5m pour faciliter leur traitement et optimiser les temps de calculs. L'assemblage des dalles d'origine a nécessité plusieurs dizaines d'heures de traitement sur certains territoires. Les MNT 5m ont ensuite été lissés afin « d'atténuer » le décalage entre le talweg identifié sur le MNT et le tracé géométrique des cours d'eau de la BD Carthage. En effet, si le réseau hydrographique n'est pas directement extrait depuis le MNT utilisé, il y a parfois un décalage spatial entre les couches de données. La pente peut alors être totalement erronée si c'est l'altitude d'un versant qui est extraite automatiquement pour calculer le dénivelé plutôt que celle du talweg. Cela explique en partie le résultat mitigé des buffers altimétriques extrait depuis les MNT.

La solution optimale, mais pas sans conséquence, aurait été de recréer le réseau hydrographique depuis le MNT de chaque DOM. Toutefois, au démarrage de la prestation, nous avons fait le choix de conserver la BD Carthage notamment pour pouvoir disposer des informations attributaires telles que la codification des cours d'eau et assurer un lien entre les données géographiques produites dans le RHUM avec les référentiels hydrographiques de chaque DOM et les données « dérivées ». Il s'agissait effectivement de l'un des reproches émis par les agences de l'eau sur SYRAH.

Pour la Guyane, le SRTM level 2 (30m de résolution) a été utilisé. Comme nous l'avons signalé auparavant, celui-ci témoigne davantage de l'altitude de la canopée que de celle du sol. Il s'agit donc d'un MNE (modèle numérique d'élévation) plutôt que d'un MNT (modèle numérique de terrain). A défaut de disposer d'un MNT sur ce territoire, c'est bien le MNE qui a été utilisé. Nous précisons qu'il a également été utilisé pour créer la BD Carthage Guyane. La même limite est à observer sur ce référentiel.

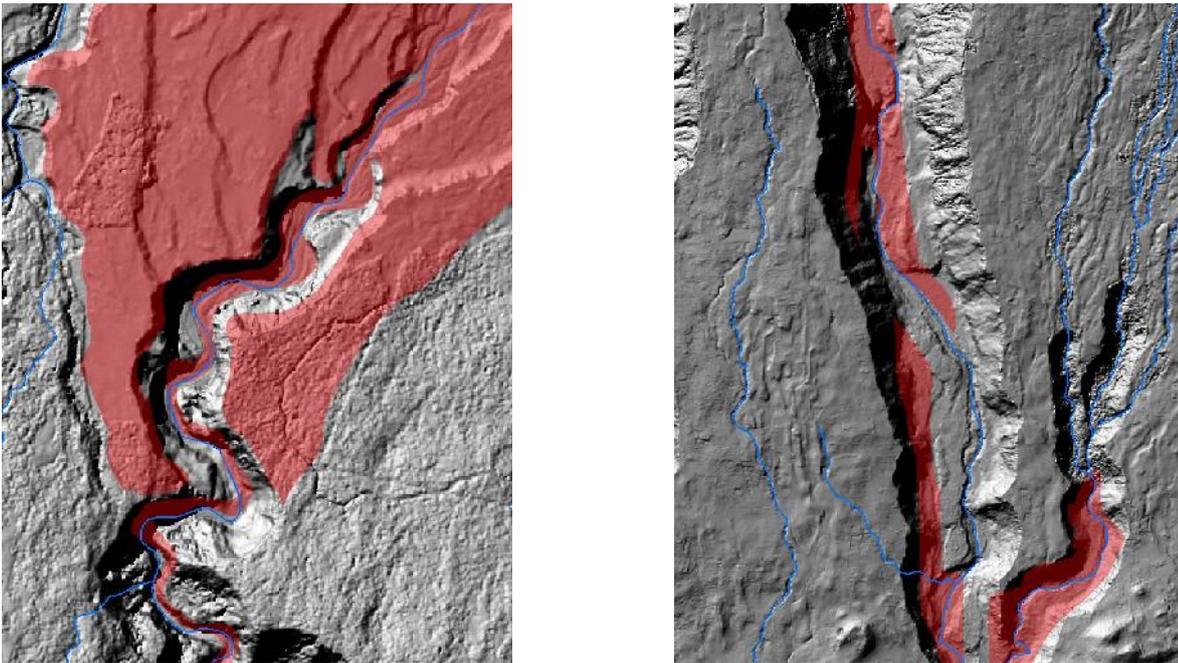
En définitive, les limites inhérentes à l'utilisation de ces MNT ou MNE entraînent des incertitudes sur 2 des variables prises en compte dans la sectorisation et la typologie des tronçons :

- la pente du lit,
- la largeur relative du fond de vallée alluvial.

Par ailleurs, concernant cette dernière variable « largeur relative du fond de vallée alluvial », la complexité morphologique de certains fonds de vallée liée à l'héritage volcanique de la plupart des territoires étudiés constitue un facteur d'incertitude supplémentaire, probablement jamais rencontré en métropole. En effet, entre les pieds de versants, les fonds de vallée sont parfois constitués d'une ou plusieurs veines d'alluvions emboîtées dans des formations rocheuses volcaniques relativement « planes », c'est-à-dire au relief peu prononcé. C'est particulièrement le cas sur l'île de la Réunion (surtout pour les rivières Langevin, des Remparts et de l'Est), dont 2 extraits de cartes sont montrés ci-après à titre d'exemple (figure 2). L'emprise des alluvions et des formations rocheuses est alors difficile à dissocier cartographiquement, ce qui rend particulièrement complexe la détermination de la largeur relative du fond de vallée alluvial. A cet effet, il convient effectivement de rappeler l'imprécision des données géologiques qui s'ajoute à celle des données altimétriques.

En définitive, dans tous les DOM étudiés, le découpage des cours d'eau en tronçons homogènes vis-à-vis de l'encaissement des fonds de vallée a toujours été réalisé « manuellement » par interprétation des données cartographiques disponibles (courbes de niveau, MNT, rasters de pentes et d'ombrages, carte géologique). En revanche, pour la caractérisation de chacun des tronçons vis-à-vis de ce paramètre « largeur relative du fond de vallée alluvial », l'emprise de ces fonds de vallée a toujours été évaluée de manière automatique et indirecte à partir de la pente et du substrat dominant (cf. 2.2.2.3 et annexe 4.1). Cette méthode a permis d'améliorer largement les résultats obtenus (par rapport à la méthode SYRAH reposant sur les buffers altimétriques) mais il subsiste des erreurs.

Figure 3 : Exemples de fonds de vallée à substrat mixte alluvial/rocheux.



Nota : Exemple sur la rivière de l'Est (à gauche) et la rivière Langevin (à droite). L'emprise des alluvions récentes Fz sur la carte géologique du BRGM est représentée en rouge ; le fond représente le raster d'ombrage issu du MNT.

2.2.11. *Largeur des lits mineurs*

Pour chaque DOM une largeur de plein bord (lit mineur) théorique a été définie par rang pour les besoins de la prestation. Cette information sert notamment à définir les emprises d'analyse au sein desquelles sont extraits les indicateurs nécessaires à l'évaluation des risques d'altération et à définir les classes d'encaissement des tronçons (largeur relative du fond de vallée alluvial) .

Compte-tenu des importantes différences de largeur selon les cours d'eau dans les Caraïbes et sur l'île de la Réunion, nous avons défini une largeur théorique par rang et par secteur géographique. En Martinique et en Guadeloupe, les secteurs correspondent aux HER de niveau 1. Le Galion en Martinique est une exception. Il a été intégré à la partie Sud, puisque ce cours d'eau présente les mêmes caractéristiques que les rivières du Sud de l'île.

Sur l'île de la Réunion, le zonage est une modification du découpage des HER validé par le COPIL de ce territoire, tel qu'il est présenté ci-dessous.

Les largeurs de lits mineurs déterminées correspondent à la médiane des transects que nous avons mesurés par photo-interprétation (PIAO) depuis les orthophotos. L'étape de PIAO n'est pas aussi exhaustive selon les rangs et les zones géographiques en raison notamment de la couverture végétale qui est une limite à cet exercice en zone tropicale.

Certaines valeurs sont obtenues avec moins de 5 transects mesurés notamment sur les rangs 1 et 2.

Figure 4 : Carte du zonage des lits mineurs de l'Ile de la Réunion

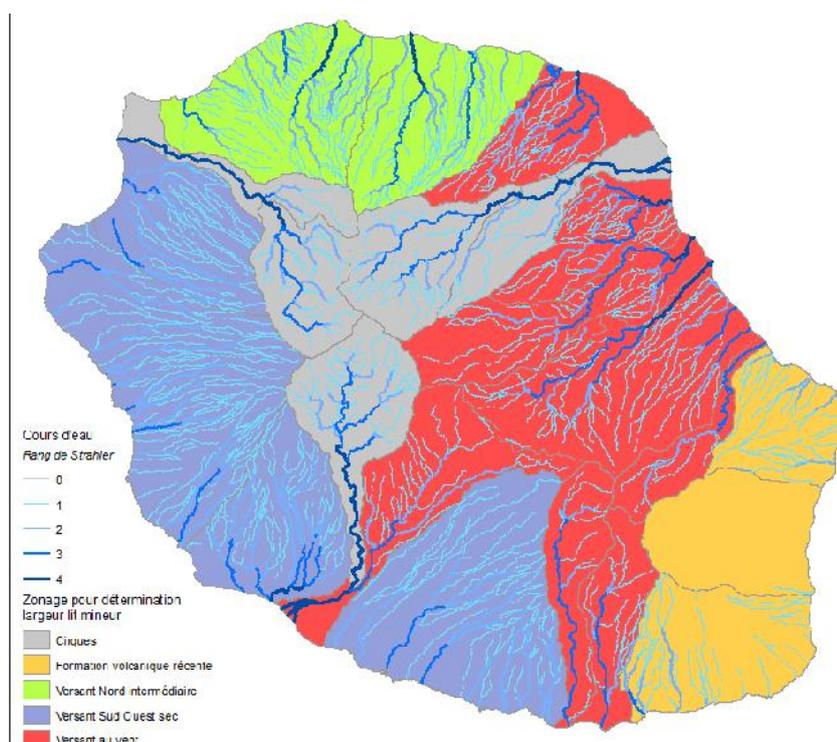


Tableau 6 : Largeur de lit mineur théorique de l'Ile de la Réunion

Rang Strahler	Cirques	Formation volcanique récente	Versant nord intermédiaire	Versant sud-ouest sec	Versant au vent
1	10	4	5	7	5
2	15	8	20	10	10
3	25	11	25	12	25
4	60	-	50	20	30

Tableau 7 : Largeur de lit mineur théorique en Martinique

Rang Strahler	Nord	Sud & Galion
1	2	3
2	4	5
3	14	8
4	16	11
5	-	20

Tableau 8 : Largeur de lit mineur théorique en Guadeloupe

Rang Strahler	Basse Terre	Grande Terre & autre îles
1	5	1
2	9	4
3	13	8
4	21	15
5	41	-

Tableau 9 : Largeur de lit mineur théorique à Mayotte

Rang Strahler	Mayotte
1	1
2	4
3	7
4	10

Tableau 10 : Largeur de lit mineur théorique en Guyane

Rang Strahler	Guyane
1	5
2	9
3	15
4	30
5	55
6	75
7	130
8	600

2.3. Typologie des tronçons

Deux typologies ont été réalisées à partir des données issues des traitements précédents :

- une typologie détaillée qui repose sur l'ensemble des variables de contrôles naturelles intégrées (cf. 2.3.1) ;
- une typologie simplifiée qui ne reprend que les caractéristiques essentielles des cours d'eau pour réduire le nombre de types et pour s'affranchir de certaines variables, parfois imprécises, qui ne rendent pas compte des principales différences entre les tronçons (cf. 2.3.2).

Le principe général est le même pour chaque DOM mais, étant donné les différences en termes de données disponibles (ex. : exclusion du substrat dominant à Mayotte) et en termes de contexte physiographique (relief et géologie notamment), les typologies ne sont pas totalement comparables.

2.3.1. Variables prises en compte et typologie détaillée

Les 3 à 4 premières variables prises en compte dans la typologie détaillée sont strictement les mêmes que celles qui ont été utilisées dans le cadre de la sectorisation en tronçons homogènes, pour rappel :

- La taille du cours d'eau qui témoigne de l'intensité des flux liquides et solides ;
- La largeur relative du fond de vallée alluvial (étroit ou modéré à large) ;
- La nature dominante du fond de vallée (alluvial ou rocheux), à l'exception des cours d'eau de Mayotte ;
- La pente du lit.

Une dernière variable a été ajoutée à cette étape de l'étude : il s'agit de l'hydro-éco région (HER) que draine chaque tronçon. Les HER permettent principalement de tenir compte des différences climatiques, totalement exclues de l'analyse jusqu'ici alors que le climat constitue généralement une variable de contrôle majeure du fonctionnement des hydrosystèmes fluviaux (cf. 2.2.2 – tableau 1) et qu'il présente un caractère très contrasté au sein de chaque DOM. Elles permettent également de compléter les informations déjà prises en compte par une partie des variables de la sectorisation (pente, largeur et nature du fond de vallée) en rendant compte des différences géologiques qui conditionnent l'hydromorphologie générale des cours d'eau et de leur fond de vallée.

Deux variables ont été mises en classes : la pente du lit et la taille du cours d'eau basée sur le rang de Strahler, selon les limites de classes qui figurent dans le tableau suivant. Les classes de pentes ont principalement été établies pour rendre compte de la distinction classique entre rivières, rivières torrentielles et torrents. Etant donné les fortes pentes qui prévalent sur la plupart des cours d'eau, nous avons ajouté à cette classification une distinction au sein des torrents :

- les torrents à charriage, dont la pente est comprise entre 6 et 40%, dont le transport solide et la morphologie résultant sont dominés par le charriage des matériaux grossiers ;
- les torrents à laves, dont la pente est supérieure à 40%, dont le transport solide et la morphologie résultant sont dominés par les laves torrentielles.

Il faut souligner que cette dernière classe de pente ne doit pas être considérée comme une évaluation du risque ou de l'aléa associé aux laves torrentielles ! En effet, des laves torrentielles peuvent se produire sur des pentes nettement plus faibles, et l'évaluation de ce type d'aléa repose sur une multiplicité de facteurs (notamment sur le rapport pente/superficie de drainage au niveau de leur cône de déjection). Cette classe de pente a seulement pour but d'identifier les tronçons à

très forte énergie où les crues sont très intenses et assimilables à des laves torrentielles, ce qui peut fortement influencer leur morphologie (dominance des faciès de types chutes ou cascades, présence d’affleurements rocheux et de blocs métriques au fond du lit...).

Tableau 11 : Mise en classe des pentes et des rangs de Strahler dans la typologie détaillée

DOM	taille du cours d’eau	pente du lit
971	« rang faible » pour les rangs 0, 1 et 2	rivière $\leq 1,5\%$ 1,5% < rivière torrentielle $\leq 6\%$ 6% < torrent à charriage $\leq 40\%$ torrent à laves > 40%
972	« rang intermédiaire » pour les rangs 3 « rang élevé » pour les rangs 4 et 5	
973	« rang faible » pour les rangs 0 à 3 « rang intermédiaire » pour les rangs 4 et 5 « rang élevé » pour les rangs 6 à 8	
974	« rang faible » pour les rangs 0, 1 et 2	
976	« rang élevé » pour les rangs 3 et 4	

En dehors de la mise en classe de ces deux variables, la typologie détaillée reprend un maximum d’informations sur chacun des tronçons car l’intitulé complet du type est un résumé littéral des informations relatives à toutes les variables précédemment citées. En effet, l’intitulé complet est simplement construit en juxtaposant un à un l’intitulé des catégories auxquelles il appartient vis-à-vis de chaque variable. Le tableau suivant illustre la construction de ces intitulés :

Tableau 12 : Construction de l’intitulé des types pour la typologie détaillée

	formule générique	exemple 1 (972)	exemple 2 (976)
terme 1	classe de pente	rivière torrentielle	torrent à charriage
terme 2	classe de rang (taille)	de rang élevé	de faible rang
terme 3	« à fond de vallée »	« à fond de vallée »	« à fond de vallée »
terme 4	classe d’encassement du fond de vallée	modéré à large	étroit
terme 5	nature dominante du fond de vallée	alluvial	nr
terme 6	HER	Pitons du Nord	Versant Est
Intitulé complet		rivière torrentielle de rang élevé à fond de vallée modéré à large, alluvial, des Pitons du Nord	torrent à charriage de faible rang à fond de vallée étroit du Versant Est

La typologie détaillée contient ainsi pour chaque DOM un grand nombre de types :

- 42 types pour la Guadeloupe
- 48 types pour la Martinique
- 28 types pour la Guyane
- 68 types pour la Réunion
- 31 types pour Mayotte

Elle permet de ne perdre que très peu d'informations quant aux analyses effectuées. La mise en classe des variables pente et rang de Strahler est effectivement l'unique perte d'information. En revanche, le nombre de types est excessif pour rendre compte des principales catégories de cours d'eau qui constituent le réseau hydrographique de chaque DOM. Certains types marginaux sont par ailleurs caractérisés par un très faible nombre de tronçons (1 seul parfois).

2.3.2. Typologie simplifiée et vue d'ensemble des principaux types

La typologie simplifiée conduit à écarter complètement certaines variables ou à rassembler certaines modalités de variables pour réduire significativement le nombre de types. Cette simplification permet de ne pas tenir compte des informations les moins significatives vis-à-vis du fonctionnement hydromorphologique des cours d'eau :

- soit parce qu'elles ne sont pas importantes (ex. : les torrents sont généralement caractérisés par un fond de vallée étroit et rocheux si bien que ces 2 dernières caractéristiques sont en partie redondantes et moins discriminantes par rapport aux autres tronçons) ;
- soit parce qu'elles sont imprécises si bien que leur prise en compte biaiserait la typologie (ex. : largeur relative du fond de vallée alluvial et nature du substrat dominant dans les petits cours d'eau).

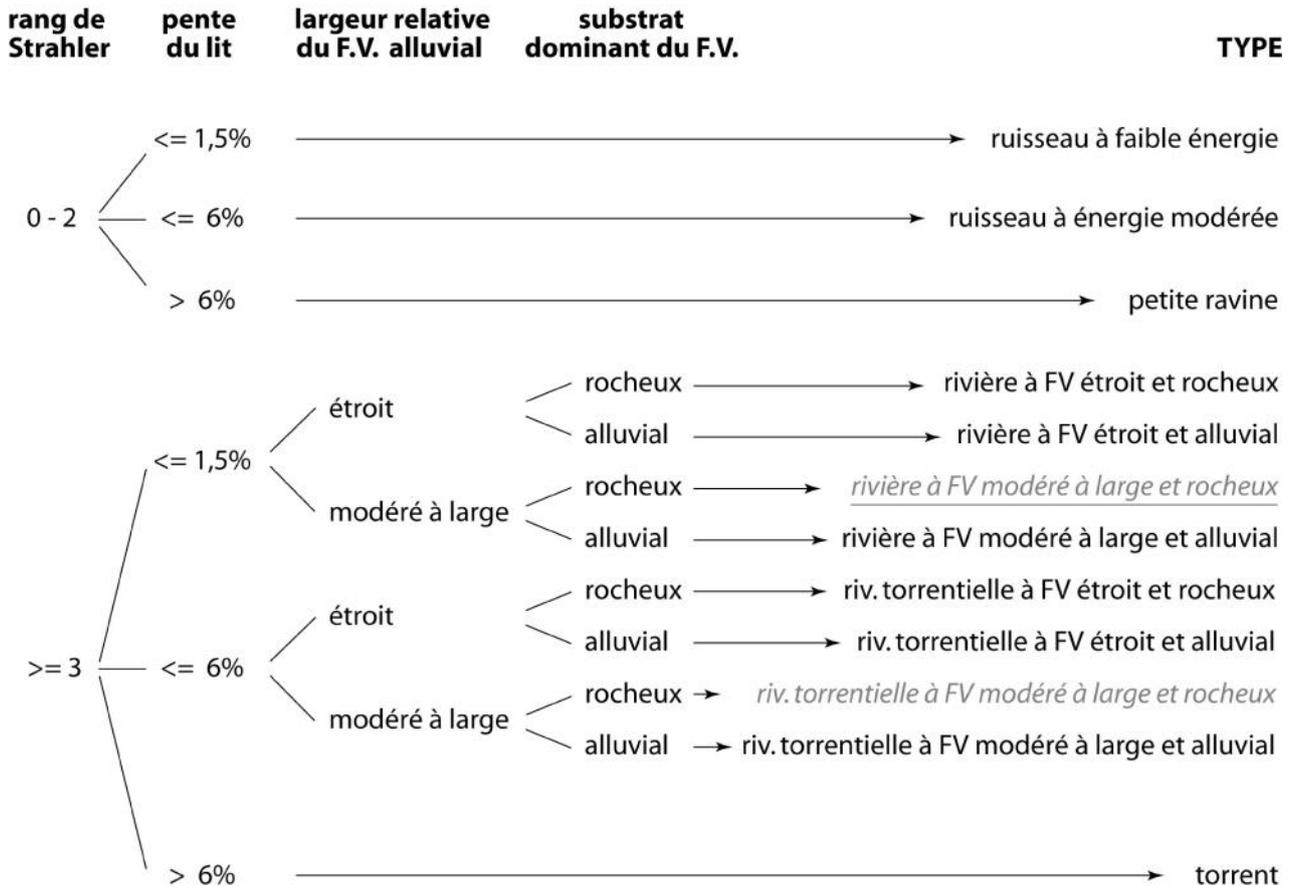
En pratique, ces 2 raisons sont étroitement liées (représentativité et imprécision des variables).

Par conséquent, les simplifications diffèrent selon le DOM étudié en raison de leurs spécificités géographiques et des données disponibles sur chacun (en nombre et précision), et selon le rang des tronçons car les données sont moins précises sur les petits cours d'eau.

2.3.2.1. Règles de classification pour la typologie simplifiée

Les règles de classification sont illustrées dans les figures suivantes.

Figure 5 : Typologie simplifiée des cours d'eau des Caraïbes et de l'île de la Réunion



Nota : Les 2 types écrits en gris ne sont pas censés exister (le fond de vallée alluvial ne pouvant pas être large si le substrat dominant est rocheux). Pourtant, 18 tronçons de la Martinique (HER Mornes du Sud) correspondent au type souligné

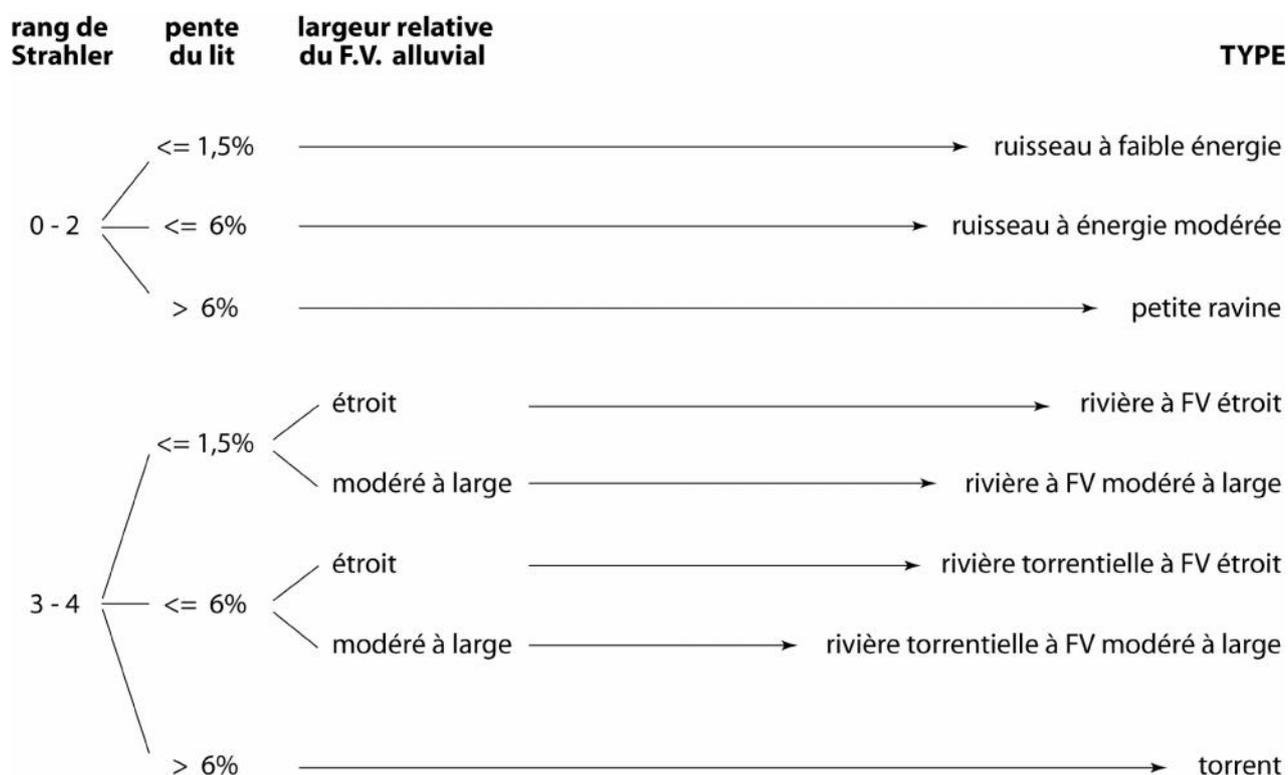
Pour la Guadeloupe, la Martinique et la Réunion, la typologie simplifiée conduit à ne distinguer que 2 tailles de cours d'eau puis à écarter les variables « largeur relative du fond de vallée alluvial » et « nature du substrat dominant » pour les petits cours d'eau comme pour les grands cours d'eau à pente forte (torrents). En effet, pour ces types de tronçons, ces 2 dernières variables sont peu discriminantes car il s'agit de fonds de vallée étroits et rocheux dans la grande majorité des cas. De plus, les données sont moins précises pour les petits cours d'eau.

A la Martinique, et plus précisément dans les Mornes du Sud, 18 tronçons (soit 0,6% du réseau hydrographique) correspondent à un type de cours d'eau qui n'est pas censé exister : « rivière à fond de vallée modéré à large et rocheux ». En effet, le fond de vallée alluvial ne peut être à la

fois large (ou modéré) et dominé par les formations rocheuses. Cette irrégularité s'explique à la fois :

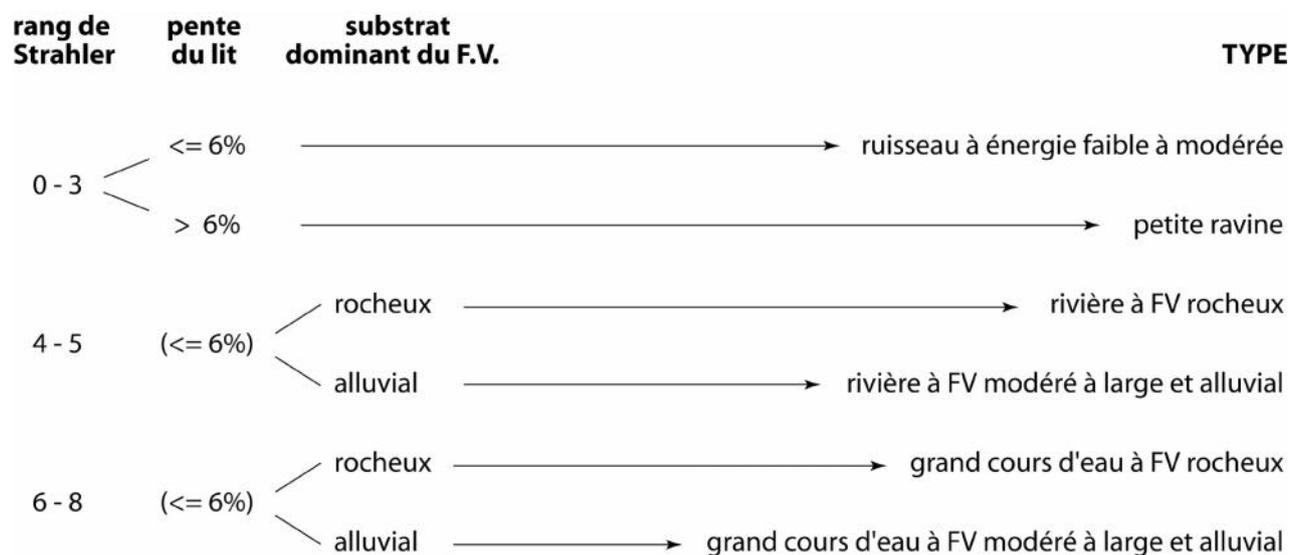
- par l'imprécision des données géologiques, qui conduit à classer certains fonds de vallée en substrat à dominance rocheuse alors qu'ils sont vraisemblablement alluviaux ;
- par l'imperfection des règles de détermination de l'encaissement des fonds de vallée et/ou de la pente du cours d'eau, qui conduit à classer certains fonds de vallée étroits en fond de vallée à substrat rocheux lorsque ces derniers ont une pente faible (ce qui n'est généralement pas le cas).

Figure 6 : Typologie simplifiée des cours d'eau de Mayotte



La typologie simplifiée des cours d'eau de Mayotte repose sur les mêmes principes que sur les DOM précédents à une exception près : la non prise en compte de la nature du substrat dominant par défaut d'informations exploitables sur la lithologie des fonds de vallée.

Figure 7 : Typologie simplifiée des cours d'eau de Guyane



La typologie simplifiée des cours d'eau de Guyane attribue une plus grande place à la variable rang en distinguant une 3^{ème} classe correspondant aux grands cours d'eau qui n'existent pas sur les autres DOM (rang = 6). Pour les petits cours d'eau (rang = 3), seule la variable pente est prise en compte, en grande partie du fait de l'imprécision des autres données. En revanche, nous ne distinguons que 2 classes de pente du fait des incertitudes plus importantes de cette variable lorsqu'elle est faible, qui ne permettent vraisemblablement pas de distinguer les rivières (pente = 1,5%) des rivières torrentielles (1,5 < pente = 6%). Pour les cours d'eau de taille supérieure, la nature du substrat dominant permet généralement à elle seule de distinguer les fonds de vallée modérés à larges, qui sont systématiquement alluviaux, des « autres » fonds de vallée considérés comme étroits car à dominance rocheuse (pour rappel, l'encassement des fonds de vallée ne tient compte que des fonds de vallée alluviaux). Par ailleurs, la variable pente n'est pas discriminante sur ces grands cours d'eau car elle est toujours faible (si bien qu'aucun ne correspond à un torrent).

Le tableau ci-après présente la répartition des types de cours d'eau pour chaque DOM, en nombre et en longueur. La distribution spatiale des types figure sur les cartes de l'annexe 3.3.

Tableau 13 : Dénombrement des types de cours d'eau simplifiés

DOM	TYPE	Longueurs		Effectifs	
		en km	en %	en nb	en %
GUADELOUPE	ruisseau à faible énergie	735	20,7%	735	15,3%
	ruisseau à énergie modérée	577	16,2%	808	16,8%
	petite ravine	1 704	47,9%	2 997	62,3%
	rivière à fond de vallée étroit et rocheux ou mixte	78	2,2%	42	0,9%
	rivière à fond de vallée modéré à large et alluvial	137	3,8%	62	1,3%
	rivière torrentielle à fond de vallée étroit et rocheux ou mixte	139	3,9%	57	1,2%
	rivière torrentielle à fond de vallée étroit et alluvial	8	0,2%	9	0,2%
	rivière torrentielle à fond de vallée modéré à large et alluvial	76	2,1%	35	0,7%
	torrent	106	3,0%	68	1,4%
MARTINIQUE	ruisseau à faible énergie	275	6,7%	471	4,7%
	ruisseau à énergie modérée	668	16,3%	1 287	12,8%
	petite ravine	2 724	66,4%	8 054	80,1%
	rivière à fond de vallée étroit et rocheux ou mixte	34	0,8%	18	0,2%
	rivière à fond de vallée modéré à large et alluvial	145	3,5%	82	0,8%
	<i>rivière à fond de vallée modéré à large et rocheux ou mixte</i>	23	0,6%	18	0,2%
	rivière torrentielle à fond de vallée étroit et rocheux ou mixte	131	3,2%	59	0,6%
	rivière torrentielle à fond de vallée étroit et alluvial	13	0,3%	9	0,1%
	rivière torrentielle à fond de vallée modéré à large et alluvial	32	0,8%	15	0,1%
	torrent	56	1,4%	39	0,4%
GUYANE	ruisseau à énergie faible à modérée	97 185	88,4%	85 617	95,2%
	petite ravine	2 779	2,5%	3 186	3,5%
	rivière à fond de vallée rocheux	5 941	5,4%	841	0,9%
	rivière à fond de vallée modéré à large et alluvial	1 158	1,1%	124	0,1%
	grand cours d'eau à fond de vallée rocheux	2 148	2,0%	136	0,2%
	grand cours d'eau à fond de vallée modéré à large et alluvial	781	0,7%	44	0,0%
REUNION	ruisseau à faible énergie	23	0,7%	23	1,4%
	ruisseau à énergie modérée	230	6,5%	154	9,6%
	petite ravine	2 882	81,3%	1 262	78,4%
	rivière à fond de vallée étroit et rocheux ou mixte	12	0,3%	3	0,2%
	rivière à fond de vallée étroit et alluvial	1	0,0%	1	0,1%
	rivière à fond de vallée modéré à large et alluvial	54	1,5%	28	1,7%
	rivière torrentielle à fond de vallée étroit et rocheux ou mixte	124	3,5%	51	3,2%
	rivière torrentielle à fond de vallée étroit et alluvial	14	0,4%	8	0,5%
	rivière torrentielle à fond de vallée modéré à large et alluvial	102	2,9%	33	2,1%
	torrent	102	2,9%	46	2,9%
MAYOTTE	ruisseau à faible énergie	40	3,9%	60	3,2%
	ruisseau à énergie modérée	235	23,0%	390	20,5%
	petite ravine	670	65,6%	1 384	72,7%
	rivière à fond de vallée étroit	2	0,2%	5	0,3%
	rivière à fond de vallée modéré à large	36	3,5%	31	1,6%
	rivière torrentielle à fond de vallée étroit	8	0,7%	6	0,3%
	rivière torrentielle à fond de vallée modéré à large	27	2,7%	22	1,2%
		torrent	3	0,3%	5

Nota : les longueurs et nombres de tronçons ont été mis en forme pour mettre en évidence la hiérarchie des types : ordre décroissant du vert foncé au blanc.

Sur 4 des 5 DOM (en excluant la Guyane), les « petites ravines » représentent la grande majorité des tronçons étant donné le relief important des îles (et le fait que les petits cours d'eau sont toujours plus nombreux que les grands !). En Guyane, ce type n'intervient qu'à la 2^{ème} place, les

« ruisseaux à énergie faible à modérée » étant très largement dominants du fait des pentes plus faibles sur ce territoire majoritairement constitué d'une plaine.

Si l'on ne considère que les « grands » cours d'eau (rang 3 sur les îles et rang 4 en Guyane), alors on peut encore constater certaines différences majeures entre les DOM :

- A la Réunion, où les pentes sont maximales, ce sont les torrents et les rivières torrentielles qui dominent largement.
- A Mayotte, ce sont surtout les fonds de vallée modérés (voire larges) qui ressortent car ils représentent plus de 80% des « grands » cours d'eau (rappel : en ne tenant pas compte des rangs 2).
- Inversement pour la Guyane, ce sont au contraire les fonds de vallée étroits qui dominent, les fonds de vallée considérés comme modérés à larges ne représentant que 20% environ des cours d'eau de rang 4. A cet égard, il faut alors préciser que les plus grands cours d'eau sont pourtant larges et parfois très larges (ex. : le Maroni). Par conséquent, leurs fonds de vallées le sont aussi en valeur absolue mais ils ne le sont généralement pas en valeur relative.
- En Guadeloupe et en Martinique, la répartition des types est relativement plus homogène si bien que les tronçons à fonds de vallée étroits et/ou rocheux ne sont que légèrement majoritaires parmi ces grands cours d'eau. En effet, la plupart d'entre eux peuvent être découpés en 2 sous-catégories quasiment d'égale importance avec une partie amont encaissée puis une partie aval qui s'évase au niveau de la frange littorale. En Guadeloupe, la différence entre les îles est par ailleurs très marquée. En Martinique, ce sont les affluents de la plaine du Lamentin qui se distinguent le mieux.

Cette typologie simplifiée, globalement comparable entre les DOM, rend bien compte des spécificités régionales comme des types dominants sur chaque territoire.

2.3.3. Limites des typologies

Une 1^{ère} limite des typologies correspond aux limites des informations sur lesquelles elles reposent, c'est-à-dire à l'imprécision des variables renseignées et en particulier la largeur relative du fond de vallée alluvial et la nature du substrat dominant.

Une 2^{ème} limite, intrinsèque à la démarche typologique, est liée à leur utilisation. Chaque typologie est établie pour un objectif particulier et, à partir d'un même jeu de données, il est possible de construire autant de typologies que d'objectifs.

La typologie détaillée établie dans le cadre de cette étude est orientée vers l'évaluation des principaux risques d'altérations d'ordre hydromorphologique. Par exemple : les risques d'incision et d'abaissement consécutif de la nappe seront négligeables dans un fond de vallée à dominance rocheuse ; le risque de cloisonnement du cours d'eau avec ses milieux riverains (zones humides, ripisylve...) sera moindre dans un fond de vallée étroit.

La typologie simplifiée permet davantage de donner un aperçu global des cours d'eau, à l'échelle de chaque DOM, en mettant en évidence les types dominants du point de vue du fonctionnement hydromorphologique et les quelques exceptions remarquables.

3. Estimation des altérations hydromorphologiques potentielles

Le but du Référentiel Hydromorphologique Ultra-Marin (RHUM) est d'évaluer le degré d'altération des cours d'eau à partir des pressions anthropiques (présentes sur le bassin, le lit majeur, le lit mineur... selon les cas).

RHUM prend en compte 3 éléments de qualité, listés dans la DCE, qui se déclinent en 9 paramètres élémentaires de qualité (10 paramètres pour la Guyane, cf. Table 14). Les biocénoses (écologie animale et végétale) ne sont pas directement prises en considération alors qu'elles auraient pu constituer un 4^{ème} élément de qualité. Mais cet élément dépend en réalité des 3 autres.

Tableau 14 : Eléments et paramètres de qualité hydromorphologique

REGIME HYDROLOGIQUE			CONTINUITÉ RIVIÈRE				MORPHOLOGIE		
QUANTITE	DYNAMIQUE	CONNEXION EAU SOUTERRAINE	CONTINUITÉ BIOLOGIQUE : MIGRATEURS	CONTINUITÉ BIOLOGIQUE : PROXIMITÉ (spécifique Guyane)	CONTINUITÉ SEDIMENTAIRE	CONTINUITÉ LATÉRALE	VARIATION PROF/LARG RIVIÈRE	STRUCTURE SUBSTRAT LIT	STRUCTURE RIVE

RHUM, comme SYRAH en métropole, se base sur une approche probabiliste (modèles bayésiens) et permet de réaliser un diagnostic hydromorphologique sur la base:

- des informations géographiques à différentes échelles (des bassins versants aux tronçons),
- du fonctionnement physique des systèmes,
- et des risques d'altérations hydromorphologiques consécutives.

3.1. Généralités sur les modèles bayésiens

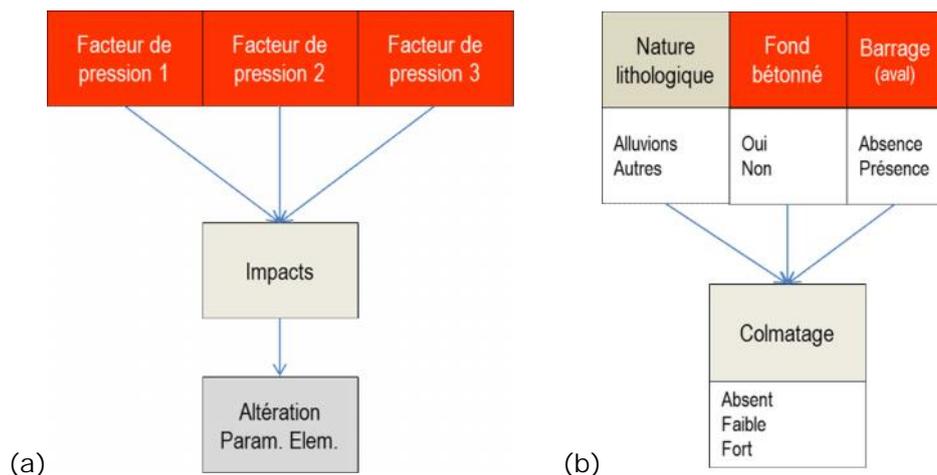
3.1.1. Principe

L'approche probabiliste utilisée dans les modèles bayésiens permet d'aborder la notion de risque, particulièrement adaptée en absence de données sur l'hydromorphologie.

Les modèles bayésiens intègrent une représentation graphique intuitive des systèmes complexes et permettent de prendre en compte les connaissances des experts dans la modélisation.

Les modèles bayésiens sont construits à partir de indicateurs (données brutes telles que la pente, la largeur mouillée, etc.) et/ou descripteurs (données calculées à partir des indicateurs tels que l'indice d'impact d'un barrage, etc.). L'association de descripteurs détermine des nœuds dont les liens de causalité (flèches) sont définis par des tables de probabilités conditionnelles. Chaque nœud étant considéré comme une variable aléatoire discrète (Figure 7).

Figure 8 : Agrégation des facteurs de pressions dans l'approche bayésienne.



Nota : (a) Principe général (b) Exemple de facteurs (et de leurs modalités) qui interviennent dans le processus de colmatage.

Les descripteurs et/ou indicateurs indiquent une pression ou un état (appelé également facteur discriminant et/ou typologique) ou un facteur qui contribue naturellement au phénomène observé (appelé également facteur de pondération). Les facteurs de pressions sont des facteurs qui permettent de pondérer (négativement ou positivement) un effet observé (ex. de la présence d'une confluence majeure qui atténue les effets d'un barrage). Les facteurs discriminant catégorisent certaines combinaisons entre les pressions et sont relatifs à des données de fonctionnement hydromorphologiques (ex. le problème de colmatage ne concerne que les fonds de lits alluviaux). Les descripteurs et/ou indicateurs sont discrétisés en plusieurs modalités (« absente », « faible », etc.), en général de 1 à 4 pour réduire le nombre de combinaison possible et faciliter la définition du prior.

Ainsi, RHUM (et SYRAH) construit sur la base des statistiques bayésiennes permettent d'évaluer le risque d'altération en fonction de plusieurs paramètres avec les particularités suivantes :

- 1 combinaison donnée de modalités de paramètres n'aboutit pas à un risque d'altération unique (ex : « altération forte », « altération moyenne »...) mais à une distribution de probabilités d'altération (ex. : 20% de chances d'avoir une altération faible, 50% de chances pour une altération moyenne et 30% de chances pour une altération forte). ET donc :
 - plus une classe d'altération a une probabilité élevée et différente des autres, plus cette classe est à priori représentative de la réalité (ex. : 10% de chances d'avoir une altération faible, 80% de chances pour une altération moyenne et 10% de chances pour une altération forte) ;
 - inversement, si toutes les classes ont à peu près les mêmes probabilités, c'est que le modèle n'est pas en mesure d'évaluer le risque avec fiabilité (ex. : 33% de chances d'avoir une altération faible, 33% de chances pour une altération moyenne et 33% de chances pour une altération forte).
- Les modèles bayésiens sont capables « d'apprendre » de la réalité terrain, c'est-à-dire de tenir compte des degrés d'altération réels définis par des études fines (basées sur les altérations constatées, pas sur la présence de pressions anthropiques).

Enfin, seules les pressions importantes sont prises en compte. Ce faisant, on ne parle pas de « risques hydromorphologiques » mais plutôt de « probabilité de pressions et d'altérations » que ce soit pour l'élément de qualité ou pour le rendu final à la masse d'eau.

3.1.2. Architecture des modèles adaptée aux DOM

Dans SYRAH, un modèle bayésien par paramètre élémentaire de qualité a été proposé, soit neuf modèles pour les îles et dix pour la Guyane.

Chaque modèle se compose :

- d'un arbre : la structure du modèle qui détermine les liens entre les variables.
 - Pour faciliter leur compréhension, il est préférable de lire ces modèles de bas en haut, c'est-à-dire du paramètre élémentaire qui doit être évalué jusqu'aux descripteurs pris en compte.
 - Certains descripteurs de second rang (intitulés « enfants ») reviennent dans plusieurs arbres car ils rendent compte de processus qui modifient plusieurs paramètres de qualité (ex. : rectification, extraction, incision, colmatage).
- de tables de distributions conditionnelles : les probabilités de risque associées à chaque combinaison de paramètre. Une ligne est égale à une combinaison de paramètres (ou de modalités de paramètres pour être exact).

Pour RHUM, nous nous sommes basés sur le modèle de la métropole et n'avons considéré que les facteurs de pression déjà suggérés. A noter que des étapes intermédiaires ont été identifiées dans notre arbre, tel que l'enneigement, afin de remplir plus simplement les tables de probabilités conditionnelles, tâche qui devient difficile dès lors que les combinaisons se multiplient.

Les échanges avec les experts et collaborateurs locaux sur les processus hydromorphologiques et l'état de la donnée ont conduit à adapter partiellement les modèles proposés en métropole (ex. présence d'orpaillage, de mangroves, etc.). Il en résulte 2 types d'architecture de modèles :

- « Continentale » : cette architecture de modèles ne concerne que la Guyane, où le fonctionnement des écosystèmes se distinguent nettement (rivières peu pentues avec la présence de sauts naturels, mangrove dynamique, régime hydrologique saisonnier)
- « Insulaire » : cette architecture de modèles concerne la Martinique et la Guadeloupe aux Antilles, Mayotte et Réunion dans l'Océan Indien. La taille relative des différentes îles est un facteur déterminant dans les processus hydromorphologiques et la présence d'espèces sur le linéaire. Par conséquent, ce modèle se décline suivant 3 variantes : une pour Mayotte (ex. relief moyennement pentu), une pour la Martinique et Guadeloupe, et enfin une pour la Réunion (ex. absence de mangrove à la Réunion ; saut naturel infranchissable).

Au final, l'ensemble des modèles fournis dispose d'une structure commune aux DOM et à la métropole, mais possède des particularités perceptibles dans l'inclusion ou exclusion de certains descripteurs et/ou le remplissage des tables de probabilités conditionnelles.

A noter qu'à l'occasion de ces échanges, les principales pressions identifiées pour chacun des DOM sont indiquées dans la Table 15.

Tableau 15 : Principales pressions rencontrées

	Principales pressions	Qualité des données
Martinique	Prélèvements	Bonne et exhaustive
Guadeloupe	Prélèvements	Bonne et exhaustive
Guyane	Orpaillage	Peu fiable et non exhaustive
Mayotte	Prélèvements	Peu fiable (en dehors AEP) et non exhaustive
Réunion	Prélèvements et Barrages hydroélectriques	Bonne et exhaustive

3.2. Facteurs pris en compte dans les modèles bayésiens

3.2.1. Terminologie

Les différents types d'obstacles inventoriés dans les DOM sont :

- Les ouvrages et les aménagements (captage, ouvrages hydro-électriques, radiers, seuils sans prélèvements, digues ; cf. descriptif Table 16),
- les chutes naturelles,
- les assecs (naturels ou anthropiques),
- les pêcheries à bichiques (seulement à la Réunion).

Tableau 16 : Liste des obstacles

Types d'ouvrages	Description
Captage / Prise d'eau / Retenue / Transfert	Un captage est constitué d'une retenue et d'une prise d'eau. Ce dispositif permet de capter ou dériver de l'eau pouvant alors servir à de multiples usages (irrigation, alimentation en eau potable, pisciculture, production d'énergie,...). Dans les DOM, il s'agit essentiellement de captage à usage d'irrigation et/ou d'alimentation en eau potable.
Barrage hydro-électrique	Barrage disposant d'un réservoir et d'une prise d'eau destinée à alimenter une usine hydroélectrique et restituant l'eau turbinée au cours d'eau en aval.
Barrage écreteur de crue	Barrage avec un réservoir qui permet d'écrêter les crues, i.e. de relâcher progressivement au cours de l'année pour diminuer les risques d'inondation.
Radier / Gué	Ouvrage permettant aux véhicules de franchir la rivière généralement en période de basses/moyennes eaux. Ces ouvrages sont constitués de dispositifs hydrauliques (buses, dalots, ...) permettant le passage de l'eau surmonté d'un tablier de circulation.
Seuils sans prélèvement	(ROE) Un seuil en rivière est un ouvrage fixe ou mobile, qui barre tout ou une partie du lit mineur contrairement au barrage qui, lui, barre plus que le lit mineur.

Nota : le terme de barrage est parfois mal employé dans les modèles présentés ci-après. Il est préférable d'y associer le terme de « retenue ». Ainsi, nous avons identifié les ouvrages qui possèdent une retenue contribuant à un effet de rétention des débits solides et liquides, et ceux qui ne constitue qu'un obstacle en lien avec la franchissabilité des espèces.

3.2.2. Les processus hydromorphologique étudiés

Les processus hydromorphologiques considérés dans l'évaluation des éléments de qualité sont listés dans la table ci-dessous.

Tableau 17 : Paramètres de qualité hydromorphologique

Elément de qualité	Paramètre élémentaire	Code	Impacts
Hydrologie	Quantité	hyd_qte	Réduction du débit d'étiage et du débit moyen annuel
	Dynamique	hyd_dyn	Modification du régime journalier, saisonnier et du régime des crues
	Connexion avec la nappe	hyd_nap	Rupture de la connexion Nappe-Rivière et abaissement de la nappe par incision du lit
Continuité	Biologique	con_bio_p	Cloisonnement interne dans un tronçon (spécifique à la Guyane)
		con_bio_m	Déconnexion du tronçon avec la mer
	Sédimentaire	con_sedim	Piégeage/Blocage de la charge solide, ralentissement du flux solide et extraction des sédiments
	Latérale	con_lat	Réduction de la mobilité latérale du cours d'eau ET de la connexion hydraulique des lits moyens/majeurs
Morphologie	Géométrie hydraulique	mph_ghy	Diminution du matelas alluvial, colmatage des fonds et modification des faciès d'écoulement
	Structure du lit	mph_lit	Diminution de l'épaisseur de sédiments, modification des faciès d'écoulement et colmatage
	Structure de la rive	mph_rive	Dégradation de la mangrove, et/ou ripisylve et artificialisation de la rive

3.2.3. Elément de qualité : Le Régime Hydrologique

3.2.3.1. Quantité

Le risque d'altération de ce paramètre est approché par une combinaison de la réduction du débit moyen (module) et des débits d'étiages.

➤ Impact sur les débits d'étiages

Le premier facteur de pression retenu est l'irrigation (ratio de surface agricole irriguée) avec l'hypothèse que l'eau destinée à l'irrigation représente les plus grands volumes prélevés. L'irrigation réduit fortement les débits à l'étiage quel que soit le mode de prélèvement. Le degré d'altération associé est donc important.

Le second facteur est la quantité de volume prélevé. Il est mis en rapport avec les caractéristiques de l'étiage pour évaluer le prélèvement en fonction de la ressource disponible.

La présence d'un barrage en amont est un facteur de pression sur les débits d'étiage. L'usage associé au barrage renseigne sur l'intensité du prélèvement en période d'étiage ; ces usages sont par ordre décroissant de niveau de pression : irrigation, prélèvements AEP, énergie / absence de prélèvement / autres (ex. récréatif) et soutien à l'étiage. L'impact des prélèvements et de l'irrigation sur les débits d'étiage sont d'autant plus important que les débits d'étiages sont faibles naturellement. Ainsi, le degré d'altération a été pondéré par les caractéristiques de l'écoulement estival. Celles-ci n'ont pas été prises en compte pour la Guyane qui est un territoire où la ressource en eau est abondante et où les régimes hydrologiques y sont peu contrastés. En revanche, dans les îles tropicales, la ressource est moins abondante et les régimes hydrologiques présentent une forte variabilité intra- et interannuelle, et interbassin (ex. exposition des côtes au

vent ou non). La donnée prise en compte pour caractériser un étiage naturellement sévère ou non est issue des HER.

➤ Impact sur le débit moyen/module

La présence de barrage et les transferts d'eaux interbassins modifient les volumes moyens annuels écoulés des cours d'eau. Seuls les barrages destinés à l'irrigation et aux prélèvements AEP ont un impact significatif car les volumes prélevés peuvent être importants et parce que ces volumes sont consommés. D'une manière ou d'une autre, la plupart des volumes prélevés ne retournent pas sinon très lentement à la rivière, alors que les autres barrages ne font que modifier la temporalité des écoulements (ils retiennent les eaux, puis les lâchent si bien que le débit moyen ne change pas). Les transferts d'eaux interbassins, qui ne s'observent qu'à l'île de la Réunion, sont destinés à l'irrigation et seront assimilés comme tel au descripteur « volume stocké en amont: usage » (vol_am_us).

3.2.3.2. Dynamique

Le risque d'altération de ce paramètre est approché par une combinaison de la modification des régimes journaliers (chronologie des débits dans une journée), saisonniers (chronologie des débits au sein d'une année) et de crue (fréquence, durée et intensité des crues).

➤ La modification du régime journalier

Les régimes journaliers sont importants d'un point de vue écologique car ils permettent d'entretenir les apports autochtones (ex. dérive des macro-invertébrés) et allochtones (ex. feuilles, fruits, etc.). Ces flux de matières organiques sont primordiaux pour les espèces des milieux insulaires tropicaux, car ce sont des milieux pauvres en nutriments (crues fréquentes qui expulsent régulièrement les nutriments vers la mer). En particulier, la présence d'un barrage hydroélectrique de production de pointe qui a un fonctionnement en écluse affecte fortement la biologie des espèces. L'effet des éclusées est potentiellement atténué par la présence d'une confluence majeure en aval du barrage.

➤ La modification du régime annuel (saisonnalité)

Le régime annuel (saison de basses et hautes eaux) structure les communautés aquatiques des rivières.

Le relargage du volume stocké dans les barrages impacte fortement la saisonnalité du régime hydrologique ; il y a un décalage temporel entre le stockage et la restitution du volume d'eau retenu, par rapport à l'écoulement naturel. L'usage le plus impactant retenu est l'irrigation qui entraîne un stockage en période de hautes eaux et pas ou peu de restitution à l'étiage. A noter que la plupart des barrages des îles sont des barrages au fil de l'eau ou des barrages avec des capacités de stockage relativement faibles (devenus transparents après les premières crues qui comblent partiellement le bassin de sédiment).

La donnée sur les volumes est partiellement disponible (seul les plus importants sont bien renseignés). Par conséquent, la valeur moyenne associée aux catégories de barrages est prise comme valeur par défaut pour distinguer les modalités relatives au volume stocké en amont (faible / forte).

➤ La modification du régime de crue.

Les crues sont les principaux moteurs de la dynamique fluviale et écologique (transport solide, autoépuration, habitats, interactions biotiques, etc.). En particulier, dans les îles, les macro-crustacés et les poissons sont principalement diadromes et réalisent régulièrement des migrations entre la rivière et la mer pour réaliser leur cycle de vie. Le maintien d'un débit d'attrait (pour la montaison) et celui d'un débit suffisant pour la dévalaison des individus juvéniles sont vitaux pour les populations aquatiques.

La présence d'un barrage écrêteur dans la partie amont du bassin lisse le régime de crue (avec un impact sur les crues exceptionnelles négligeable pour la plupart des ouvrages concernés). Le pic de crue moins élevé entraîne alors une diminution des capacités morphogènes de la rivière et limite également les débordements nécessaires à certains organismes aquatiques. L'altération associée est importante, en raison du caractère essentiel des crues fréquentes pour le maintien d'une dynamique fluviale active et la limitation des interactions biotiques.

Le second facteur de pression est l'artificialisation du bassin versant (surface agricole et urbaine) qui réduit le temps de concentration et augmente les pics de crue et/ou leur fréquence. Les conséquences peuvent être particulièrement importantes sur la morphologie des cours d'eau (ex. amplification du phénomène d'incision).

Dans le croisement de ces trois métriques, il est donné plus de poids à la modification des régimes de crues qui sont particulièrement structurants pour les communautés aquatiques.

3.2.3.3. *Connexion avec la nappe*

Le risque d'altération de ce paramètre est approché par la combinaison des risques de colmatage des fonds (diminution des échanges entre rivière et nappe) et d'incision (diminution du volume de la nappe elle-même).

Le colmatage affecte seulement les rivières dont la nature lithologique est à dominante alluviale. Il peut être généré par des fonds bétonnés qui colmatent totalement et de manière artificielle le fond du lit. De manière plus classique, il est généré par le dépôt des particules fines : dans les îles, ce sont essentiellement les cultures intensives (par ordre décroissant d'importance : bananeraies, cannes, maraichages) qui fragilisent les sols et accélèrent le processus d'érosion des sols, alors qu'en Guyane il s'agit des activités liées à l'orpaillage. La présence d'un barrage en aval immédiat du tronçon concerné (ce dernier se situant alors dans la partie ennoyée de l'ouvrage) augmente la probabilité d'un effet de colmatage.

La sinuosité du tronçon associée à la pente peut être révélatrice d'une modification du tracé du cours d'eau : les cours d'eau à pente forte développent naturellement une sinuosité faible alors que les cours d'eau à pente faible ont tendance à sinuer (en zone agricole et aux embouchures par exemple). L'association de ces deux facteurs nous permet de définir la présence ou non d'une rectification du tracé, celle-ci favorisant l'incision du lit, donc de la nappe.

Le curage ainsi que la présence de plans d'eau déconnectés (assimilés à d'anciennes gravières) contribuent également au phénomène d'incision. Ces descripteurs sont associés au processus d'extraction. Une gravière témoigne d'extractions passées qui ont un impact plus faible que les extractions récentes par curage, et le cumul des deux aura un impact maximal. A noter que la Martinique dispose d'une couche d'information sur l'extraction, considérée sous le terme de carrière. En Guyane, d'autres facteurs de pressions sont liés à l'extraction ; il s'agit de l'orpaillage, de la présence de barges, de carrière à proximité du lit mineur et des baranques. L'orpaillage et les barges ont un fort impact sur les rivières (retrait de cailloux et dépôt en aval). Toutefois, leur effet est relatif à la donnée disponible. La donnée orpaillage est exhaustive (relevés des zones illégales et zones autorisées) et associée à une potentielle activité (zones illégales : activité passée ; zones autorisées : une zone hydrographique est indiquée), tandis que la donnée « barges » ne concerne qu'un certain nombre de tronçons. Ainsi, l'effet de l'orpaillage sera considéré comparable et/ou complémentaire à celui des barges. Les baranques sont assimilées à des plans d'eau déconnectés. A noter que le déroctage n'influence que ponctuellement le

lit (l'emprise de son impact est relativement faible comparé à la largeur des lits mineurs) et son effet est supposé négligeable.

Le phénomène d'incision est causé par (dans l'ordre d'importance décroissant) : l'extraction de matériau dans le lit majeur, la présence de barrage en amont et la rectification du tracé.

Enfin, la navigabilité (initialement intégrée dans ce modèle en métropole) peut témoigner d'une diminution des échanges nappe-rivière du fait des endiguements (échanges latéraux néanmoins très faibles) ou des dragages nécessaires au maintien de l'activité de navigation. Cependant son impact est relativement faible dans le cas des DOM et cette information a été intégrée à la donnée de curage qui est la principale pression associée.

3.2.4. *Elément de qualité : La continuité de la rivière*

3.2.4.1. *Continuité biologique : migration*

Les peuplements des rivières insulaires tropicales sont constitués de macro-crustacés et de poissons. La plupart de ces espèces sont diadromes, i.e. elles réalisent de régulières migrations entre la rivière et la mer au cours de leur cycle de vie. Le peuplement se caractérise par une faible diversité. Le poisson d'intérêt patrimonial aux Antilles et à la Réunion appartient à la sous-famille des Sicydiinae (famille des Gobiidae). Cette espèce est appréciée au stade juvénile et est pêchée lors de sa montaison massive au niveau des embouchures. Cette espèce se distingue des autres poissons car elle a une forte capacité à franchir les obstacles naturels, en raison d'une ventouse ventrale. De la même manière, les crevettes de la famille des Atyidae ont une bonne capacité de franchissement des obstacles, suivant leur configuration et/ou aménagement. En Guyane, les peuplements des rivières sont composés d'espèces migratrices (certains Loricaridae ou Rivulidae disposent également d'une ventouse ventrale) et non-migratrices (avec des capacités à franchir les obstacles limitées).

Pour ces espèces diadromes, la connectivité à la mer est primordiale pour leur survie. Ce faisant, la présence d'un barrage infranchissable à l'aval déconnecte le tronçon de la mer et représente une altération majeure de la qualité hydrobiologique.

La notion de franchissabilité se définit entre autres par la hauteur de l'obstacle (de futures études sur la franchissabilité viendront compléter l'information actuellement disponible). Toutefois pour RHUM, la notion de franchissabilité a été définie à dire d'expert, en raison des difficultés à fixer les seuils. Nous considérons l'impact sur les espèces en terme de diversité et non pas de biomasse.

La pente est prise en compte, car des obstacles naturels peuvent être également infranchissables. Ainsi, lorsque la pente est forte, l'impact d'un barrage infranchissable est supposé moindre.

3.2.4.2. *Continuité biologique : proximité*

Pour les espèces non migratrices (essentiellement en Guyane et peu nombreuses dans les îles), un indicateur de cloisonnement a été retenu à une échelle plus fine : il s'agit de savoir si l'USRA accueille un ou plusieurs ouvrages infranchissables. Etant donné que les poissons non-migrateurs sont mobiles sur de courtes distances, nous avons tenu compte des USRA à l'amont et l'aval immédiat de l'USRA considéré. La notion de franchissabilité de chaque ouvrage se définit comme précédemment.

3.2.4.3. *Continuité sédimentaire*

Le risque d'altération de ce paramètre est approché en fonction des risques de piégeage/blocage des sédiments, du ralentissement du flux sédimentaire et de l'extraction des matériaux (curage et plan d'eau déconnecté), à l'exception de la Réunion. En effet, à la Réunion, nous disposons d'un indice de continuité qui résume les phénomènes de piégeage et de ralentissement du flux sédimentaire.

Le piégeage des sédiments s'opère au niveau des barrages et des plans d'eau connectés au réseau. Ces derniers sont des plans d'eau artificiels (retenues de barrage essentiellement). Un barrage qui n'a pas de retenue a un impact moindre.

Le ralentissement est dû à la présence d'un certain nombre d'obstacles sur le linéaire pondéré par la pente. En effet, pour une hauteur de seuil donnée, la diminution de la pente de la ligne d'eau, et donc de l'énergie des écoulements, engendrée par ce seuil est inversement proportionnelle à la valeur de la pente du tronçon.

Les extractions sont évaluées de la même manière que pour le paramètre élémentaire « HYDROLOGIE : Connexion avec la Nappe ».

3.2.4.4. Continuité latérale

Ce paramètre vise à évaluer le risque d'altération de la mobilité latérale du cours d'eau et de la connexion hydraulique des lits moyens/majeurs. Il est approché par la présence d'obstacles latéraux, l'incision du lit et la présence de remous liquides. .

La présence de voies de communication dans le lit mineur et de digues s'accompagnent d'une forte stabilisation des berges. Les voies de communication sont fréquemment accompagnées de protections de berges (ex. enrochement) qui bloquent totalement la mobilité latérale du cours d'eau. Les digues constituent généralement des protections un peu moins efficaces mais elles réduisent tout de même fortement l'énergie des écoulements dans le lit majeur. Ces 2 types de structures d'implantations ont donc un impact fort. La présence de digue dans le lit majeur compte, mais un peu moins (relativement aux digues dans le lit mineur) car elles modifient les débordements dans le lit majeur. Lorsque le fond de vallée est étroit, ces facteurs de pressions sont de moindre importance car le cours d'eau présente une mobilité latérale naturellement réduite voire nulle.

L'incision du lit concentre les écoulements et diminue ainsi les échanges latéraux. L'incision du lit est provoquée principalement par la rectification du tracé, l'extraction et la présence d'un barrage en amont.

La présence d'un barrage à l'aval engendre des remous liquides qui réduisent fortement l'énergie des écoulements sur le tronçon, donc sa dynamique latérale et les débordements dans le lit majeur. L'impact des remous liquides sur les échanges latéraux dépend du couple pente/hauteur de chute du barrage. La longueur du remous sinon le linéaire dont l'énergie (donc la mobilité) est réduite, sera d'autant plus importante que la pente est faible. De plus la zone d'influence est proportionnelle à la hauteur de chute.

3.2.5. Élément de qualité : La morphologie

3.2.5.1. Géométrie hydraulique

Le risque d'altération de ce paramètre est approché par une combinaison de réduction de la hauteur d'eau à l'étiage, de contraction du lit et d'enneigement à l'amont du barrage.

La contraction du lit se manifeste par une diminution de sa largeur, qui s'accompagne généralement d'une augmentation de sa profondeur. Ce processus peut résulter d'un

rétrécissement volontaire (digues, rectification du lit, sous-largeur) ou d'un phénomène d'incision (extraction, barrage en amont, rectification du lit). Un même poids dans l'évaluation de l'impact hydromorphologique est donné à la rectification du tracé et la présence de digue. En revanche, la sous-largeur est une mesure directe de la contraction du lit, descripteur auquel on assigne un poids plus fort.

L'ennoiement à l'amont d'un barrage modifie la hauteur et la largeur du lit mouillé.

La réduction de la hauteur d'eau à l'étiage résulte d'aménagements tels que la présence d'un fond bétonné, la rectification du lit, et l'importance des surfaces urbanisées à proximité du lit mineur.

La combinaison rectification du tracé et surface urbanisée s'accompagne plus généralement d'un recalibrage avec une section plus large (pour évacuer rapidement les crues et limiter le risque d'inondation). En revanche, la combinaison rectification du tracé et surface agricole permet de suspecter un recalibrage avec une section plus étroite (les cours d'eau ressemblent alors plus à un fossé étroit, encaissé et rectiligne).

Le poids attribué au descripteur rectification du tracé n'est pas fort, et le risque de réduction de la hauteur d'eau à l'étiage qui est associé (sur-largeur) ne s'observe que dans les milieux urbains et le risque de rétrécissement que dans les milieux agricoles. Pour s'assurer que nous sommes bien dans un milieu très agricole, nous avons changé les limites des classes (nommé s_agri2).

L'impact de l'incision est plus important que celui du rétrécissement (il est plus fiable notamment).

3.2.5.2. Structure et substrat du lit

Ce paramètre vise à évaluer le risque d'altération des faciès d'écoulements et des caractéristiques du substrat telles que le colmatage des fonds et la diminution du matelas alluvial (suite à une incision). Ces paramètres influençant très fortement et à plusieurs niveaux le fonctionnement morphologique du cours d'eau comme les peuplements aquatiques.

La modification des faciès d'écoulement résulte d'une modification du tracé du lit (rectification du lit), de la présence de barrage en aval (ennoiement du tronçon), de la densité d'obstacles à l'écoulement pondérée (l'impact des obstacles est d'autant plus important que la pente est faible) et la présence de plan d'eau connecté au cours d'eau.

Pour l'incision et le colmatage se reporter aux paramètres élémentaires « HYDROLOGIE : connexion avec la nappe ».

3.2.5.3. Structure de la rive et de la mangrove

La nature de la rive est impactée par la présence de digues, de voies de communications et le taux de surface urbanisée à proximité du lit mineur (et de bacs en Guyane). La présence de digues est l'aménagement qui est probablement le plus impactant.

L'état de la ripisylve est décrit par le taux de boisement sur les berges. Ce descripteur est intégré comme facteur de pondération des pressions prises en compte pour évaluer le taux d'artificialisation des berges. De manière générale, plus le taux de boisement est faible, plus il est vraisemblable que les altérations suspectées soient avérées ; inversement, si le taux de boisement est fort et les pressions faibles, il est vraisemblable que les altérations soient effectivement faibles. Mais il existe des combinaisons paradoxales (ex : aucune pression mais absence de végétation, ou l'inverse).

L'état de la mangrove est impacté par la surface agricole du bassin versant (qui augmente les apports en MES bénéfique à la mangrove) et la présence de digues et/ou voies de communications (destruction de la mangrove). Par contre, en Guyane, la mangrove n'est pas prise en compte car elle est sujette à des dynamiques fortes sous influences maritimes.

3.3. Mise en œuvre des calculs

3.3.1. Unités d'analyse : USRA et USI

Chaque tronçon hydromorphologiquement homogène a été découpé en USRA (Unité spatiale de recueil et d'analyse) pour mieux localiser les altérations et permettre une agrégation à plus larges échelles. C'est à l'échelle des USRA que sont calculés un certain nombre d'indicateurs. Un indicateur mis en classe et utilisé directement dans le modèle bayésien sera appelé descripteur. Ainsi, l'ensemble des USRA constitue une base de données pour la modélisation des altérations hydromorphologiques potentielles.

Une autre unité spatiale a été également créée, spécialement pour le calcul de sinuosité. Il s'agit des USI (Unité spatiale d'intégration).

Création des USRA

Le découpage des tronçons hydromorphologique en USRA s'est fait de manière automatique avec PostGIS. Ainsi, chaque tronçon est découpé en N tronçons de taille égale en fonction d'une longueur maximale. Cette longueur maximale a été définie selon le rang de Strahler et le zonage utilisé lors de la détermination des largeurs de lit mineur (cf. tableaux 6 à 10).

Nota : Si la longueur maximale des USRA est de 300m, un tronçon de 1000m sera découpé en quatre tronçons de 250m au lieu d'être découpé en trois tronçons de 300m et un tronçon de 100m.

L'équidistance entre chaque point pour le découpage des tronçons sera calculée selon la méthode suivante :

- Détermination du nombre de part : $P = Lg TH / Lg USRA \text{ max}$
- Détermination de l'équidistance : $E = P \text{ (à l'entier supérieur)} / Lg TH$

P = nombre de sections de tronçons selon la taille du rang

Lg TH = longueur totale du tronçon hydromorphologique

Lg USRA max : longueur maximale de l'USRA

E = équidistance des points pour découper les tronçons et créer les USRA

Un identifiant unique permet de repérer les USRA (ID_USRA). Cet identifiant est une concaténation du numéro de tronçon avec la position de l'USRA sur le tronçon (1 à N, d'amont en aval). Pour certains problèmes de calcul, un identifiant de type numérique a été créé :

$$IDUSRANUM = IDTH * 1000 + \text{Position de l'USRA}$$

Création des USI

Afin de caractériser chaque USRA en fonction de leur sinuosité, ces dernières ont été redécoupées en USI (unité spatiale d'intégration). La création est similaire à la création des USRA. Une longueur maximale des USI a donc également été définie selon les mêmes critères.

Enfin, pour chaque USI, on calcule le rapport entre la longueur de l'USI et la distance entre les extrémités des USI. Ensuite, le taux de rectitude se déduit du pourcentage d'USI rectilignes (coefficient de sinuosité supérieur à 1,05) par USRA.

Tableau 18 : Longueur maximale des USRA

Longueur MAXIMALE des USRA												
STRALHER	GUADELOUPE			MARTINIQUE		GUYANE	REUNION					MAYOTTE
	BTVH	PTVH	GTIS	SUD	NORD		FORM VOLC	VERSANT SOS	CIRQUES	VERSANT NI	VERSANT AU VENT	
0	500	600	200	250	250	600	500	800	1 200	600	600	200
1	600	600	200	250	250	600	500	800	1 200	600	600	200
2	1 000	1 000	500	600	500	1 000	1 000	1 200	1 800	2 400	1 200	500
3	1 500	1 500	1 000	1 000	1 600	1 800	1 300	1 400	3 000	3 000	3 000	800
4	2 500	2 500	1 800	1 300	1 900	3 600		2 400	7 000	6 000	3 600	1 200
5	5 000	5 000		2 400		6 600						
6						9 000						
7						15 000						
8						70 000						

Tableau 19 : Longueur maximale des USI

Longueur MAXIMALE des USI												
STRALHER	GUADELOUPE			MARTINIQUE		GUYANE	REUNION					MAYOTTE
	BTVH	PTVH	GTIS	SUD	NORD		FORM VOLC	VERSANT SOS	CIRQUES	VERSANT NI	VERSANT AU VENT	
0	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
1	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
2	200	200	200	200	200	200	200	200	300	400	200	200
3	260	260	200	200	280	300	220	240	500	500	500	200
4	420	420	300	220	320	600		400	1200	1000	600	200
5	820	820		400		1 100						
6						1 500						
7						2 600						
8						12 000						

3.3.2. Zones d'extraction de données

Les éléments d'intérêts des couches de données sont issus de zones d'extraction de données (zone tampon ou « buffer »), construites autour des USRA.

La largeur de ces différents « buffers » doit être adaptée à la nature des aménagements concernés et des altérations qui leurs sont associées :

- buffer de 10 m et 30 m (b10m et b30m) de part et d'autre de la surface en eau pour l'évaluation de la ripisylve ;
- buffer d'une largeur totale égale à 3 fois la largeur plein bord théorique (W) du cours d'eau (3W) pour évaluer les risques liés aux aménagements susceptibles de générer des contraintes immédiates sur le lit mineur ;
- buffer d'une largeur totale égale à 12 fois la largeur plein bord théorique du cours d'eau (12W) à l'intérieur d'une zone représentant le fond de vallée topographique pour évaluer les risques liés aux aménagements susceptibles de perturber la dynamique en lit majeur (espace de liberté, plaine d'inondation, annexes hydrauliques). Ce buffer a été redécoupé par le « buffer altimétrique » simulant une hauteur de 5m d'eau dans le fond de vallée.

Par ailleurs, certaines données ont été extraites à l'échelle du bassin versant (ex. surface urbanisée pour le paramètre élémentaire Hydrologie dynamique).

Deux matrices ont également été créées pour connaître à chaque USRA, les USRA amont et aval ainsi que le nombre d'USRA et la longueur qui les séparent. Cela permet par exemple de calculer le nombre d'obstacles en aval d'une USRA. En effet, on calcule dans un premier temps, le nombre d'obstacles à proximité immédiate de chaque USRA. Puis, par addition, connaissant tous les USRA en aval, on peut calculer le nombre d'obstacles à l'aval de chaque USRA.

3.3.3. Calculs des indicateurs

A chaque USRA, des indicateurs sont calculés de manière automatisée. Ils sont le résultat de croisements géographiques avec des données du territoire (obstacles, prélèvements, barrages...) et doivent permettre de caractériser la plupart des altérations hydromorphologiques.

Les annexes 1 et 2 listent les indicateurs calculés, les données utilisées et les limites rencontrées.

3.3.3.1. Acquisition des données et standardisation

Les données ont été collectées majoritairement en début d'étude auprès des services compétents de la DREAL et de l'Office de l'eau mais aussi auprès d'autres organismes de chaque territoire.

Il s'agit généralement de données spatialisées directement intégrables dans un logiciel SIG. Elles ont été standardisées afin de pouvoir être intégrées plus facilement dans l'outil de calcul. Cette mise en forme concerne :

- Données mises en format ESRI shapefile
- Données projetées dans le système géographique de référence de chaque DOM
- Noms de certaines colonnes standardisés
- Filtre de certaines données quand une seule partie doit être utilisée
- Fusion de plusieurs sources de données pour n'utiliser qu'un seul fichier

3.3.3.2. Calculs géomatiques

Les calculs des indicateurs ont été entièrement automatisés pour permettre à la fois de relancer les calculs lors d'une mise à jour de données.

Le rapport technique décrit les étapes pour relancer les calculs facilement par un géomaticien ayant les notions de base en PostGIS et PostGreSQL.

Certains calculs peuvent être très longs, liés au nombre d'USRA, à la complexité de l'indicateur et au volume de données à croiser. Ainsi en Guyane, certains indicateurs ont été calculés uniquement sur les USRA de rang de strahler supérieur ou égal à 3.

3.3.3.3. GUYANE : spécificité des calculs pour les petits cours d'eau

Certains indicateurs représentent une pression directe (selon une distance plus ou moins importante à l'USRA). L'indicateur est alors calculé grâce à un croisement avec une zone tampon (ou buffer). D'autres pressions sont indirectes c'est-à-dire qu'elles prennent en compte des pressions à l'amont (et/ou à l'aval). Selon les indicateurs, il faut calculer le bassin versant de chaque USRA et/ou connaître les USRA à l'amont ou l'aval. Dès lors que le réseau est long et très ramifié, les calculs sont exponentiellement longs et fastidieux.

Suite à une validation avec la DEAL Guyane, il a été convenu de ne pas tenir compte des rangs inférieurs à 3 afin d'alléger les temps de traitement. La conséquence est variable selon le type de calcul. Pour les indicateurs analysant la pression sur la continuité amont/aval des USRA, la conséquence est la suivante :

- a) Une matrice sur la continuité amont/aval des cours d'eau a été créée (à l'échelle de l'USRA). Pour chaque USRA, il est possible de connaître la liste de tous les USRA amont sur le drain principal et ses affluents. Compte-tenu de la densité du réseau guyanais (cf. remarque ci-dessus), cette matrice a été créée pour tous les USRA ayant un rang supérieur ou égal à 3.

L'impact est le suivant pour un indicateur tel que l'orpaillage (analyse via la continuité amont/aval) :

- Un orpaillage situé sur une USRA rang 1 n'impactera pas le rang 3 en aval, car la relation n'est pas identifiée dans la matrice.
- Une USRA de rangs 4 ou supérieurs n'est impactée que si l'orpaillage est situé sur une USRA de rangs 3 ou supérieurs.

En résumé pour ce type d'indicateur, il n'a une influence sur l'aval que si la pression est localisée sur une USRA de rang 3 ou supérieur, sinon il a un impact seulement pour l'USRA sur lequel il se situe.

Sont concernés les descripteurs suivant (cf. Annexe 2) : br, br_am, br_av_pr, br_ecret, br_infran, br_pointe, br_usage, d_ob_pr, d_ob_w, ind_prel, orp_am, s_irr, vol_am, vol_us.

- b) Pour les indicateurs analysant la pression sur l'ensemble du bassin versant de l'USRA, l'influence est moindre. La couche des bassins versants est créée en combinant tous les impluviums (bassin versant direct) de chaque USRA via la matrice de continuité amont/aval. Afin de pouvoir remonter à la « source » du cours d'eau puisque les rangs inférieurs ou égaux à 2 ont été retirés, une autre version de l'impluvium de chaque USRA de rang 3 a été créée, afin d'englober la surface des rangs amont retirés.

L'impact est le suivant pour un descripteur tel que le taux d'urbanisation (analyse via la surface du bassin versant) :

- Le taux d'urbanisation d'une USRA de rang 3 est calculé en tenant bien compte de l'amont, car son impluvium a été recalculé afin d'englober les rangs inférieurs amont. Il n'y a donc pas de conséquence pour les USRA de rang 3 ou supérieur.
- Le taux d'urbanisation d'une USRA de rang 0, 1 ou 2 n'est calculé que sur son impluvium, car l'on ne connaît pas son réseau amont, puisqu'il n'est pas identifié dans la matrice amont/aval.

Sont concernés les descripteurs suivant (cf. Annexe 2) : s_urba_bv, s_irr, ind_prelev.

3.3.4. Descripteurs : Mise en classe des indicateurs

Le modèle bayésien n'accepte pas de valeurs continues. En effet, pour que les critères sont croisés entre eux via les tables de probabilités conditionnelles, les indicateurs nécessitent d'être mis en classes. Un indicateur mis en classe et utilisé dans le modèle bayésien est appelé « descripteur ».

La difficulté de cette étape de mise en classe réside dans le choix d'une valeur seuil. De plus, le nombre de classes ne doit pas être trop important car il va conditionner la taille des tables de probabilité conditionnelles ; En effet, lorsque le nombre de modalités est trop important, le remplissage des tables de probabilité devient fastidieux et peu contrôlable.

Les seuils et les modalités des descripteurs/indicateurs ont été établis selon les règles suivantes :

- le descripteur est présent dans SYRAH et adapté au contexte,
- le descripteur est présent dans SYRAH mais pour lequel une adaptation au contexte est nécessaire,
- le descripteur n'est pas présent dans SYRAH, son mode de calcul et ses modalités ont été définis spécifiquement pour le projet

Dans les deux derniers cas, nous nous sommes basés soit sur l'avis des experts locaux, soit sur la méthode de Jenks.

Cette méthode maximise les variances interclasses et minimise les variances intraclasses.

3.3.5. Remplissage des tables de probabilités conditionnelles

Pour remplir les tables de probabilités conditionnelles (TPC), les facteurs de pressions dominants et secondaires et le niveau de précision de la donnée ont été identifiés.

Pour les nœuds enfants (intermédiaires ou finaux), les distributions de probabilités ont été renseignées par des experts en hydromorphologie et hydrobiologie.

La structure des fichiers et de l'outil bayésien sont présentés dans le rapport technique.

Remarque :

- Pour le remplissage des tables, il a parfois été fait abstraction des modalités (faible, fort, moyen, etc...), pour avoir un raisonnement selon un ordre hiérarchique d'altération.
- Plusieurs descripteurs traitent d'une même pression mais ont parfois été évalués de différentes manières (cf. tailles des buffers associés au lit mineur, lit majeur, etc.).

3.3.5.1. Règles de remplissage

Les règles de remplissage adoptées sont les suivantes :

- La totalité de l'échelle de mesure est systématiquement utilisée c'est-à-dire que la 1^{ère} ligne (absence de pression) est toujours associée au risque minimal (qualifié de faible ou très faible selon les cas) et la dernière ligne (présence de toutes les pressions) est toujours associée au risque maximal.
- Les lignes qui ont été remplies les premières correspondent à la présence d'une seule pression. Pour comprendre chaque table, ce sont les premières à consulter car elles permettent d'apprécier le poids de chaque pression et de comparer le poids des pressions entre elles.
- Les lignes suivantes correspondent au cumul de plusieurs pressions et ont été calées dans un second temps en respectant les règles suivantes :
 - Lorsque 3 paramètres sont indépendants et qu'ils ont le même poids, alors la présence simultanée de 2 d'entre eux (3 combinaisons possibles : 1-1-0 ou 0-1-1 ou 1-0-1) aboutit toujours à la même distribution ;
 - Lorsque 3 paramètres sont indépendants et que l'un d'entre eux a un poids plus fort, alors la présence simultanée des 2 pressions les plus faibles est associée à un risque plus faible que lorsque que l'un d'entre eux est combiné au plus fort ;
 - Lorsqu'ils ne sont pas indépendants, ce qui est fréquemment le cas, les distributions conditionnelles ont dû être réfléchies au cas par cas en tenant compte du poids de chacun et de leurs relations.

Les distributions doivent être comparées entre elles selon 2 critères :

- La tendance centrale de la distribution qui indique la classe « moyenne » de risque associée à une combinaison ;
- L'étalement de la distribution qui indique la fiabilité de ces risques (plus la distribution des risques est étalée, moins fiable est le résultat).

Nous avons davantage étalé les distributions pour les combinaisons aberrantes (ex. : forte présence de végétation en berge alors que les pressions sont telles que celle-ci devrait être faible) ou lorsque les bases de données sont supposées moins fiables. Inversement, lorsque le risque associé à une combinaison est a priori bien maîtrisé, une seule classe de risque a parfois été associée à une ligne.

3.3.5.2. Illustration de la méthode de remplissage des tables

Seuls les fonds alluviaux peuvent être colmatés. Et ils le sont plus fortement si le fond est bétonné car cela empêche toute relation nappe-rivière (cf. CL# 1) qu'en la seule présence d'un barrage en aval (dépôts de fines ; cf. CL# 4).

Dans certains cas, le fond de certains tronçons alluviaux peut être colmaté malgré l'absence de barrage et de fond bétonné. Mais cela serait lié à d'autres facteurs que ces deux variables, probablement naturels, si bien que nous considérons qu'il n'y a jamais de colmatage (ou plus exactement de sur-colmatage d'origine anthropique) en l'absence de barrage et de fond bétonné (cf. CL #3).

En théorie, il n'y a aucune raison de bétonner un fond rocheux et les fonds rocheux ne peuvent pas être colmatés. Mais si la combinaison « fond bétonné » en présence d'un « lit rocheux » apparaît, alors nous considérons qu'il y a bien un risque fort de colmatage car la variable « nature lithologique » est probablement moins fiable que la variable « fond bétonné » (cf. CL# 5 et 6). Les fonds bétonnés sont par conséquent toujours fortement colmatés, avec ou sans alluvions (cf. CL#1, 2, 5 et 6).

Tableau 20 : Remplissage d'une table de probabilité

CL #	Nature Lithologique	Fond Bétonné	Barrage aval	Colmatage absent	Colmatage faible	Colmatage fort
1	Alluvions	Oui	Absence	0	0	100
2	Alluvions	Oui	Présence	0	0	100
3	Alluvions	Non	Absence	100	0	0
4	Alluvions	Non	Présence	0	50	50
5	Autres	Oui	Absence	0	0	100
6	Autres	Oui	Présence	0	0	100
7	Autres	Non	Absence	100	0	0
8	Autres	Non	Présence	100	0	0

3.3.5.3. Cas de descripteurs sans donnée

Quelles que soient les données disponibles, le modèle bayésien est le même, ce qui est une force de ce type de modèle. Aussi, il est nécessaire d'attribuer une table de probabilité à chaque descripteur.

Dans le cadre de RHUM, lorsque la donnée est inexistante dans un DOM, mais nécessaire au modèle, la distribution de probabilité peut être donnée à dire d'expert (cf. tableau 21 pour Mayotte). En revanche, lorsque la donnée est disponible, l'outil a quand même besoin de valeur de distribution ; cependant, cette information ne sera pas utilisée. Par défaut, le descripteur dispose donc d'une distribution équiprobable (cf. tableau 21 pour Guadeloupe).

Tableau 21 : Exemple de table d'un descripteur

Ratio de surface irriguée dans le bassin versant	971	976
Absence (<5%)	0.5	0.2
Présence (>=5%)	0.5	0.8

3.3.6. Exécution des calculs d'altération

Le calcul des risques d'altération basé sur le modèle bayésien fonctionne sous l'environnement R⁴ contrairement à SYRAH qui fonctionne avec NETICA⁵. En effet, le maître d'ouvrage avait affirmé sa volonté de se détacher de logiciel propriétaire et de profiter de la souplesse du langage R.

Le rapport technique permet de se familiariser avec l'outil et décrit toutes les étapes de calcul.

⁴ www.r-project.org/

⁵ www.norsys.com/netica.html

3.3.7. Evaluation synthétique et changement d'échelle

3.3.7.1. Méthode de calcul de l'état hydromorphologique global

Le résultat de la modélisation bayésienne permet d'avoir pour chaque USRA et pour chaque paramètre élémentaire, la probabilité d'être dans une des cinq classes suivantes : « Très faible, faible, moyen, Fort, très fort ».

L'état du paramètre de qualité hydromorphologique est défini en retenant la classe la plus probable. Il s'agit de la classe ayant le pourcentage le plus élevé.

La classe d'état des neuf paramètres élémentaires (dix en Guyane) est synthétisée en 3 éléments de qualité : Hydrologie, Continuité, Morphologie.

La règle définie dans l'annexe de l'arrêté ministériel est le suivant :

- Pour chaque paramètre élémentaire : passage de cinq classes à trois classes de risque de pression en associant les classes « très faible et faible » et « fort, très fort ».
- Pondération de chaque paramètre de qualité
- Moyenne pondérée avec un arrondi au chiffre supérieur

Tableau 22 : Résumé des poids relatifs attribués à chaque paramètre élémentaire

Elément de qualité	Paramètre élémentaire		Facteur de pondération (Modèle île)	Facteur de pondération (Modèle Guyane)
HYDROLOGIE	Quantité	Très faible	0.5	0.5
		Faible		
		Moyen		
		Fort		
		Très fort		
	Dynamique	Très faible	0.25	0.25
		Faible		
		Moyen		
		Fort		
		Très fort		
	Nappe	Très faible	0.25	0.25
		Faible		
		Moyen		
		Fort		
		Très fort		
CONTINUITÉ	Latéral	Très faible	0.333	0.25
		Faible		
		Moyen		
		Fort		
		Très fort		
	Sédiment	Très faible	0.333	0.25
		Faible		
		Moyen		
		Fort		
		Très fort		

	Biologique migration	Très faible	0.333	0.25
		Faible		
		Moyen		
		Fort		
		Très fort		
	Biologique proximité	Très faible	-	0.25
		Faible		
		Moyen		
		Fort		
		Très fort		

MORPHOLOGIE	Géométrie Hydraulique	Très faible	0.4	0.4
		Faible		
		Moyen		
		Fort		
		Très fort		
	Structure et substrat du lit	Très faible	0.2	0.2
		Faible		
		Moyen		
		Fort		
		Très fort		
	Rive & mangrove	Très faible	0.4	0.4
		Faible		
		Moyen		
		Fort		
		Très fort		

La dernière étape consiste à agréger les 3 éléments de qualité pour obtenir l'état hydromorphologique global, en 2 classes « Faible, Fort ».

La règle, équivalente à SYRAH est la suivante :

- Si au moins un élément de qualité fait état d'une probabilité de pression et d'altération forte, alors l'état hydromorphologique aura une probabilité d'altération forte.
- Si deux éléments de qualité font état de probabilités moyennes, alors l'état hydromorphologique aura une probabilité d'altération forte.
- Si trois éléments de qualité font état de probabilités faibles, alors l'état hydromorphologique aura une probabilité d'altération faible.
- Si un élément de qualité fait état d'une probabilité moyenne et les deux autres sont faibles, alors l'état hydromorphologique aura une probabilité d'altération faible.

Techniquement, si on attribue à « Faible, Moyen, Fort », les notes « 1, 2, 3 » et qu'on additionne les notes des éléments de qualité, la somme doit être inférieure ou égale à 4 pour obtenir un état faiblement altéré, sinon il sera fort.

Les intitulés des niveaux de risque d'altération (ex. : faible, moyen, fort...) ne doivent pas toujours être considérés au sens littéral strict. Un impact qualifié de « moyen » pourraient par exemple être jugé comme important dans certains cas, ou inversement, mais il est délicat de déterminer l'adjectif le plus approprié. Il faut garder à l'esprit que ces termes ont surtout pour objectif d'exprimer l'ordre hiérarchique d'altération

3.3.7.2. Changement d'échelle d'analyse (tronçon, cours d'eau et masse d'eau)

L'agrégation des résultats des USRA aux tronçons hydromorphologiques, aux cours d'eau BD CARTHAGE et masses d'eau est obtenue en fonction d'une moyenne pondérée par la longueur de l'unité spatiale inférieure.

Principe de calcul pour les tronçons hydromorphologiques :

Chaque tronçon est composé d'une ou plusieurs USRA. Ses valeurs de probabilité correspondent à la moyenne des valeurs de probabilité des classes d'USRA qui le compose. Cette moyenne est pondérée par la longueur des USRA au sein du tronçon. La classe retenue est celle qui a la probabilité la plus élevée.

La démarche à l'échelle des cours d'eau ou des masses d'eau est identique. Les valeurs de probabilité de chaque classe pour un cours d'eau ou une masse d'eau, correspondent à la moyenne pondérée des valeurs des USRA.

Cette méthode suppose que le poids d'une USRA sur un tronçon ou une masse d'eau est fonction de sa longueur. Ainsi une USRA représentant un fort pourcentage du linéaire de la masse d'eau a une plus grande importance sur le degré d'altération de la masse d'eau, qu'une USRA plus courte.

Etant donné que les USRA ayant des rangs de strahler élevés sont plus longs, les USRA en aval des masses d'eau ou des cours d'eau ont à priori davantage d'impact.

Néanmoins, dans le cas de longues masses d'eau, l'impact d'une seule USRA est faible ; il est possible qu'une masse d'eau soit classée en risque faible alors qu'une ou plusieurs USRA ont un risque fort. Il est donc important de faire des allers-retours entre les données USRA et Masses d'eau. On peut également s'interroger :

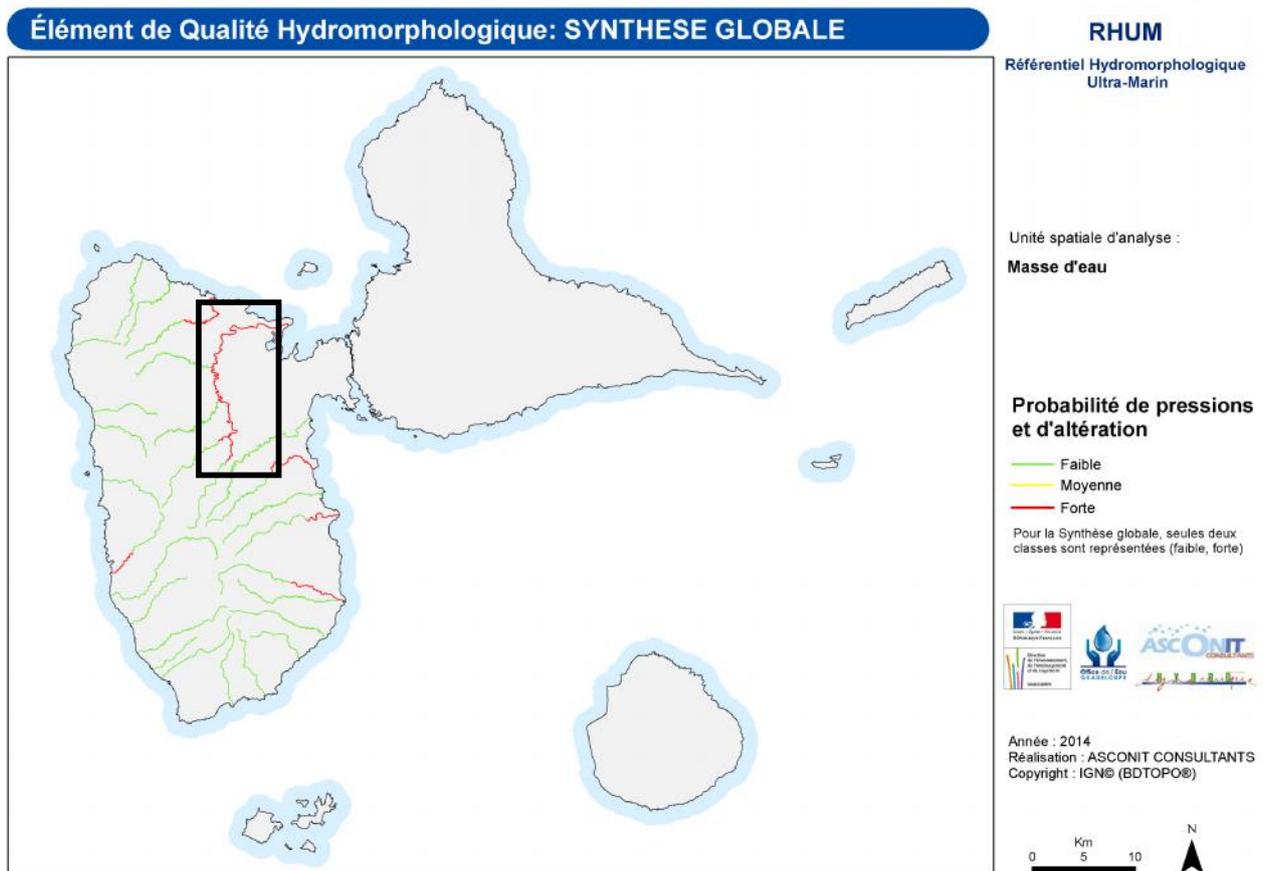
- sur les règles d'agrégation (la moyenne pondérée est-elle la règle adéquate ?)
- sur le découpage des masses d'eau qui parfois incluent une partie ou la totalité des affluents (cf Mayotte) et n'ont pas toujours été découpés selon des critères hydromorphologiques.

3.4. Lecture des résultats

Ce chapitre propose une méthodologie pour apprécier la note de synthèse globale pour l'île de la Guadeloupe. Celle-ci consiste à jongler entre les différents niveaux d'échelle, la construction des descripteurs à partir des données brutes, la modélisation des paramètres élémentaires à partir des descripteurs et les règles de synthèse des paramètres élémentaires en éléments de qualité.

3.4.1. Synthèse globale

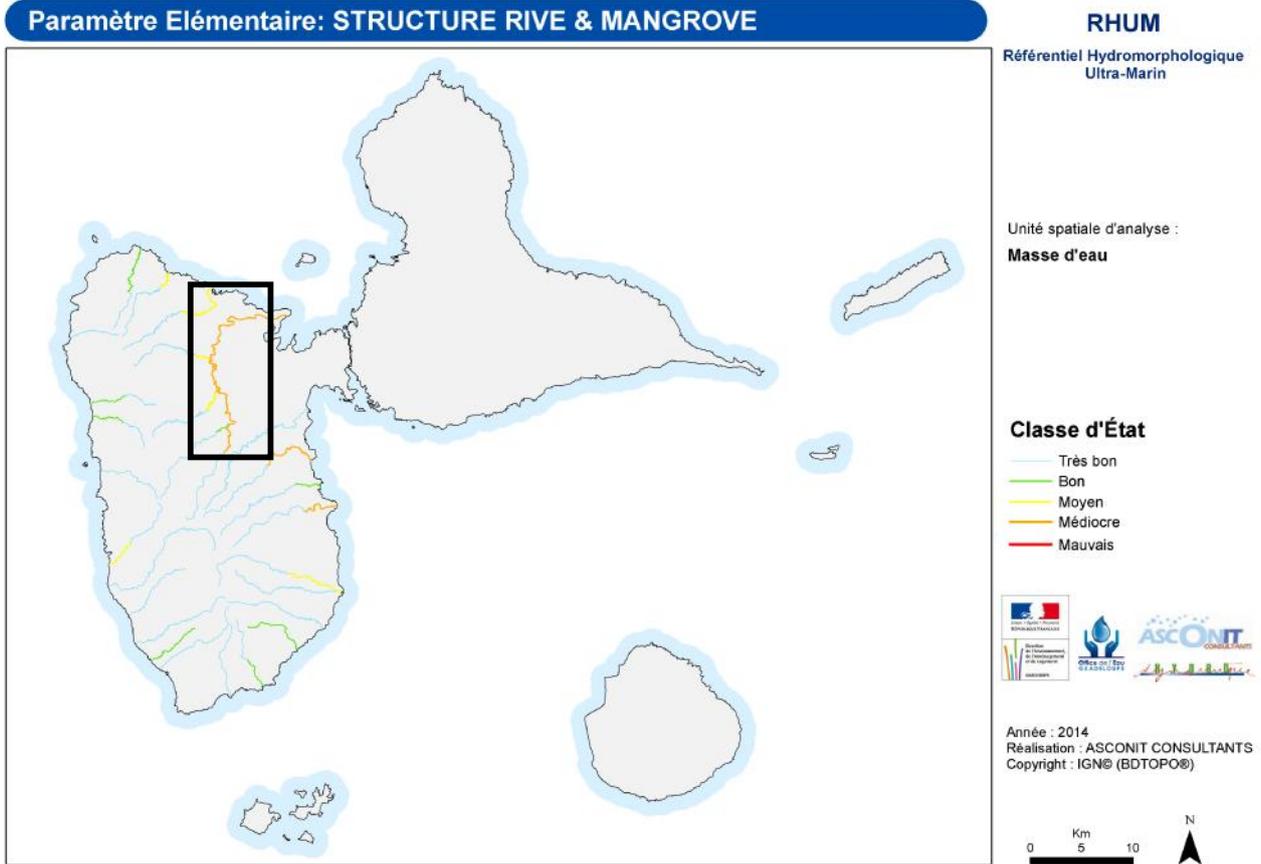
La synthèse globale met en évidence un risque d'altération et de pression hydromorphologique forte sur une grande partie du linéaire de la Grande Rivière à Goyave (cf. encadré noir ci-dessous).



3.4.2. Probabilités d'altération à l'échelle des masses d'eau

L'analyse des résultats pour chaque élément de qualité met en évidence via l'analyse cartographique que les paramètres élémentaires déclassants sont :

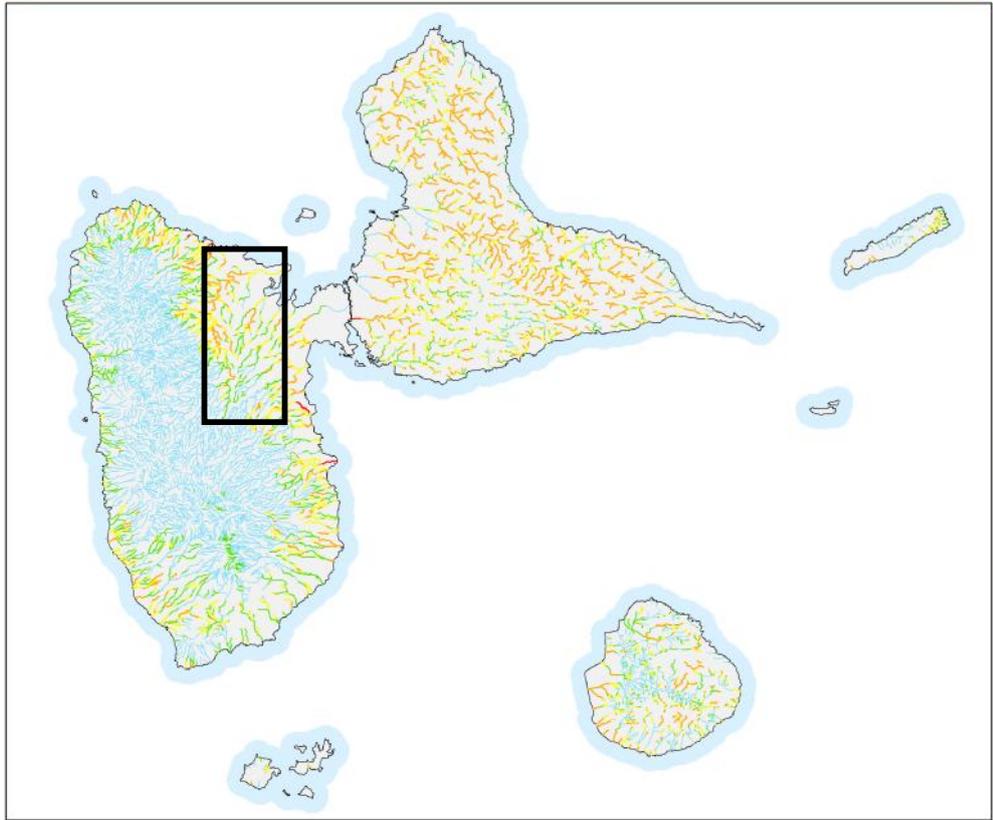
- la quantité pour l'élément de qualité « hydrologie »,
- la structure de la rive et de la mangrove pour l'élément de qualité « morphologie ».



3.4.3. Probabilités d'altération à l'échelle des USRA

A l'échelle de l'USRA, le paramètre élémentaire « structure de la rive et de la mangrove » montre une certaine variabilité des états sur la Grande Rivière à Goyave (état de « très bon » à « médiocre »).

Paramètre Élémentaire: STRUCTURE RIVE & MANGROVE



RHUM
Référentiel Hydromorphologique
Ultra-Marin

Unité spatiale d'analyse :
USRA

Classe d'État

- Très bon
- Bon
- Moyen
- Médiocre
- Mauvais



Année : 2014
Réalisation : ASCONIT CONSULTANTS
Copyright : IGN® (BDTOPO®)

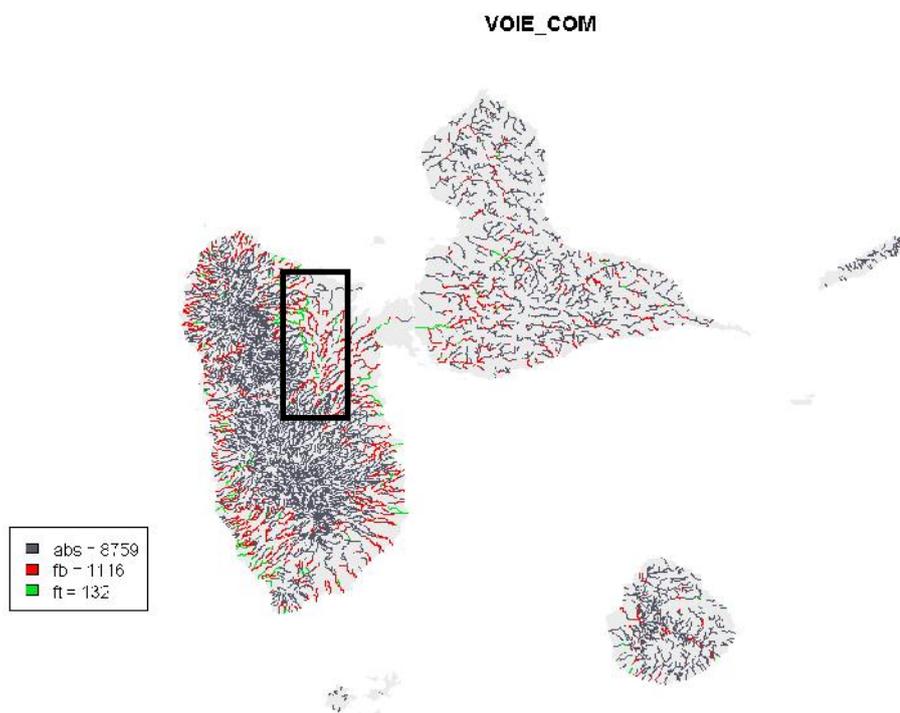


3.4.4. Les données brutes à l'échelle des USRA

L'aperçu des modalités des indicateurs et/ou descripteurs permet de mieux comprendre et analyser les résultats au niveau des USRA.

Pour le paramètre élémentaire « structure de la rive et de la mangrove », en analysant les cartes des descripteurs, on s'aperçoit que les « voies de communication » sont en partie responsables de l'état médiocre observé à l'échelle des USRA.

La carte thématique met en avant la cohérence entre cette information et la réalité, via la connaissance du territoire. La forte empreinte de cet indicateur se trouve en général proche des embouchures et est inexistante en particulier au niveau du parc national de la Guadeloupe.



3.5. Pistes d'amélioration

3.5.1. Qualité des données brutes

Notre démarche a été de fournir des modèles généraux aux DOM et inspirés largement par des travaux déjà réalisés en métropole. Or l'acquisition des données reste encore incomplète pour certains DOM et suivant les descripteurs.

Les données sont parfois être peu exhaustives (ex : localisation des surfaces irriguées en Guadeloupe), ou absentes (ex. le descripteur « curage » pour la Guadeloupe). Le manque d'homogénéité spatiale contribue ainsi à une appréciation partielle de la variabilité des pressions et des altérations potentielles à l'échelle de chaque DOM.

Compte-tenu des difficultés rencontrées au cours du projet pour obtenir certaines données, la consolidation des données brutes est une piste de fiabilisation des résultats à poursuivre.

Les annexes 1 et 2 donnent descripteur par descripteur des pistes d'optimisation pour améliorer la qualité des données et des indicateurs qui en découlent.

L'incertitude sur la « donnée DOM » n'a pas fait l'objet d'une prise en compte spécifique dans les facteurs de pondération au niveau des règles d'agrégation pour obtenir une note de synthèse globale. En effet, les pondérations attribuées à chaque paramètre élémentaire pour la synthèse en

élément de qualité ont été identiques à ceux utilisés dans SYRAH. Une remise en question de ces facteurs de pondération peut faire l'objet d'une première amélioration.

3.5.2. *Prise en compte de nouveaux descripteurs*

L'amélioration des arbres bayésiens résultent également dans l'acquisition de nouvelles données et la définition de nouveaux indicateurs.

Par exemple, pour évaluer l'érosion des berges, il aurait été intéressant de connaître pour chaque USRA la composition des berges par type de végétation (en fonction du type racinaire...). En effet, l'absence de végétation ou les cultures de bananes rendent les berges instables et pourraient dans certain cas favoriser le colmatage.

3.5.3. *Spécificités des rivières intermittentes*

Le réseau hydrologique des îles tropicales est dense et se caractérise par de nombreuses rivières intermittentes (dites ravines). Ces rivières sont peu ou pas exploitées suivant leur localisation à l'échelle de l'île, à l'exception de celles de l'île de Grande Terre en Guadeloupe qui permettent de maintenir une agriculture vivrière localement.

Les rivières intermittentes ont un fonctionnement bien distinct des rivières pérennes autant par les espèces qui les colonisent que le fonctionnement des processus hydromorphologiques. L'état des recherches en France et dans le monde sur ces écosystèmes aquatiques en est à son balbutiement, laissant un vide autant scientifique que juridique à combler⁶.

Dans cette étude, les altérations hydromorphologiques des ravines ont donc été évaluées à l'échelle de l'USRA selon la même modélisation que les cours d'eau permanents. Il est nécessaire d'avoir un regard critique sur les résultats des ravines.

3.5.4. *Ajustement des modèles aux données existantes*

Les processus hydromorphologiques intégrés dans les arbres bayésiens (érosion, colmatage, rectification..) identifiés comme « nœuds intermédiaires » ont été décrits suivant les données disponibles et les incertitudes associées. Il en résulte des simplifications.

Par exemple, en ce qui concerne la rectification du lit, deux descripteurs (« pente » et « sinuosité ») ont été pris en compte. Ces deux descripteurs ne suffisent pas à la caractérisation de la rectification. En effet, l'urbanisation et l'agriculture sont deux facteurs de contrôle (pression) que l'on peut prendre en compte, car les cours d'eau en milieux agricole et urbain sont souvent rectifiés. On peut intégrer d'autres aménagements tels que les digues, le bâti... Mais il devient alors difficile de définir des seuils de pression, puis des risques d'altération, lorsque ceux-ci se cumulent sur un même tronçon. Nous avons considéré que la variable de réponse du cours d'eau, c'est à dire sa sinuosité (ou à l'inverse, sa rectitude), pour évaluer le degré de rectification, associé à la pente comme facteur de pondération du risque (tronçons pentus naturellement rectilignes).

⁶ <http://www.irstea.fr/toutes-les-actualites/departement-eaux/eau-rivieres-intermittentes-biodiversite>

http://www.eaurmc.fr/espace-dinformation/guides-acteurs-de-leau/notes-du-secretariat-technique-du-sdage.html?eID=dam_frontend_push&docID=3171

3.5.5. Limites de la mise en classe des descripteurs/indicateurs

La mise en classe des descripteurs a été faite soit à dire d'expert soit selon une méthode plus arbitraire. Or, certains seuils de classification ont été particulièrement difficiles à définir. Par exemple, le seuil qui caractérise l'impact des prélèvements sur les USRA a été fixé à 25 000 m³/km² de bassin versant. Cet indicateur (ind_prelev) est ensuite croisé avec le zonage sur les caractéristiques des débits d'étiage (etiage). Ce seuil n'a pas trouvé une réponse scientifique et pourrait être ajusté d'un DOM à un autre.

Le retour d'expérience et l'acquisition des connaissances en hydromorphologie pour les cours d'eau tropicaux insulaires et de Guyane devraient à terme permettre une meilleure définition.

3.5.6. Nombre de classes à revoir : cas de la franchissabilité des barrages

Certains indicateurs une fois mis en classe apportent peu de nuance et ne reflètent pas toute la diversité de la réalité. Inversement, le nombre de classes d'un descripteur ne doit pas être trop grand car il rend très difficile le remplissage des tables de probabilités conditionnelles. Les classes doivent représenter la variabilité du territoire et les données doivent mettre en évidence cette variabilité.

On retiendra l'exemple du descripteur « br_infran » représentant la franchissabilité des barrages. Chaque barrage est caractérisé par une variable binaire franchissable/infranchissable. Cependant, il serait intéressant d'apporter de la nuance :

- Barrière totale : obstacle total à la migration (équivalent en discrétisation bayésienne : FORT)
- Barrière partielle à impact majeur : obstacle infranchissable pour une partie du temps et/ou une partie de la population (équivalent en discrétisation bayésienne : MOYEN)
- Barrière partielle à impact significatif : obstacle franchissable une grande partie du temps pour la majeure partie de la population MAIS une fraction significative de la population reste impactée (équivalent en discrétisation bayésienne : FAIBLE)
- Barrière franchissable à impact limité : obstacle franchissable par la majorité de la population sans retard significatif (équivalent en discrétisation bayésienne : SANS IMPACT)

L'agrégation à l'USRA pourra être vue selon la méthode utilisée pour la production d'un Indicateur de fragmentation théorique des milieux aquatiques (Baudoin & Kreutzenberger, 2012).

Sur l'île de la Réunion, grâce à l'étude récente de continuité écologique⁷ cette nuance a été apportée pour chaque obstacle.

3.5.7. Ajustement des règles d'agrégation

Les règles d'agrégation aux tronçons et aux masses d'eau sont celles de SYRAH. Elles peuvent être remises en question en fonction du retour des experts sur les résultats produits.

Il a été observé que :

- la moyenne entraîne une perte d'information et a tendance à lisser les résultats

⁷ Evaluation de la continuité écologique des 13 rivières pérennes de la réunion - proposition d'un plan d'action pour reconquérir cette continuité (2011)

- à contrario, la note la plus déclassante risque de mettre à tort des notes médiocres à l'ensemble d'une masse d'eau alors qu'un seul impact important mais très localisé peut être constaté.

3.5.8. Concertation autour des modèles et des tables de probabilités conditionnelles

Le remplissage des tables de probabilités a été fait par des experts métier, puis soumis aux experts locaux. La difficulté de prise en main de l'outil et la distance entre les membres du projet ont limité les interactions.

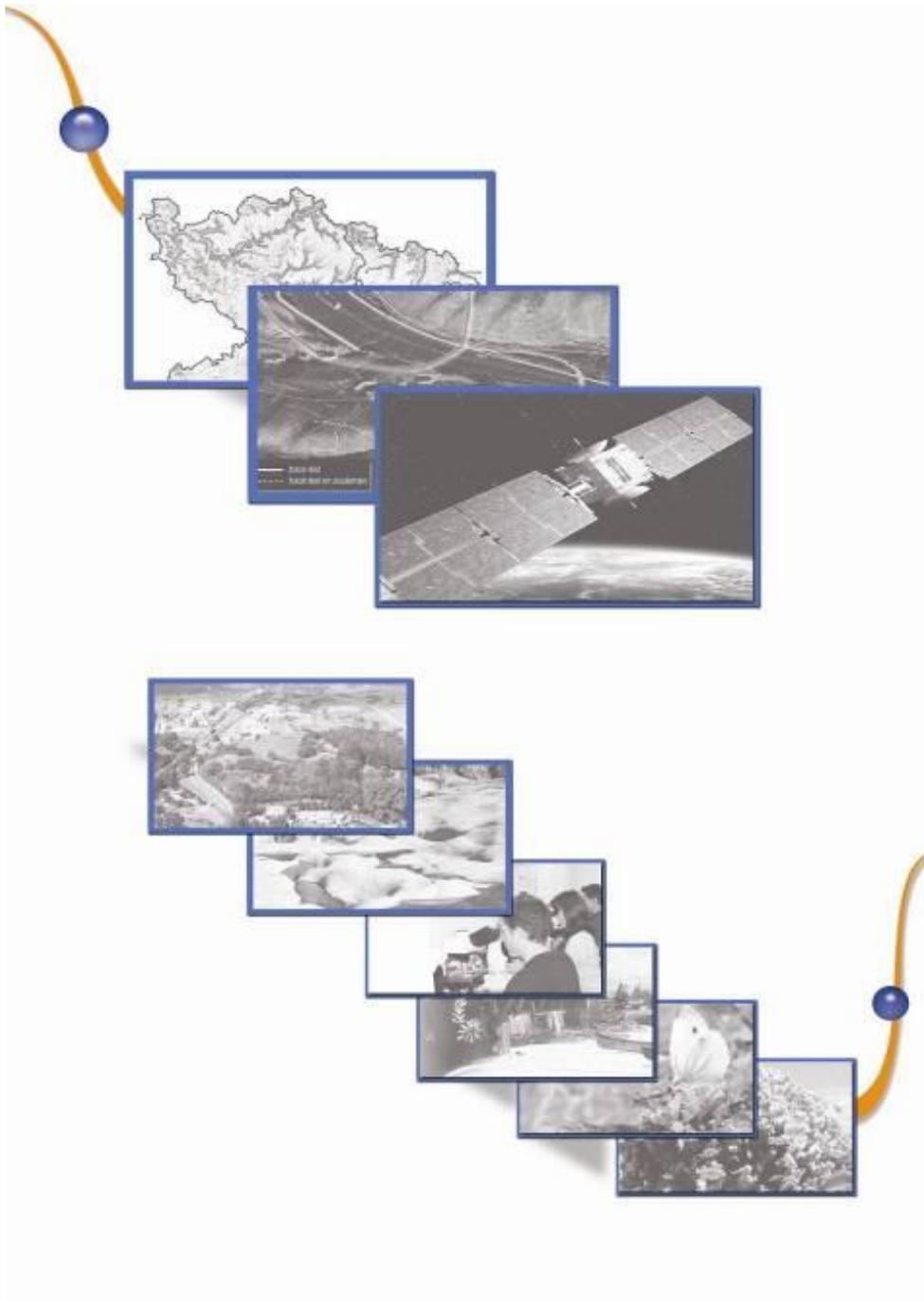
Afin de faire émerger un consensus autour de la démarche RHUM et du travail de modélisation, des ateliers pourraient être organisés pour revenir sur les règles adoptées afin d'améliorer les distributions de probabilité.

3.5.9. Formation des gestionnaires

La démarche RHUM n'est pas simple à s'approprier. De plus, les outils développés peuvent être difficiles à prendre en main pour une personne peu initiée. Aussi, la connaissance sur les territoires s'enrichit. Certaines données sont mises à jour régulièrement. D'autres ne sont pas disponibles à ce jour mais le seront dans un futur proche. Pour être autonome, une formation auprès des gestionnaires est recommandée. Les différents points abordés pourraient être :

- La démarche SYRAH/RHUM : sectorisation du réseau hydrologique, description des tronçons, modélisation des risques d'altération
- Les calculs d'indicateurs/descripteurs
- Le paramétrage du modèle d'altération et le remplissage des tables de probabilité
- Les calculs de risques d'altération et la cartographie des résultats

4. Annexes



4.1. Caractérisation de la largeur relative des fonds de vallée alluviaux

Les tableaux suivants présentent les critères établis pour distinguer :

- les tronçons caractérisés par un fond alluvial étroit voire inexistant (de largeur généralement inférieure à 2 fois la largeur moyenne théorique du lit mineur) ;
- les tronçons caractérisés par un fond alluvial modéré à large (de largeur généralement supérieure ou égale à 2 fois la largeur moyenne théorique du lit mineur).

Les critères peuvent différer selon les DOM, les HER et le rang de chaque tronçon.

4.1.1. Guadeloupe

RANG	BASSE TERRE		GRANDE TERRE et AUTRES ÎLES SECHES	
	étroit	modéré à large	étroit	modéré à large
0	SUB=roches OU SUB=alluvions AVEC pente > 6%	SUB=alluvions AVEC pente ≤ 6%	SUB="plio-pléistocène" AVEC pente > 1,5%	SUB="4aire actuel et récent" OU SUB="4aire actuel et récent" AVEC pente ≤ 1.5%
1	SUB=roches OU SUB=alluvions AVEC pente > 6%	SUB=alluvions AVEC pente ≤ 6%	SUB="plio-pléistocène" AVEC pente > 1,5%	SUB="4aire actuel et récent" OU SUB="4aire actuel et récent" AVEC pente ≤ 1.5%
2	SUB=roches OU SUB=alluvions AVEC pente > 6%	SUB=alluvions AVEC pente ≤ 6%	SUB="plio-pléistocène" AVEC pente > 1%	SUB="4aire actuel et récent" OU SUB="4aire actuel et récent" AVEC pente ≤ 1%
3	SUB=roches OU SUB=alluvions AVEC pente > 4%	SUB=alluvions AVEC pente ≤ 4%	SUB=roches AVEC pente > 0.7%	SUB=alluvions OU SUB=roches AVEC pente ≤ 0,7%
4	SUB=roches OU SUB=alluvions AVEC pente > 4%	SUB=alluvions AVEC pente ≤ 4%	SUB=roches AVEC pente > 0.7%	SUB=alluvions OU SUB=roches AVEC pente ≤ 0,7%
5	—	tous	—	—

4.1.2. Martinique

RANG	PITONS DU NORD		PLAINE DU LAMENTIN		MORNES DU SUD	
	étroit	modéré à large	étroit	modéré à large	étroit	modéré à large
0	SUB=roches OU SUB=alluvions AVEC pente > 6%	SUB=alluvions AVEC pente ≤ 6%	SUB=roches OU SUB=alluvions AVEC pente > 4%	SUB=alluvions AVEC pente ≤ 4%	SUB=roches AVEC pente > 1,5% OU SUB=alluvions AVEC pente > 5%	SUB=roches AVEC pente ≤ 1,5% OU SUB=alluvions AVEC pente ≤ 5%

1	SUB=roches OU SUB=alluvions AVEC pente > 6%	SUB=alluvions AVEC pente ≤ 6%	SUB=roches OU SUB=alluvions AVEC pente > 4%	SUB=alluvions AVEC pente ≤ 4%	SUB=roches AVEC pente > 1,5% OU SUB=alluvions AVEC pente > 4%	SUB=roches AVEC pente ≤ 1,5% OU SUB=alluvions AVEC pente ≤ 4%
2	SUB=roches OU SUB=alluvions AVEC pente > 3%	SUB=alluvions AVEC pente ≤ 3%	–	tous	SUB=roches AVEC pente > 1% OU SUB=alluvions AVEC pente > 3%	SUB=roches AVEC pente ≤ 1% OU SUB=alluvions AVEC pente ≤ 3%
3	SUB=roches OU SUB=alluvions AVEC pente > 3%	SUB=alluvions AVEC pente ≤ 3%	–	tous	SUB=roches AVEC pente > 1%	SUB=roches AVEC pente ≤ 1% OU SUB=alluvions
4	SUB=roches OU SUB=alluvions AVEC pente > 2,5%	SUB=alluvions AVEC pente ≤ 2,5%	–	tous	pente >1%	pente <=1%
5	–	–	–	tous	–	–

4.1.3. Guyane

RANG	PLAINE LITTORALE		BOUCLIER GUYANAIS	
	étroit	modéré à large	étroit	modéré à large
0	SUB=alluvions AVEC pente > 5% OU SUB=roches AVEC pente > 1%	SUB=alluvions AVEC pente ≤ 5% OU SUB=roches AVEC pente ≤ 1%	SUB=alluvions AVEC pente > 3 % OU SUB=roches AVEC pente > 1 %	SUB=alluvions AVEC pente ≤ 3% OU SUB=roches AVEC pente ≤ 1%
1	SUB=alluvions AVEC pente > 5% OU SUB=roches AVEC pente > 1%	SUB=alluvions AVEC pente ≤ 5% OU SUB=roches AVEC pente ≤ 1%	SUB=alluvions AVEC pente > 3 % OU SUB=roches AVEC pente > 1 %	SUB=alluvions AVEC pente ≤ 3% OU SUB=roches AVEC pente ≤ 1%
2	SUB=alluvions AVEC pente > 1% OU SUB=roches AVEC pente > 0,3%	SUB=alluvions AVEC pente ≤ 1% OU SUB=roches AVEC pente ≤ 0,3%	SUB=alluvions AVEC pente > 2% OU SUB=roches AVEC pente > 1 %	SUB=alluvions AVEC pente ≤ 2% OU SUB=roches AVEC pente ≤ 1%
3	SUB=roches AVEC pente > 0,1%	SUB=alluvions OU SUB=roches AVEC pente ≤ 0,1%	SUB=roches AVEC pente > 1%	SUB=alluvions OU SUB=roches AVEC pente ≤ 1%
4	–	tous	SUB=roches AVEC pente > 0,2%	SUB=alluvions OU SUB=roches AVEC pente ≤ 0,2%
5	–	tous	SUB=roches AVEC pente > 0,1%	SUB=alluvions OU SUB=roches AVEC pente ≤ 0,1%
6	–	tous	SUB=roches AVEC pente > 0,05%	SUB=alluvions OU SUB=roches AVEC pente ≤ 0,05%

7	_	tous	SUB=roches	SUB=alluvions
8	_	tous	SUB=roches	SUB=alluvions

4.1.4. Réunion

TOUTES HER				
RANG	étroit		modéré à large	
0	SUB=roches		SUB=alluvions	
1	SUB=roches OU SUB=alluvions AVEC pente > 7%		SUB=alluvions AVEC pente ≤ 7%	
2	SUB=roches OU SUB=alluvions AVEC pente > 7%		SUB=alluvions AVEC pente ≤ 7%	
3	SUB=roches OU SUB=alluvions AVEC pente > 6%		SUB=alluvions AVEC pente ≤ 6%	
4	SUB=roches OU SUB=alluvions AVEC pente > 6%		SUB=alluvions AVEC pente ≤ 6%	

Spécifiquement à ce DOM il existe un fichier Shape qui contient 16 tronçons en exception. Pour ces tronçons la classe d'encaissement a été corrigée à dire d'expert par rapport aux règles précisées dans ce tableau. L'analyse visuelle du résultat mettait en évidence des erreurs grossières pour ces tronçons. Il n'a pas été possible d'améliorer ce résultat sans le dégrader par ailleurs. Nous avons choisi de créer une couche d'exception.

4.1.5. Mayotte

TOUTES HER				
RANG	étroit		modéré à large	
0	pente >2%		pente ≤ 2%	
1	pente >2%		pente ≤ 2%	
2	pente >4%		pente ≤ 4%	
3	pente > 3.5% OU pente ≤ 3.5% AVEC lg_buf5m < 2*lg_buf1m		pente ≤ 1 % OU pente ≤ 3.5% AVEC % lg_buf5m 2*lg_buf1m	
4	pente > 1% AVEC lg_buf10m < 2*lg_buf1m		pente ≤ 1% OU pente > 1% AVEC lg_buf10m 2*lg_buf1m	

4.2. Hiérarchisation des confluences majeures

Lorsque deux confluences majeures sont proches et occasionnent un tronçon plus court que la longueur minimale retenue, nous avons établi quelques règles pour retenir l'une des deux confluences, afin d'éviter une sur-sectorisation.

- Identification des confluences trop proches

On attribue à chaque point de confluence le rang de strahler du tronçon aval. Puis, on regarde deux à deux les confluences qui sont à la fois sur le même linéaire et dont la distance euclidienne ne respecte pas $0.85 * L_{min}$ (Longueur minimale des tronçons). Le coefficient appliqué (0.85) permet de palier l'erreur de prendre une distance euclidienne (vol d'oiseau) plutôt qu'une distance réseau. La prise en compte de la longueur réelle des tronçons complexifie le développement du script. Si malgré ce coefficient certaines longueurs ne sont pas respectées, les tronçons concernés seront identifiés à la fin de l'étape de sectorisation, car une vérification automatique de toutes les longueurs réelles de tronçons est faite.

- Règles de rétrogradation de confluences majeures

« ratio_débit » correspond au pourcentage de longueur cumulée à l'amont de l'affluent / pourcentage de la longueur cumulée à l'amont du cours d'eau principal.

A et B désigne des points de confluences, A étant toujours en amont de B.

Cas 1 : Si A est une confluence liée à un changement de rang et B une confluence par comparaison du linéaire cumulé amont, alors on dégrade B en confluence mineure.

Cas 2 : Si A et B sont des confluences majeures détectées en fonction du linéaire cumulé amont, sans qu'aucune n'entraîne de changement de rang, et que le ratio_debit de A $> 1.66 \times$ ratio_debit de B, alors on considère que A apporte davantage de modifications hydromorphologiques et on dégrade B en confluence mineure.

Cas 3 : Si A et B sont des confluences majeures détectées en fonction du linéaire cumulé amont, sans qu'aucune n'entraîne de changement de rang, et que le ratio_debit de A $< 1.66 \times$ ratio_debit de B, alors on dégrade A en confluence mineure.

Cas 4 : quelle que soit la distance avec les autres confluences, si une confluence majeure identifiée par comparaison du linéaire cumulé amont est située à une distance inférieure à $0.85 * L_{min}$ d'un point de fin naturelle de tronçon, tels qu'un exutoire à l'océan, la confluence avec un rang supérieur, alors celle-ci est rétrogradée en confluence mineure.

Cas 5 : Deux affluents de même rang confluent au même point avec le cours d'eau principal. Le script classe cette confluence comme majeure car il considère que les deux affluents occasionnent un changement de rang. Il analyse à tort la confluence entre les deux affluents. Il faut contrôler individuellement s'il s'agit d'une vraie « confluence de rang ». Ce cas de figure ne concerne qu'une minorité de confluences.

Cas 6 : Quelle que soit la distance avec les autres confluences, si une confluence majeure identifiée par comparaison du linéaire cumulé amont est située à une distance inférieure à $0.85 * L_{min}$ d'un point de début naturel de tronçon, alors celle-ci est rétrogradée en confluence mineure.

Cette « hiérarchisation » des confluences majeures fait l'objet d'un script POSTGIS.