

Document public

Définition d'indicateurs géomorphologiques pour la caractérisation des cours d'eau de Martinique

Rapport final

BRGM/RP-67524-FR
Février 2018

A. Brugeron, A.-L. Taïlamé, L. Nacimento

Vérificateur :	Approbateur :
Nom : D. Allier Fonction : Responsable de programme scientifique RH04 Date : 08/01/2018 Signature : 	Nom : B. Vittecoq Fonction : Directeur régional Martinique Date : 02/02/2018 Signature : 

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



Mots-clés : Cours d'eau, Modèle Numérique de Terrain (MNT), géomorphologie, talweg, ordre strahler, indice de position topographique (TPI), indice topographique d'humidité du sol (TWI), Martinique.

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

Brugeron A., Taïlamé A.-L., Nacimento L. (2018) – Définition d'indicateurs géomorphologiques pour la caractérisation des cours d'eau de Martinique Rapport final. BRGM/RP-67524-FR, 47 p., 30 ill., 6 tabl., 2 ann.

Synthèse

La loi sur l'eau impose que toute activité, installation ou aménagement susceptible d'impacter un cours d'eau soit soumis à déclaration ou autorisation administrative. Il importe donc de bien définir ce qu'est un cours d'eau et de le différencier d'une ravine. La définition jurisprudentielle d'un cours d'eau, selon la circulaire du 2 novembre 2005, repose sur trois critères cumulatifs obligatoires : (1) la présence et permanence d'un lit naturel à l'origine, (2) la permanence d'un débit suffisant une majeure partie de l'année et (3) l'alimentation par une source.

En Martinique, l'arrêté préfectoral du 8 décembre 2011 classe un tronçon hydrographique selon un caractère permanent ou temporaire, suite au développement interne de la DEAL d'une méthode dite « géométrique » basée sur l'étude de la BD Carthage et de la BD Topo (©IGN). Ce classement a connu des contestations, c'est pourquoi le BRGM a été sollicité par la DEAL dans le but (1) de développer de nouveaux indicateurs qui permettront d'améliorer la définition des cours d'eau et (2) de pouvoir justifier ce classement par une méthodologie détaillée.

L'approche méthodologique innovante développée correspond à un croisement SIG des quatre critères suivants : (i) la classification Strahler, (ii) les pentes au droit des talwegs, (iii) l'indice de position topographique (TPI) et (iv) l'indice d'humidité du sol (TWI). La comparaison de cette approche géomatique multicritère avec les observations issues des reconnaissances de terrain sur quatre bassins versants du sud de la Martinique a fourni des paramètres de calages permettant de confirmer ou infirmer certaines hypothèses prises sur des classes de valeurs. Il a ainsi été possible d'augmenter le niveau de fiabilité d'un point de vue probabiliste.

Les premiers résultats sont très satisfaisants et permettent de proposer une première extrapolation à l'ensemble des tronçons de talwegs de la Martinique. Cette extrapolation met en exergue les talwegs très probablement systématiquement à sec ou en eau par intermittence et les distingue de ceux considérés comme étant le lieu d'un écoulement de surface pérenne.

Il ne s'agit pas encore d'une cartographie des cours d'eau pérennes et intermittents car, au regard de l'importante hétérogénéité climatique, pédologique, géologique et hydrogéologique qui règne sur l'île (notamment entre le Nord et le Sud), cette approche multicritère doit être complétée pour être extrapolée sur l'ensemble de l'île.

Il apparaît donc désormais indispensable :

- de réaliser de nouvelles reconnaissances de terrain, notamment dans le nord de l'île, pour renforcer la robustesse des valeurs seuils choisies pour les quatre critères identifiés (en exploitant éventuellement l'imagerie infrarouge dans les secteurs à accès limité) ;
- d'ajuster les valeurs seuils de ces critères, pour répondre à des spécificités non rencontrées dans la moitié Sud de l'île.

De plus, cette approche exploratoire à partir d'indices géomorphologiques (TPI & TWI) pourrait être complétée en testant de nouveaux paramètres d'entrée tels que la perméabilité des sols traversés par les talwegs ou l'hétérogénéité spatiale des précipitations efficaces.

Il n'est pas exclu que cette approche multicritère envisagée jusqu'alors sur l'ensemble de l'île ne soit à mener en deux fois (moitié Nord et moitié Sud), avec des classes de valeurs pour chaque critère considéré adaptées à ces deux contextes bien différents.

Sommaire

1. Contexte et objectif	9
2. Inventaire des données utilisées et choix des critères géomorphologiques....	11
2.1. MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN DU RGE ALTI®.....	11
2.2. CRITÈRE 1 : DÉTERMINATION ET CARACTÉRISATION DU RÉSEAU DE TALWEGS SELON LES ORDRES STRAHLER	13
2.2.1. Prétraitement réalisé sur le MNT au pas de 1 m	13
2.2.2. Etapes du calcul du réseau de talwegs à partir du MNT 1m.....	13
2.2.3. Classification des talwegs selon les ordres Strahler.....	14
2.3. CRITÈRE 2 : CLASSIFICATION DES TALWEGS SELON LES PENTES TIRÉES DU MNT 1 M.....	16
2.4. CRITÈRE 3 : INDICE DE POSITION TOPOGRAPHIQUE (TPI POUR TOPOGRAPHIC POSITION INDEX).....	17
2.4.1. Principe.....	17
2.4.2. Calcul réalisé sur la Martinique	19
2.5. CRITÈRE 4 : INDICE TOPOGRAPHIQUE D'HUMIDITÉ DU SOL (TWI POUR TOPOGRAPHIC WETNESS INDEX)	21
2.5.1. Principe.....	21
2.5.2. Calcul réalisé sur la Martinique	22
3. Calage des critères géomorphologiques par des reconnaissances de terrain 25	
3.1. RECONNAISSANCE TERRAIN MENÉES EN MAI ET JUIN 2017.....	25
3.2. COMPARAISON DES QUATRE CRITÈRES DE L'APPROCHE SIG AVEC LES OBSERVATIONS TERRAIN	27
3.2.1. Comparaison ordre Strahler du tronçon de talweg vs type d'écoulement observé sur le cours d'eau réel.....	28
3.2.2. Comparaison pente du tronçon de talweg vs type d'écoulement observé	30
3.2.3. Comparaison valeurs de l'indice de position topographique TPI vs type d'écoulement observé	32
3.2.4. Comparaison valeurs de l'indice topographique d'humidité TWI vs type d'écoulement observé	34
3.3. CONCLUSIONS SUR LE PARAMÉTRAGE DE L'APPROCHE SIG	37
3.3.1. Mode d'affectation de la note finale par tronçons de talweg	37
3.3.2. Validation sur les quatre bassins visités.....	38
4. Résultats de l'analyse géomorphologique multicritère	41
4.1. EXTRAPOLATION À L'ECHELLE DE LA MARTINIQUE	41

4.2. DISCUSSIONS ET PRÉCONISATIONS	42
5. Conclusion	45
6. Bibliographie	47

Liste des illustrations

Illustration 1 – Modèle Numérique de Terrain de la Martinique au pas de 1 m.....	12
Illustration 2 – Profil d'une cuvette avant et après le remplissage (outil « Remplissage » d'ArcGIS)	13
Illustration 3 – Réseau de talwags théoriques calculés à partir du MNT 1m	14
Illustration 4 – Méthode de hiérarchisation Strahler	15
Illustration 5 – Classification Strahler des talwags calculés à partir du MNT au pas de 1m (à gauche, tout ordre ; à droite, ordres supérieurs à 1)	15
Illustration 6 – Grille des pentes en degrés calculées à partir du MNT au pas de 1 m	16
Illustration 7 – Exemple d'attribution des valeurs de pentes moyennes par tronçon de talwegs	17
Illustration 8 – Répartition des valeurs de TPI en fonction du type de la géomorphologie du paysage (Jenness, 2006)	18
Illustration 9 – Effet potentiel du rayon d'emprise pour le choix des cellules au voisinage sur la valeur de l'indice TPI (Jenness, 2006).....	18
Illustration 10 – Classes de forme du paysage en utilisant la méthode dérivée, utilisant deux calculs de TPI (Jenness, 2006).....	19
Illustration 11 – Calcul de l'indice TPI au niveau de la Rivière des Pères [a) localisation sur la carte IGN, b) rayon d'analyse de 10m, c) rayon d'analyse de 50m, d) TPI dérivé par croisement des calculs a) et b)]	20
Illustration 12 – Grille de l'indice de position topographique (TPI) calculée à partir du MNT au pas de 1 m de la Martinique	21
Illustration 13 – Grille de l'indice topographique d'humidité (TWI) calculée à partir du MNT au pas de 1m de la Martinique	22
Illustration 14 – Reconnaissance terrain (à gauche : rivière Bois d'Inde ; à droite : rivière Vatable).....	26
Illustration 15 – Type d'écoulement observé durant les reconnaissances de terrain de mai/juin 2017, selon quatre classes (sec, eau stagnante, ruissellement, en eau)	27
Illustration 16 – Exemple schématique d'une sélection de tronçons de talweg pour la validation de l'approche.....	27
Illustration 17 – Répartition des pourcentages de longueur cumulée des tronçons d'ordre 1 à 6 en fonction du type d'écoulement observé dans les quatre site visités	28
Illustration 18 – Répartition des longueurs cumulées des tronçons d'ordre 1 à 6 en fonction du type d'écoulement observé dans les quatre site visités	29
Illustration 19 – Les cinq valeurs clés qui composent une boîte à moustaches	30
Illustration 20 – Répartition des pentes moyennes des tronçons de talweg selon le type d'écoulement observé dans les quatre site visités	31

Illustration 21 – Répartition des pourcentages de longueur cumulée des tronçons par classes de TPI en fonction du type d'écoulement observé dans les quatre site visités.....	32
Illustration 22 - Répartition des longueurs cumulées des tronçons par classes de TPI en fonction du type d'écoulement observé dans les quatre site visités	33
Illustration 23 – Répartition des valeurs moyennes d'indice d'humidité TWI des tronçons de talweg selon le type d'écoulement observé dans les quatre site visités	35
Illustration 24 – Répartition des valeurs maximums d'indice d'humidité TWI des tronçons de talweg selon le type d'écoulement observé dans les quatre site visités	35
Illustration 25 – Répartition des valeurs minimums d'indice d'humidité TWI des tronçons de talweg selon le type d'écoulement observé dans les quatre site visités	36
Illustration 26 - Répartition des notes moyennes obtenues pour les tronçons de talweg selon le type d'écoulement observé dans les quatre site visités	37
Illustration 27 – Comparaison des observations de terrain et des résultats de l'approche géomorphologique multicritère pour la Rivière Oman	39
Illustration 28 – Localisation des talweds secs ou à cours d'eau intermittents et des talweds à cours d'eau pérennes d'après l'approche géomorphologique SIG	41
Illustration 29 – Cartographie des sols de la Martinique (IRD).....	43
Illustration 30 - Carte de la pluie efficace moyenne interannuelle, calculée sur la période 1991–2010, en mm (Arnaud et al., 2013)	44

Liste des tableaux

Tableau 1 – Classes de l'indice TPI selon la méthode dérivée.....	19
Tableau 2 – Récapitulatif des investigations terrain.....	26
Tableau 3 – Note appliquée à chaque tronçon de talweg en fonction de son ordre Strahler	30
Tableau 4 – Note appliquée à chaque tronçon de talweg en fonction de sa pente moyenne	32
Tableau 5 – Note appliquée à chaque tronçon de talweg en fonction de sa classe TPI	34
Tableau 6 – Note appliquée à chaque tronçon de talweg en fonction de sa classe d'humidité TWI	37

Liste des annexes

Annexe 1 Compte-rendu de réunion du 28 juillet 2016.....	49
Annexe 2 Comparaison des observations de terrain et des résultats de l'approche géomorphologique multicritère pour la Rivière Pilote, Vatable et Vauclin.....	55

1. Contexte et objectif

La loi sur l'eau impose que toute activité, installation ou aménagement susceptible d'impacter un cours d'eau soit soumis à déclaration ou autorisation administrative. Il importe donc de bien définir ce qu'est un cours d'eau et de le différencier d'une ravine.

La définition jurisprudentielle d'un cours d'eau, selon la circulaire du 2 novembre 2005, repose sur trois critères cumulatifs obligatoires :

- **La présence et permanence d'un lit naturel à l'origine** ; distinguant ainsi un cours d'eau d'un canal ou d'un fossé creusé par l'homme mais incluant dans la définition un cours d'eau naturel à l'origine mais rendu artificiel par la suite ;
- **La permanence d'un débit suffisant une majeure partie de l'année** ; apprécié au cas par cas par le juge, en fonction des données climatiques et hydrologiques locales, à partir de présomptions sur la carte IGN ou dénomination sur le cadastre ;
- **L'alimentation par une source**.

En Martinique, l'arrêté préfectoral du 8 décembre 2011 classe un tronçon hydrographique selon un caractère permanent ou temporaire, suite au développement interne de la DEAL d'une méthode dite « géométrique » basée sur l'étude de la BD Carthage et de la BD Topo (®IGN).

Ce classement a connu des contestations, c'est pourquoi le BRGM a été sollicité par la DEAL (Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement) et l'ODE (Office De l'Eau) afin de :

- développer de nouveaux indicateurs qui permettront d'améliorer la définition des cours d'eau ;
- justifier ce classement par une méthodologie détaillée.

A la suite des premiers travaux géomatiques, en concertation avec la DEAL et l'ODE, le contenu de la convention a été revu en juillet 2016 (cf. compte-rendu en Annexe 1 & Annexe 2) afin d'intégrer des reconnaissances sur site, nécessaires pour fournir des premiers paramètres de calages et donc affiner les analyses multicritères réalisés.

2. Inventaire des données utilisées et choix des critères géomorphologiques

L'approche méthodologique innovante décrite dans la suite de ce rapport correspond à une analyse multicritères, réalisée via un SIG, des quatre critères suivants :

- la classification Strahler ;
- les pentes au droit des talwegs ;
- deux indices géomorphologiques que sont :
 - o l'indice de position topographique (TPI) ;
 - o l'indice d'humidité du sol (TWI).

Ces quatre critères ont tous été définis à partir du MNT au pas de 1 m du RGE Alti® disponible en Martinique depuis 2010.

2.1. MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN DU RGE ALTI®

Le RGE ALTI® (IGN) est un modèle numérique de terrain maillé au pas de 1 mètre qui a pour vocation la description du relief français à grande échelle. Il décrit la forme et l'altitude de la surface du sol à grande échelle et couvre l'ensemble de la France métropolitaine, les départements d'Outre-mer et les collectivités d'Outre-mer de Saint-Pierre-et-Miquelon, Saint-Barthélemy et Saint-Martin.

Cette modélisation du relief se présente sous la forme d'une grille régulière et rectangulaire, appelée aussi « matrice d'altitudes ». L'altitude de chacun des nœuds de cette grille correspond à l'altitude du terrain nominal au point défini par le nœud de la grille. Le pas de cette grille est identique en X et en Y. La grille de 1 m de la Martinique utilisée dans la suite de l'étude est présentée en Illustration 1.

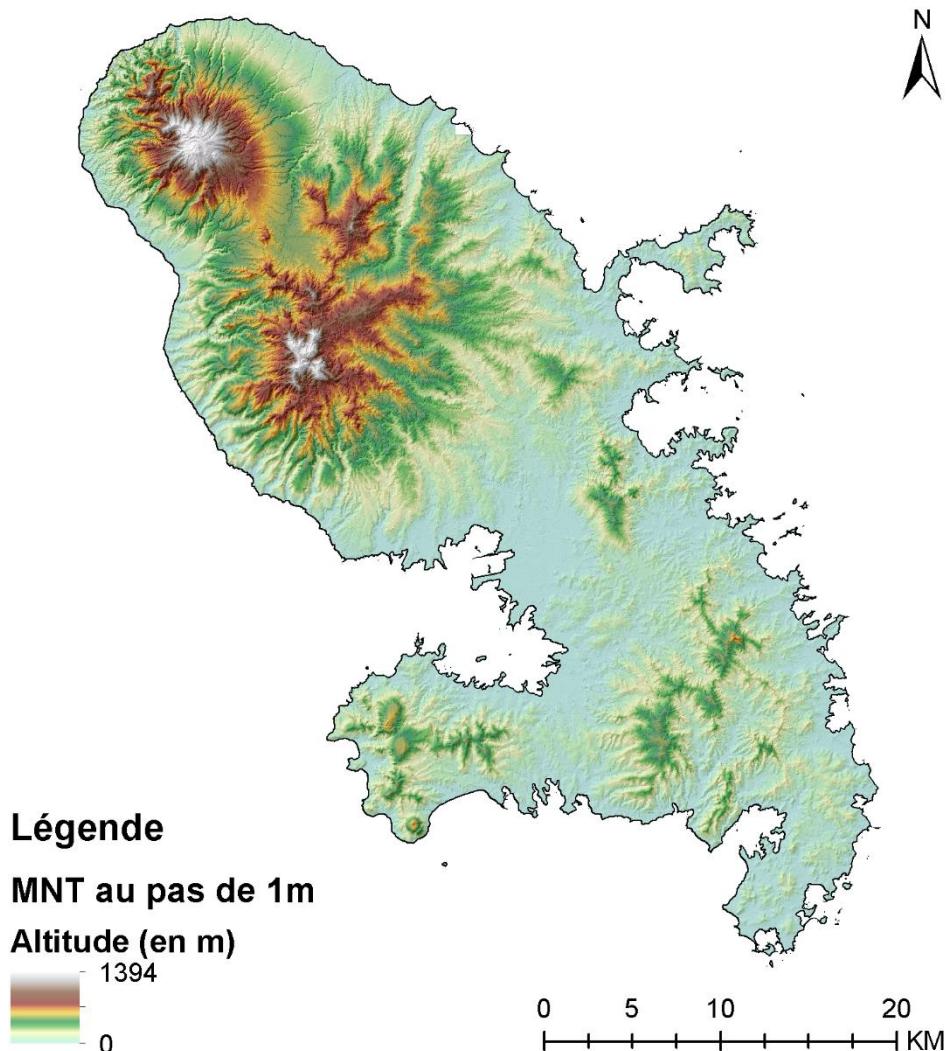


Illustration 1 – Modèle Numérique de Terrain de la Martinique au pas de 1 m

Le MNT du RGE ALTI® version 2.0 décrit ainsi la forme et la position du terrain nu, c'est-à-dire du terrain débarrassé de tous les éléments de sursol (bâti et végétation : cultures, haies, broussailles, arbres isolés, bosquet, bois, forêt, etc.). Le sol ainsi défini décrit la surface terrestre, qu'il s'agisse du terrain naturel ou bien du terrain aménagé par l'homme : routes, voies ferrées, digue, terrassements, etc.

C'est une représentation interpolée de la surface du sol qui n'est donc pas toujours strictement conforme à la réalité, en particulier dans les zones où les données initiales sont peu denses ou absentes, et dans les zones de surplombs. Il est conçu pour une utilisation à des échelles comprises entre le 1/1 000 et le 1/50 000. L'exactitude altimétrique du MNT dépend de la méthode d'acquisition des données et des traitements effectués selon les caractéristiques des zones traitées. Plusieurs techniques d'acquisition des données sont mises en œuvre par l'IGN selon le type de paysage et les besoins des utilisateurs (technologies LiDAR, Radar, corrélation de photographies aériennes).

2.2. CRITÈRE 1 : DÉTERMINATION ET CARACTÉRISATION DU RÉSEAU DE TALWEGS SELON LES ORDRES STRAHLER

2.2.1. Prétraitement réalisé sur le MNT au pas de 1 m

Pour les algorithmes à objectif hydraulique, les cuvettes topographiques constituent un obstacle à l'écoulement gravitaire de l'eau. Ils sont assez simples à repérer grâce à des outils « de remplissage » présents dans des logiciels SIG tels qu'ArcGIS ou QGis qui permettent de détecter lorsqu'une cellule présente, dans son voisinage immédiat, huit points d'altitude plus élevée que lui (cf. Illustration 2).

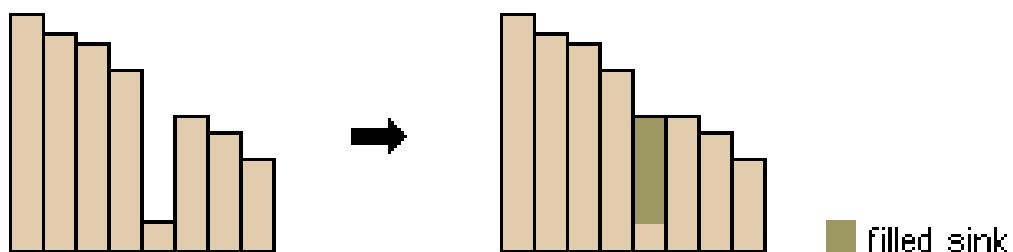


Illustration 2 – Profil d'une cuvette avant et après le remplissage (outil « Remplissage » d'ArcGIS)

Les zones endoréiques naturelles peuvent exister mais elles sont généralement restreintes à des morphologies de terrain particulières (carrière, karst...). Nombre d'auteurs conviennent que les dépressions présentent dans les MNT, dans leur grande majorité, révèlent plutôt des erreurs dans les données d'origine ou sont liées à la mise au format raster (Tarboton *et al.*, 1991 ; Tribe, 1992 ; Sauquet, 2000). Pour des traitements géomorphologiques, ces cuvettes posent problème car une fois atteint le fond, il est impossible d'en ressortir. C'est pourquoi, un prétraitement a été réalisé sur le MNT au pas de 1 m de la Martinique pour combler ces dépressions avant de lancer le calcul du réseau de talwegs.

2.2.2. Etapes du calcul du réseau de talwegs à partir du MNT 1m

Un talweg correspond à la ligne qui rejoint les points les plus bas d'une vallée. Il est en grande majorité modelé par l'érosion fluviale et fréquemment occupé par le réseau hydrographique. Dans la suite de l'étude, un talweg sera donc vu comme un tronçon de cours d'eau théorique.

Une fois le MNT corrigé, ce réseau de talwegs a donc été calculé à l'aide d'un logiciel SIG. Du point de vue méthodologique, le tracé d'un tronçon de talweg s'appuie essentiellement sur deux grilles calculées au préalable à partir du MNT : une grille de direction de flux et une grille d'accumulation de flux (Jenson et Domingue, 1988). Le croisement de ces deux grilles permet de délimiter les contours des bassins versants topographiques mais également d'identifier les lignes d'écoulement préférentiel de surface que constituent ces talwegs.

Le résultat de ce calcul pour la Martinique est présenté en Illustration 3.

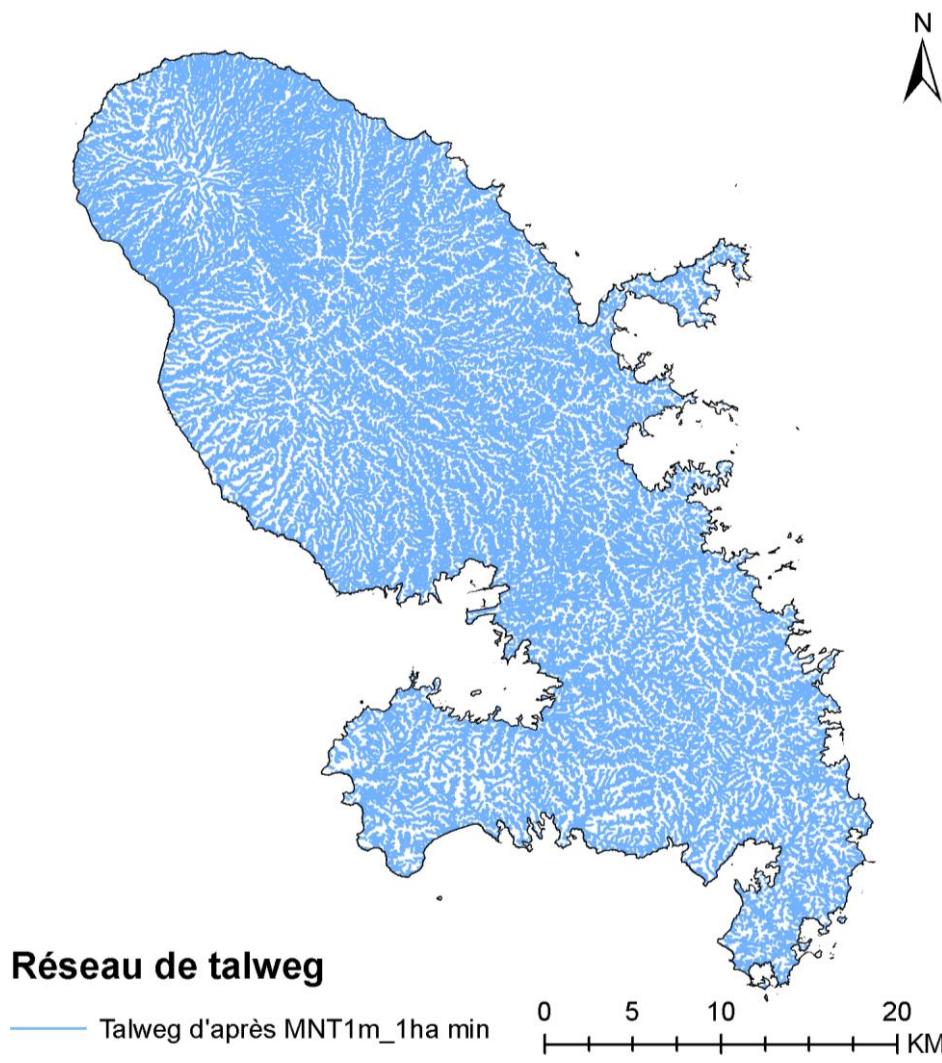


Illustration 3 – Réseau de talweds théoriques calculés à partir du MNT 1m

Outre ces deux grilles, un autre paramètre d'entrée important est la superficie minimale du bassin versant amont qui va initier l'écoulement de surface. En faisant varier ce paramètre, il est possible de définir des réseaux de talweds plus ou moins détaillés.

Pour les besoins de l'étude, il a été décidé de générer un réseau de talweds dense. La superficie minimale du bassin versant pour initier un tronçon a donc été définie à un hectare.

2.2.3. Classification des talweds selon les ordres Strahler

La classification d'un réseau hydrographique est une manière de hiérarchiser l'ensemble des branches de ce réseau en attribuant à chacune une valeur entière qui caractérise son importance. Parmi les nombreuses classifications existantes, celle de Strahler est une des plus couramment utilisée. Elle permet d'identifier et de classer des types de cours d'eau en fonction de leur nombre d'affluents.

Dans cette méthode Strahler, toutes les liaisons sans affluents sont classées avec la valeur 1 et sont connus sous le nom du premier ordre. L'ordre d'écoulement augmente lorsque des cours d'eau du même ordre confluent. L'intersection de deux liaisons de premier ordre crée donc une liaison de deuxième ordre. L'intersection de deux liaisons de deuxième ordre crée une liaison de

troisième ordre, et ainsi de suite. En revanche, l'intersection de deux liaisons d'ordres différents n'incrémente pas l'ordre mais conserve l'ordre de la liaison le plus élevé (cf. Illustration 4).

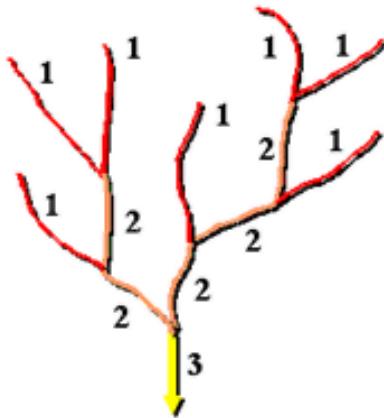


Illustration 4 – Méthode de hiérarchisation Strahler

La classification des cours d'eau par le nombre de Strahler est ainsi très significative pour prendre en compte la structure et la densité du réseau hydrographique. Elle reflète la variabilité des situations géographiques / géologiques (exemple : selon la perméabilité du substrat rocheux du bassin versant) et pluviométriques par son lien étroit avec la quantité d'eau transportée en surface pendant les périodes de forts débits.

Le résultat de cette classification Strahler des talwegs calculés à partir du MNT au pas de 1 m est présenté dans l'Illustration 5 ci-dessous.

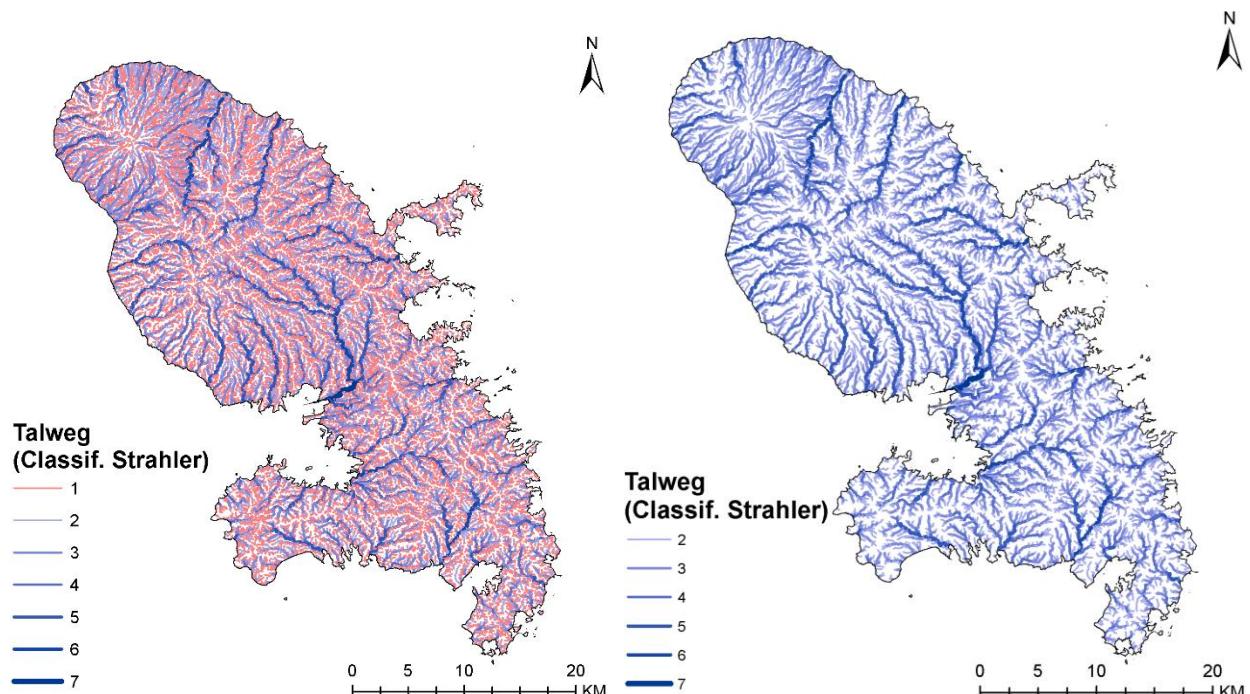


Illustration 5 – Classification Strahler des talwegs calculés à partir du MNT au pas de 1m (à gauche, tout ordre ; à droite, ordres supérieurs à 1)

2.3. CRITÈRE 2 : CLASSIFICATION DES TALWEGS SELON LES PENTES TIRÉES DU MNT 1 M

La pente du terrain est un autre critère à considérer pour l'évaluation de la pérennité ou de l'intermittence potentielle d'un écoulement de surface. Lors d'un épisode pluvieux important, une pente très forte va favoriser un ruissellement abondant et limiter de ce fait l'infiltration de l'eau météoritique. Mais le phénomène risque d'être généralement très limité dans le temps. De ce fait, l'hypothèse qu'un écoulement de surface intermittent se fait préférentiellement sur un terrain dont la pente moyenne est au-dessus d'une certaine valeur « limite » apparaît pertinente. Reste à définir cette valeur limite sur la base de critères scientifiques et vérifiés sur le terrain.

Une grille des pentes en degrés a donc pu être calculée à partir du MNT au pas de 1 m (cf. Illustration 6). Les fortes valeurs sont logiquement rencontrées au niveau de la Montagne Pelée – essentiellement le flanc Ouest – et des Pitons du Carbet.

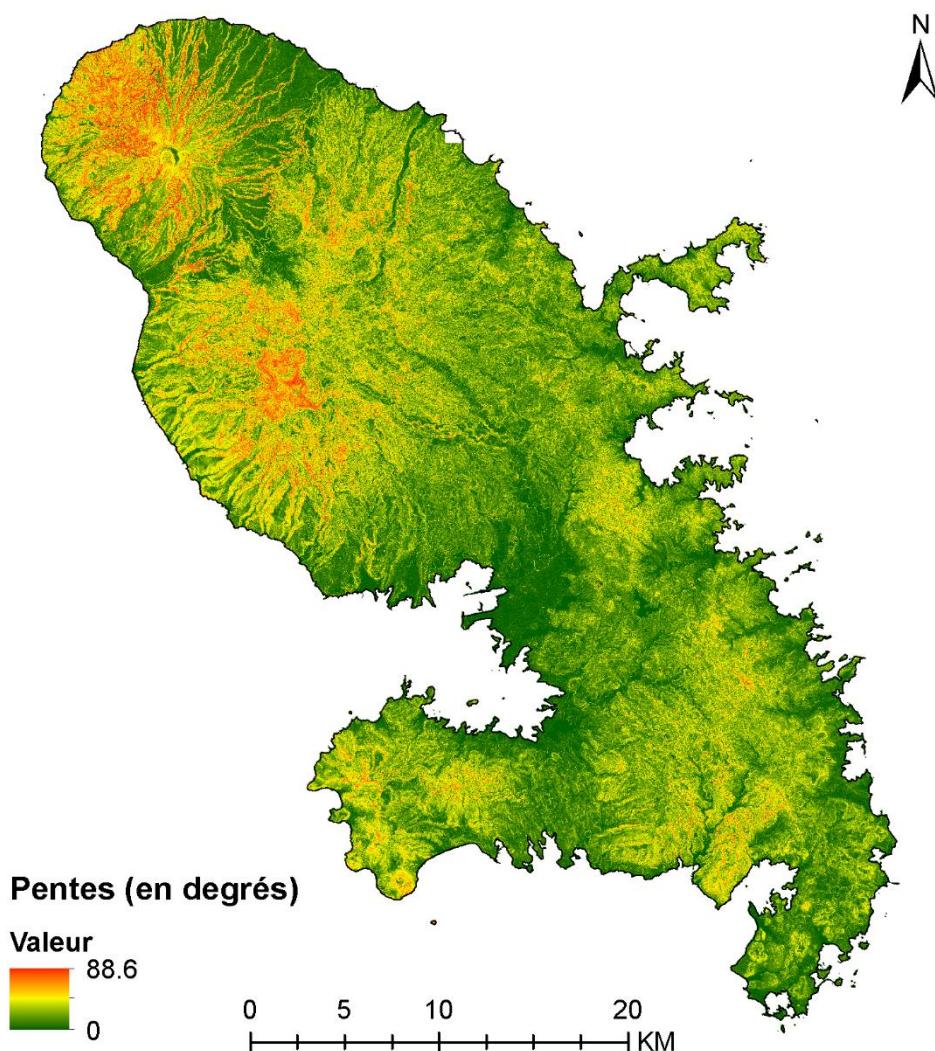


Illustration 6 – Grille des pentes en degrés calculées à partir du MNT au pas de 1 m

Une analyse statistique a ensuite été réalisée permettant d'attribuer à chaque tronçon des talwegs précédemment calculés, les valeurs minimum, moyenne et maximum de pentes (cf. Illustration 7).

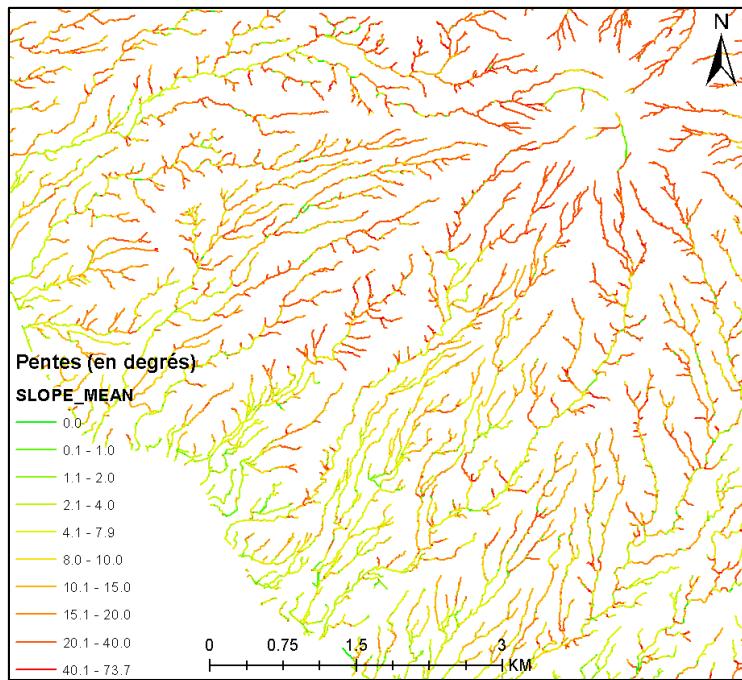


Illustration 7 – Exemple d'attribution des valeurs moyennes par tronçon de talwegs

2.4. CRITÈRE 3 : INDICE DE POSITION TOPOGRAPHIQUE (TPI POUR TOPOGRAPHIC POSITION INDEX)

2.4.1. Principe

Cet indice géomorphologique, également parfois intitulé « Relative topographic position » est à interpréter comme une synthèse des deux notions suivantes : la rugosité du sol et l'élévation locale par rapport au voisinage (Jenness, 2004).

L'objectif de cette méthode est d'aboutir à une classification du paysage selon des contextes géomorphologiques prédéfinis par des valeurs guides de TPI. Exploitant un modèle numérique de terrain, ces valeurs de TPI sont calculées en faisant la différence entre l'altitude d'une cellule et l'altitude moyenne des cellules environnantes.

Des valeurs négatives caractériseront ainsi essentiellement des zones de type fonds de vallée encaissées et canyons alors que les valeurs positives seront plutôt rencontrées au droit des crêtes topographiques (cf. Illustration 8). Enfin, toute valeur proche de zéro pourra représenter soit une zone plane, soit une zone de milieu de pente. La distinction entre les deux est alors possible en s'appuyant sur le calcul des pentes.

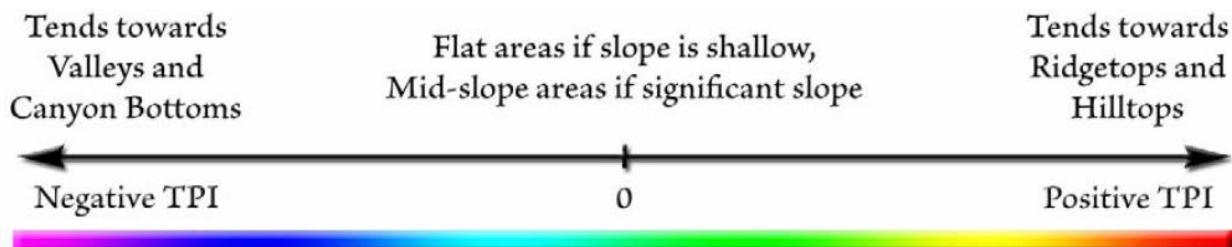


Illustration 8 – Répartition des valeurs de TPI en fonction du type de la géomorphologie du paysage (Jenness, 2006)

Cet indice est souvent utilisé pour identifier les grandes tendances et/ou frontières/barrières topographiques qui peuvent présenter une très bonne corrélation avec les types de roches, les processus géomorphologiques dominants, les caractéristiques du sol, la végétation et, pour ce qui concerne plus spécifiquement les besoins de la présente étude, le réseau des écoulements superficiels.

Le principal défaut de cet indice est sa très forte dépendance à la valeur du rayon d'analyse qui permet à l'utilisateur de définir le groupe de cellules qui sera comparé à chaque cellule de la grille. L'Illustration 9 ci-dessous montre bien que selon ce rayon d'analyse, les conclusions sur le contexte peuvent être très différentes voire contradictoires (crête topographique dans le cas B, fond de vallée dans le cas C). Cet effet d'échelle doit donc être limité autant que possible, en fonction des objectifs et du rendu souhaité.

TPI Values at 3 Different Scales

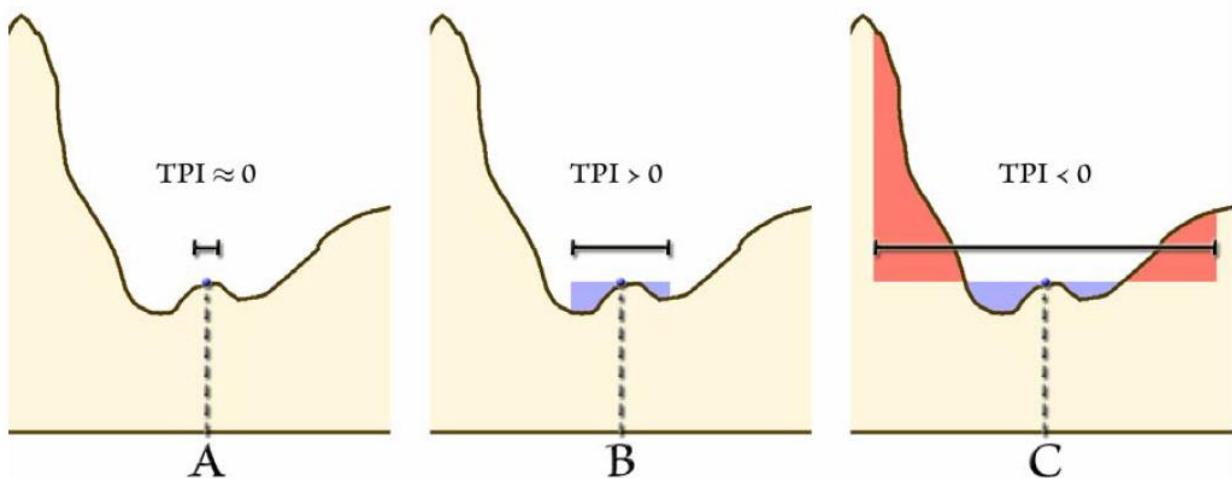


Illustration 9 – Effet potentiel du rayon d'emprise pour le choix des cellules au voisinage sur la valeur de l'indice TPI (Jenness, 2006)

Il est néanmoins possible de limiter cet effet indésirable en s'appuyant sur une méthode dérivée de classification de la forme du paysage. Elle consiste à croiser deux calculs de TPI, un premier avec un rayon d'emprise restreint (voisinage resserré) et un second avec un rayon plus important (voisinage lointain). L'Illustration 10 ci-dessous rend compte des conclusions sur les différentes combinaisons possibles de TPI.

Landform Classification, using Large and Small Neighborhood TPI

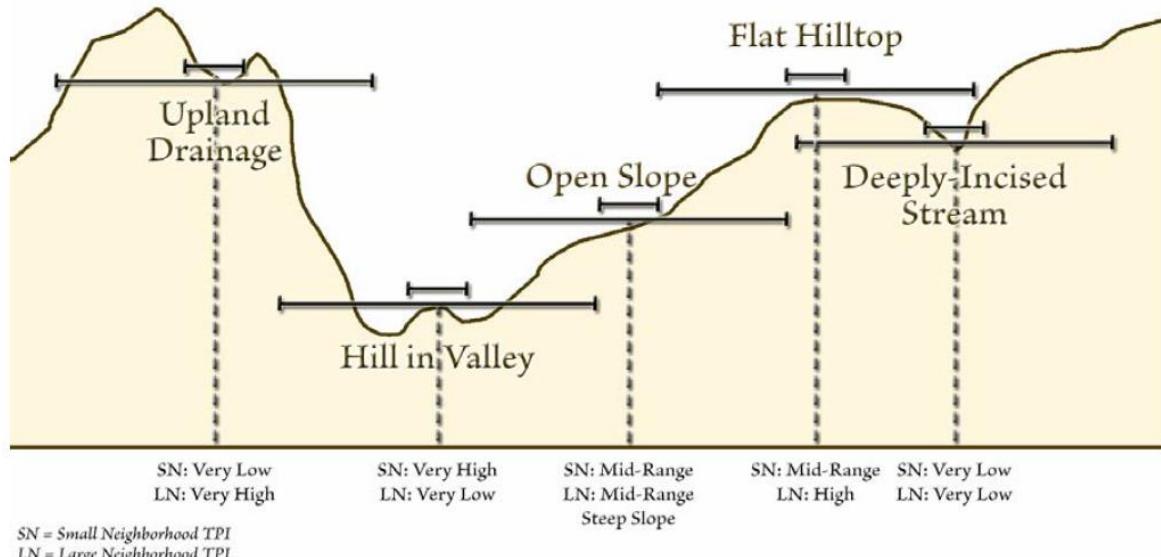


Illustration 10 – Classes de forme du paysage en utilisant la méthode dérivée, utilisant deux calculs de TPI (Jenness, 2006)

Cette approche permet entre autres de détecter plus finement les collines isolées au sein de vallées larges, les cours d'eau profondément incisés, les talwegs en tête de bassin...etc...

Cet indice permet de représenter le terrain selon les 10 classes du Tableau 1 ci-dessous.

Classes de l'indice TPI	1	2	3	4	5
	Canyon, vallée incisée	Pente moyenne, vallée peu incisée	Vallée en altitude, limite amont des cours d'eau	Vallée en U (ou en augé)	Plaine
	6	7	8	9	10
	Pente raide, abrupte	Haut de pente, partie supérieure du talus, mesa	Petite crête localisée, colline dans une vallée	Crête moyenne, colline dans une plaine	Sommet de montagne, colline élevée, ligne de crête

Tableau 1 – Classes de l'indice TPI selon la méthode dérivée

2.4.2. Calcul réalisé sur la Martinique

Plusieurs tests ont permis de montrer que la méthode TPI dérivée semblait la plus pertinente pour caractériser de manière satisfaisante la forme du paysage en Martinique.

Le MNT au pas de 1 m a été exploité pour calculer cet indice TPI dérivé. Le rayon d'analyse pour le voisinage immédiat a été défini à 10 m. Celui pour le voisinage plus lointain a été défini à 50 m. Un exemple de ces calculs et le résultat de la méthode dérivée sont présentés pour le secteur de la Rivière des Pères à Saint-Pierre dans l'Illustration 11 ci-dessous.

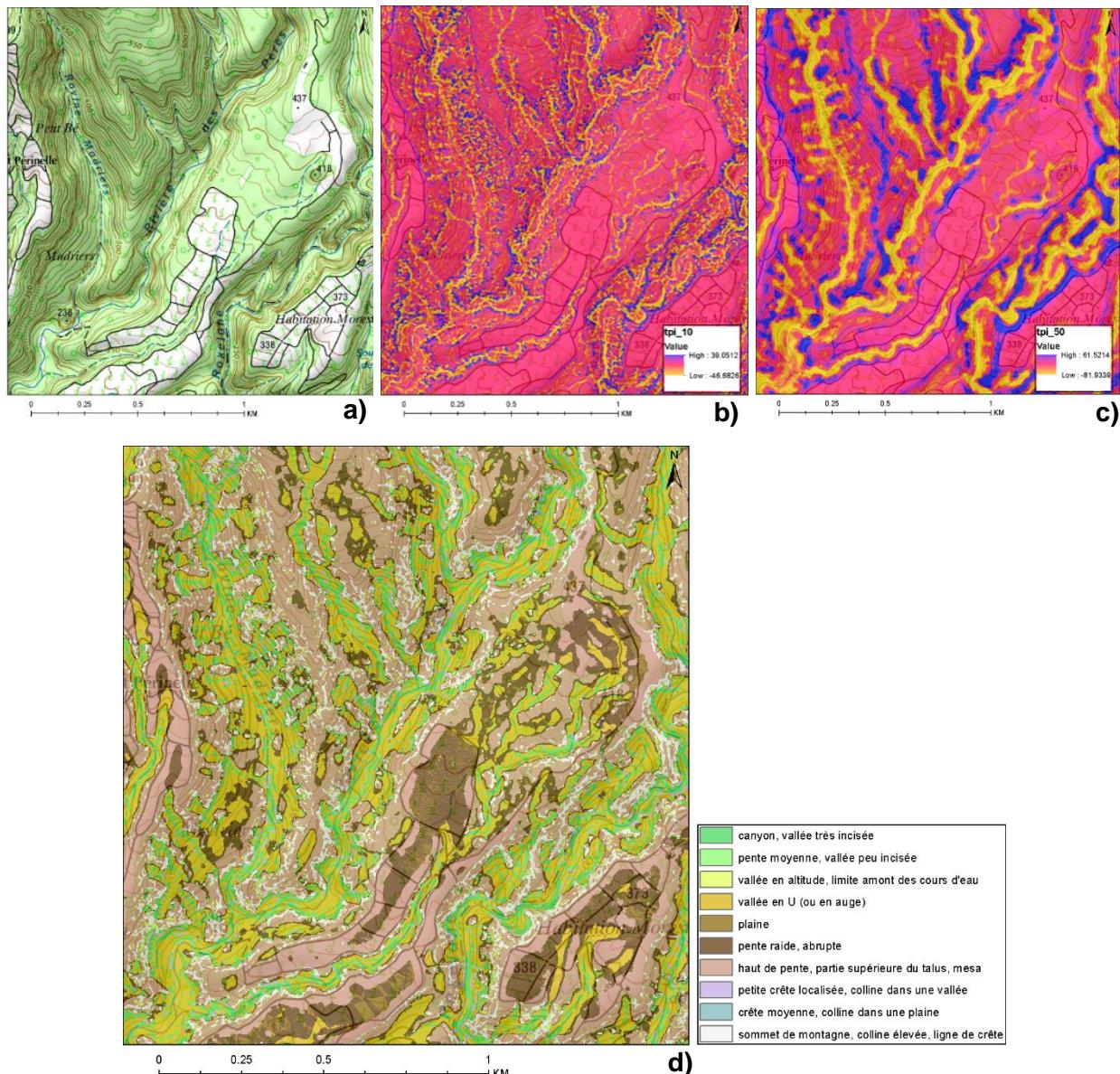


Illustration 11 – Calcul de l'indice TPI au niveau de la Rivière des Pères [a) localisation sur la carte IGN, b) rayon d'analyse de 10m, c) rayon d'analyse de 50m, d) TPI dérivé par croisement des calculs a) et b)]

Le résultat de ce calcul sur l'ensemble de la Martinique est présenté dans l'Illustration 12 ci-dessous. Sont retrouvés certains des contrastes déjà décelés par le calcul des pentes, à savoir la dichotomie Est-Ouest de la Montagne Pelée, la platitude de la plaine du Lamentin.

Par contre, le signal semble plus diffus au niveau des Pitons du Carbet. A noter également la mise en évidence d'une bande littorale, côté Caraïbes, entre la Montagne Pelée et Fort-de-France, qui présente une morphologie avec des pentes abruptes, sur une largeur d'environ 3 km. *A contrario*, les premiers kilomètres de la bande littoral atlantique présentent une morphologie globalement plus plane.

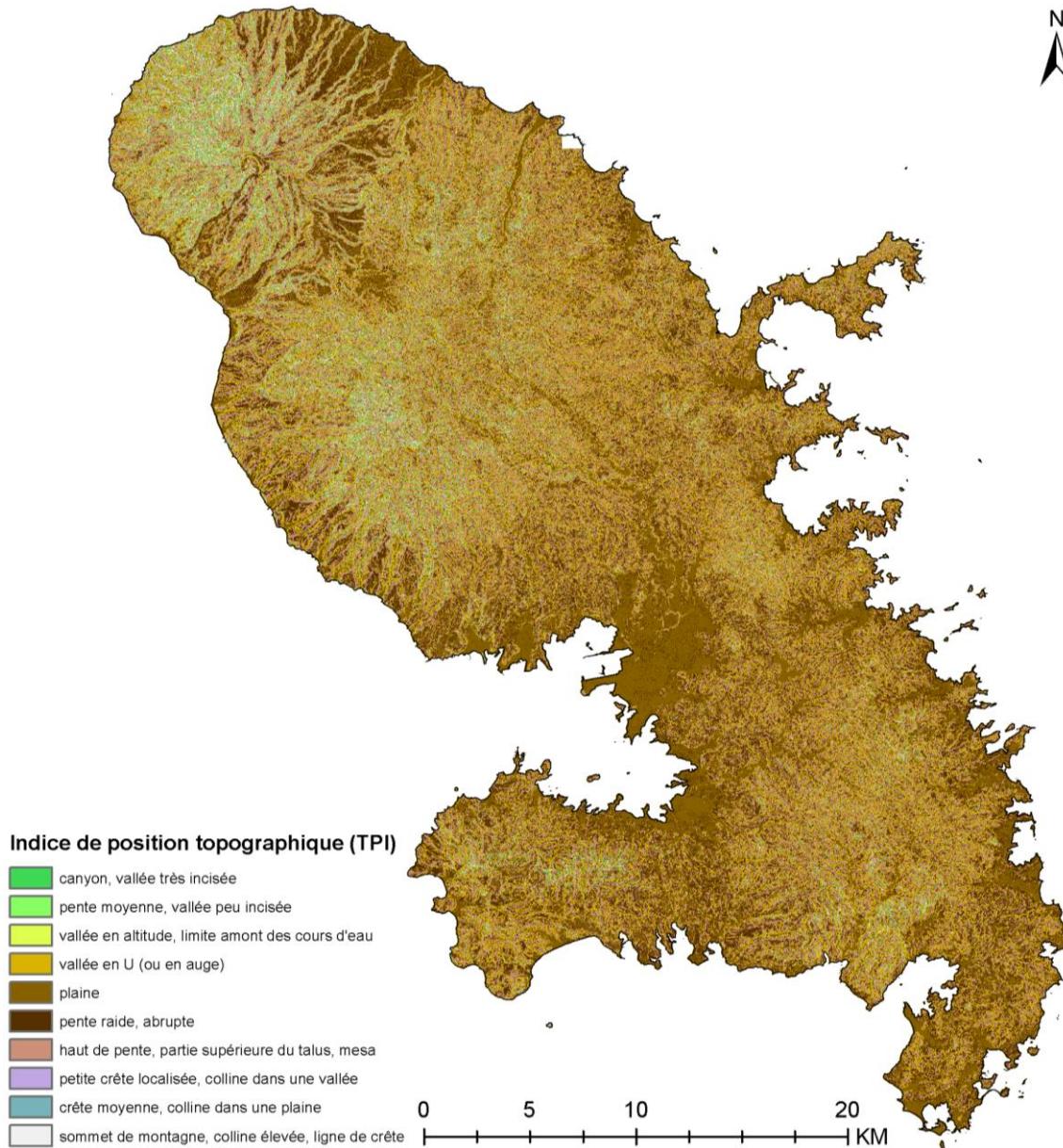


Illustration 12 – Grille de l'indice de position topographique (TPI) calculée à partir du MNT au pas de 1 m de la Martinique

2.5. CRITÈRE 4 : INDICE TOPOGRAPHIQUE D'HUMIDITÉ DU SOL (TWI POUR TOPOGRAPHIC WETNESS INDEX)

2.5.1. Principe

Cet indice géomorphologique combine, en tout point, le secteur de contribution amont local (zone d'accumulation) et la pente. Il est généralement utilisé pour mesurer les effets de la topographie sur les processus hydrologiques (entre autre l'engorgement des sols) mais également pour estimer voire mesurer la distribution spatiale des états d'humidité (Gessler et al., 1995).

Cet indice présente généralement une très bonne corrélation avec la géologie en place et les réseaux hydrographiques de surface (Sauquet, 2000).

Il est défini à partir de la formule suivante :

$$\ln(A/\tan(B))$$

avec :

- $\tan(B)$ [m/m] la pente locale et
- A [m²/m] l'aire contributive pour chaque pixel et par unité de largeur, c'est-à-dire la surface située à l'amont du pixel et drainée par ce pixel.

Les valeurs fortes de l'indice TWI caractérisent les secteurs à pentes généralement assez faibles et pour lesquels la probabilité de drainer en cas de saturation des sols est importante. *A contrario*, les valeurs TWI faibles concernent plutôt les zones escarpées ou à pente raide, soient des lieux où l'eau est susceptible de s'évacuer rapidement, et donc considérées comme des zones plutôt « sèches ».

2.5.2. Calcul réalisé sur la Martinique

Le résultat du calcul de cet indice TWI sur l'ensemble de l'île est présenté dans l'Illustration 13 ci-dessous.

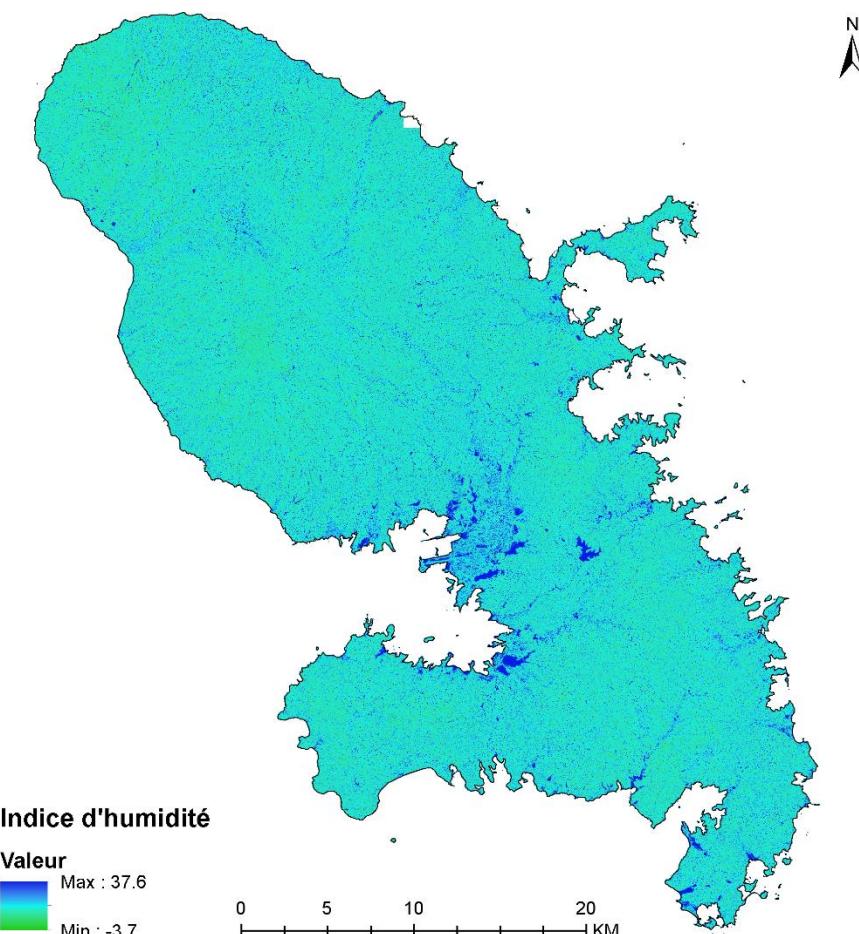


Illustration 13 – Grille de l'indice topographique d'humidité (TWI) calculée à partir du MNT au pas de 1m de la Martinique

A cette échelle de représentation, cette grille est difficile à interpréter. Néanmoins, quelques secteurs ressortent déjà sensiblement. La plaine du Lamentin et certaines zones du littoral atlantique sont identifiés comme des zones potentiellement « humides » (mailles bleues foncées sur l'Illustration 13). Il est également possible de deviner certaines lignes de mailles humides, qui pourraient très bien s'interpréter comme des tracés des principaux cours d'eau pérennes de l'île.

Pour les besoins de la présente étude, la principale difficulté a finalement résidé dans l'interprétation des valeurs de cet indice TWI, un peu à l'image du critère des pentes. En effet, un choix de valeurs seuils est à faire pour distinguer les zones de drainage précédemment décrites de celles plutôt « sèches ». Le choix de ces valeurs n'est pas figé et diffère même selon les contextes rencontrés.

Comme aucun exemple similaire à celui du contexte martiniquais n'est disponible dans la littérature, la démarche entreprise a donc consisté à analyser statistiquement les valeurs prises par cette grille TWI et à les confronter aux conclusions tirées des observations de terrain décrites dans le chapitre suivant.

3. Calage des critères géomorphologiques par des reconnaissances de terrain

Très rapidement, le croisement de ces quatre critères s'est avéré délicat, aucune information de terrain ne permettant de confirmer ou infirmer certaines hypothèses prises arbitrairement sur des classes de valeurs (notamment celles pour les pentes et l'indice d'humidité TWI).

En concertation avec la DEAL et l'ODE, il a donc été décidé d'intégrer des reconnaissances de terrain à l'étude, afin de fournir des paramètres de calages à cette approche géomatique multicritère. Cette étape a permis d'augmenter le niveau de fiabilité du résultat final du point de vue probabiliste.

3.1. RECONNAISSANCE TERRAIN MENÉES EN MAI ET JUIN 2017

Des reconnaissances terrain ont été menées sur les quatre principaux bassins versants du sud de la Martinique : la rivière Oman, la rivière Pilote, la rivière Vatable et la rivière du Vauclin. Dans le cadre de prochaines reconnaissances dans des secteurs à accès limité, il pourrait être envisagé d'exploiter l'imagerie satellitaire infrarouge, issue de la BD Ortho de 2017 (®IGN). Les investigations ont eu lieu à la fin de la saison sèche en mai et juin 2017, afin de s'affranchir des ruissellements superficiels provenant des précipitations et de pouvoir mieux caractériser la pérennité d'un débit suffisant. En effet, au cours de cette période l'essentiel de l'alimentation des cours d'eau provient des eaux souterraines (cf. définition de la circulaire d'une alimentation par des sources).

L'urbanisation du sud de la Martinique ainsi que la végétation peu dense a grandement facilité l'accessibilité de certains cours d'eau et ravines. En effet, un maillage de moins d'un kilomètre a pu être réalisé sur les bassins versants des rivières Oman et Pilote. *A contrario* les bassins versant des rivières Vauclin et Vatable beaucoup moins urbanisés n'ont pas pu être maillés aussi précisément.

Une base de données a été créée, bancarisant les coordonnées GPS des points sur lesquels ont été réalisés des mesures de débit (à l'aide d'un seau et d'un chronomètre), des mesures de paramètres *in situ* (la conductivité et la température), des observations géomorphologies, etc. (cf. Illustration 14).



Illustration 14 –Reconnaissance terrain (à gauche : rivière Bois d'Inde ; à droite : rivière Vatable)

En parallèle, le témoignage de quelques riverains croisés sur le site d'étude a contribué à connaître l'emplacement de sources non répertoriées et à évaluer la pérennité de certaines rivières.

Le Tableau 2 présente le nombre de points relevés ainsi que les linéaires investigués.

Bassin Versant	Date	Linéaire réel (m)	Linéaire investigué (m)	Nombre de points relevés
Oman	18 et 19/05/2017	48 149	34 911	33
Pilote	23 et 24/05/2017	119 109	64 722	83
Vatable	07/06/2017	26 625	7 239	15
Vauclin	07/06/2017	37 106	8 266	13

Tableau 2 – Récapitulatif des investigations terrain

Une caractérisation des écoulements observés a été menée sur les quatre bassins versants et définie selon la classification suivante (cf. Illustration 15) :

- **Sec** : aucune présence d'eau observé ;
- **Stagnant à quasi-stagnant** : de l'eau est observé mais il n'y a pas d'écoulement ou celui-ci est extrêmement faible. Le lit de la rivière se présente en bassins successifs contenant de l'eau plus ou moins croupie. Il est probable que cette eau s'évapore au fur et à mesure. Quasi-stagnant signifie qu'il y a sûrement des influences externes qui expliquent le mouvement de l'eau observé (ex : exhaure de station d'épuration à proximité de la rivière Oman, influence maritime pour la rivière Vatable...) ;
- **Ruisseaulement** : écoulement très faible ;
- **En eau** : présence d'eau et écoulement généralement quantifié.

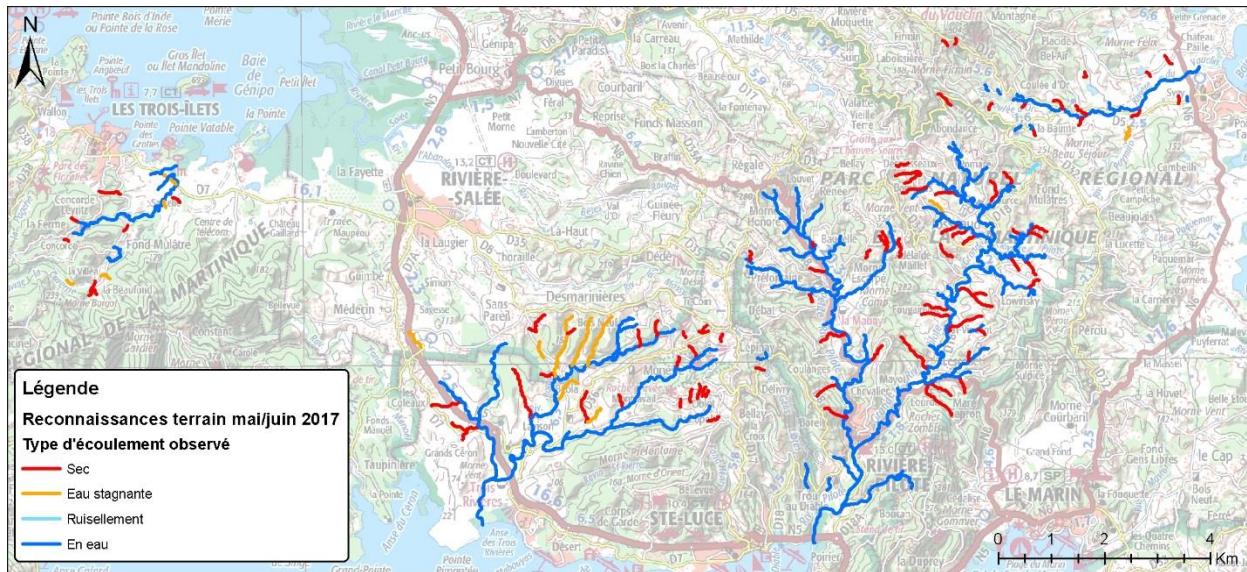


Illustration 15 – Type d'écoulement observé durant les reconnaissances de terrain de mai/juin 2017, selon quatre classes (sec, eau stagnante, ruissellement, en eau)

3.2. COMPARAISON DES QUATRE CRITÈRES DE L'APPROCHE SIG AVEC LES OBSERVATIONS TERRAIN

Les quatre critères décrits dans le chapitre 2 ont ainsi été comparés aux observations menées sur les quatre bassins versants « test ». Pour permettre cette confrontation, il a fallu dans un premier temps sélectionner les talwags calculés à partir du MNT au pas de 1 m qui coïncidaient avec les tronçons observés et leur affecter ensuite les observations faites sur le terrain (cf. 5).

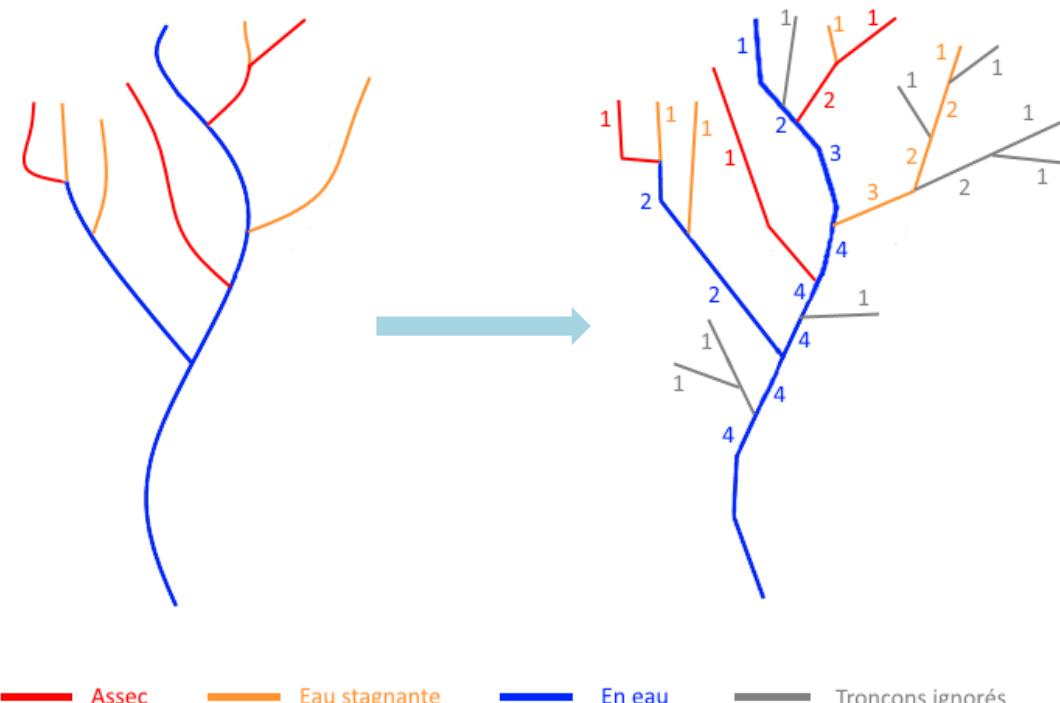


Illustration 16 – Exemple schématique d'une sélection de tronçons de talweg pour la validation de l'approche

3.2.1. Comparaison ordre Strahler du tronçon de talweg *vs* type d'écoulement observé sur le cours d'eau réel

Dans cette première analyse, les longueurs des tronçons de talwags sur les quatre sites visités ont été sommées par type d'écoulement observé. Puis, pour chaque type d'écoulement, les longueurs des tronçons de talwags ont ensuite été calculées par ordre Strahler.

Enfin, les rapports « Longueur totale des tronçons d'ordre n dans type d'écoulement X » sur « Longueur totale du type d'écoulement X » ont été calculés. Le résultat de cette analyse est reporté dans l'Illustration 17.

A titre d'exemple, si l'on considère le type d'écoulement « assec », ce graphique montre que 41% des tronçons appartenant à cette catégorie sont d'ordre 1, 46% sont d'ordre 2 et un peu moins de 8% sont d'ordre 3. Les 5% restants se trouvent être répartis dans des tronçons d'ordre supérieurs à 3.

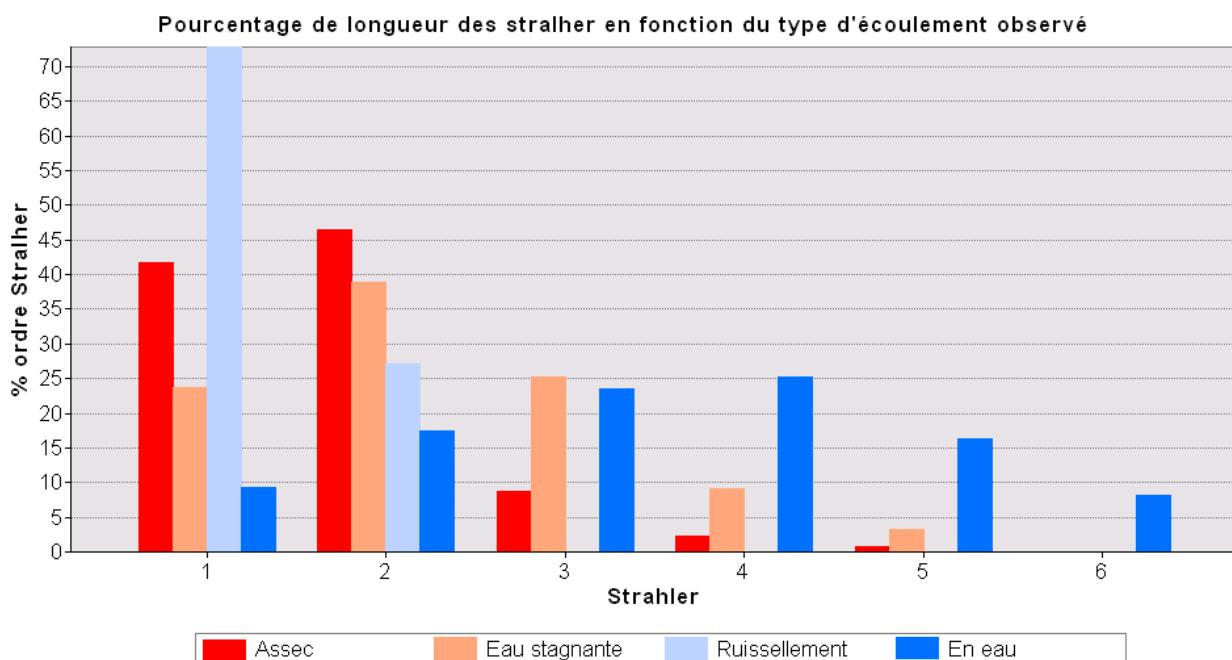


Illustration 17 – Répartition des pourcentages de longueur cumulée des tronçons d'ordre 1 à 6 en fonction du type d'écoulement observé dans les quatre site visités

Pour compléter la démarche, un autre type de répartition a été mené en se basant uniquement sur les valeurs absolues de longueurs cumulées par ordre Strahler (cf. Illustration 18).

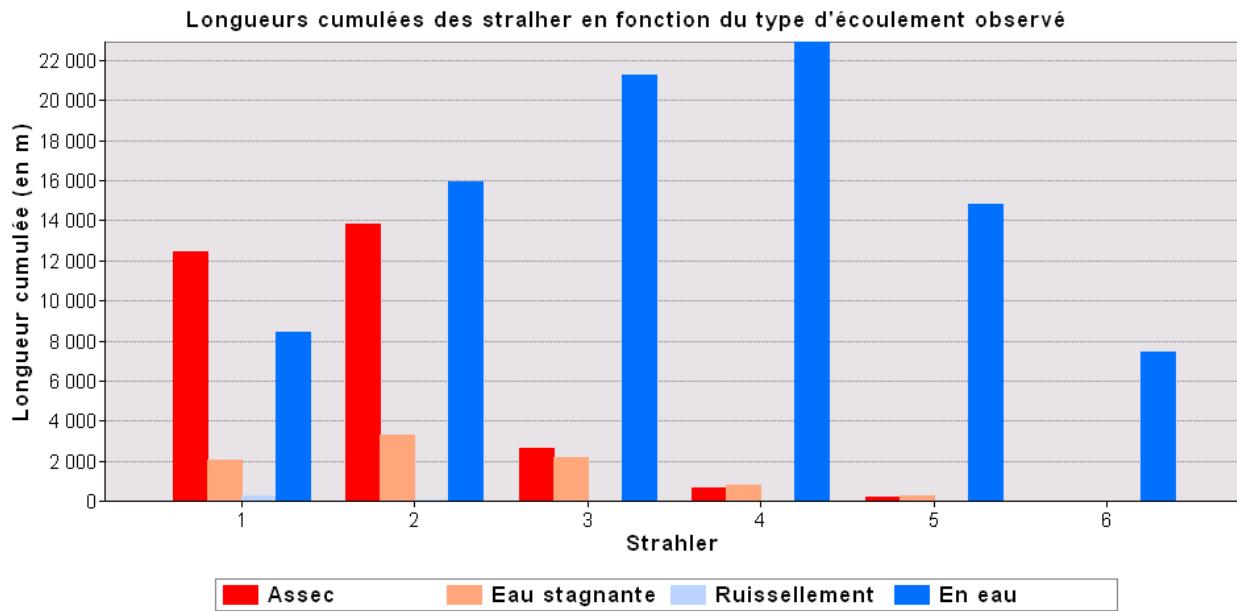


Illustration 18 – Répartition des longueurs cumulées des tronçons d'ordre 1 à 6 en fonction du type d'écoulement observé dans les quatre site visités

Les cours d'eau en assec sont majoritairement des cours d'eau présents dans des talwegs d'ordre Strahler 1 ou 2 (85% en cumulé), donc situés essentiellement en tête de bassin. Les eaux stagnantes se partagent entre ordres Strahler 1, 2 et 3 essentiellement.

Les écoulements de type « ruissellement » sont situés dans des talwegs d'ordre 1 ou 2 mais l'illustration 18 montrent qu'ils ne représentent en réalité qu'une part infime des cas rencontrés sur ces quatre rivières. Leur nombre n'est donc pas suffisamment significatif pour en conclure quoique ce soit.

Les écoulements « en eau » peuvent être de classes Strahler assez variables (de 1 à 6) mais l'examen détaillé des longueurs cumulées des tronçons de l'illustration 18 permet de dire qu'un tronçon d'ordre 4 à 6 sera quasiment toujours en eau.

Par contre, il est plus difficile de statuer aussi clairement sur les tronçons d'ordre 3 car près de 10% des cours d'eau en assec et 25% des « stagnants » sont situés dans des talwegs de cet ordre. De plus, si on considère les longueurs cumulées des tronçons de cet ordre, près de 20% de la longueur cumulée est classés en « sec » ou « stagnant ».

Ces conclusions amènent à proposer l'application d'une note en fonction de l'ordre Strahler (cf. Tableau 3). Une note élevée correspond à une très forte probabilité d'être le lieu d'un écoulement pérenne.

Ordre Strahler	> 3	3	2	1
Note	10	8	4	1

Tableau 3 – Note appliquée à chaque tronçon de talweg en fonction de son ordre Strahler

3.2.2. Comparaison pente du tronçon de talweg vs type d'écoulement observé

Une seconde analyse a consisté à représenter la distribution des pentes moyennes agrégées par tronçon de talweg selon les types d'écoulement observés. Le résultat est présenté sous forme de boîtes à moustaches (autrement appelés diagrammes en boites ou diagrammes de Tukey) inventées par Tukey en 1977 pour représenter schématiquement la distribution d'un groupe de valeur.

Elles permettent de visualiser et de comparer la distribution et la tendance centrale des valeurs numériques via leurs quartiles. Les quartiles servent à fractionner les valeurs numériques en quatre groupes égaux en fonction de cinq valeurs clés : 1^{er} décile, 1^{er} quartile (Q1), médiane (Q2), 3^{ème} quartile (Q3) et 9^{ème} décile (cf. Illustration 19).

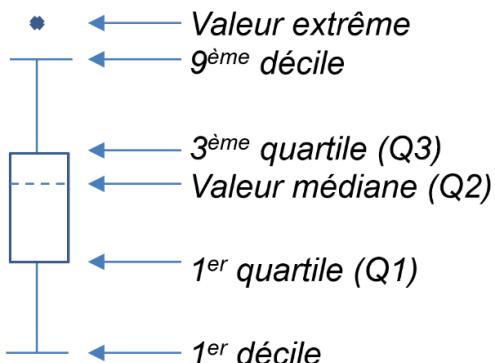


Illustration 19 – Les cinq valeurs clés qui composent une boîte à moustache

Les valeurs extrêmes parfois situées en dehors de la boîte ont souvent valeur de points aberrants.

Le résultat pour l'analyse sur les pentes en Martinique est présenté dans l'Illustration 20 ci-dessous.

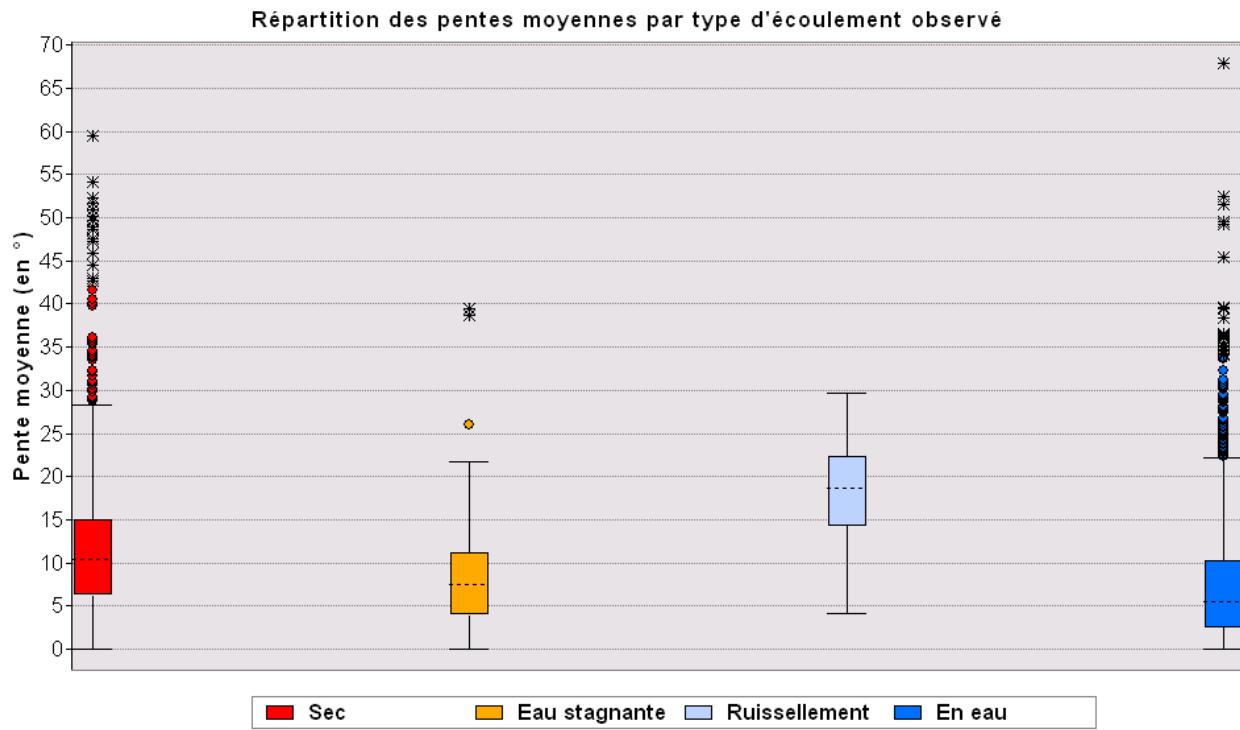


Illustration 20 – Répartition des pentes moyennes des tronçons de talweg selon le type d'écoulement observé dans les quatre sites visités

En mettant de côté le cas des cours d'eau classés en « ruissellement » qui sont peu représentatifs statistiquement car très peu nombreux, et les valeurs extrêmes de ces boîtes à moustaches, on constate que plus la pente est faible, plus la chance d'avoir un cours d'eau en eau est importante.

En effet, 75% des tronçons classés en « stagnant » ou « en eau » s'écoulent sur des talwags de pentes moyennes généralement inférieures à 10°.

Néanmoins, certains tronçons en eau s'écoulent malgré tout sur des talwags parfois très pentus. D'après les observations de terrain, près d'un quart des tronçons « en eau » s'écouleraient sur des pentes supérieures à 10°.

Ces conclusions amènent à proposer l'application d'une note en fonction de la pente moyenne du tronçon (cf. Tableau 4). Une note élevée correspond à une très forte probabilité d'être le lieu d'un écoulement pérenne.

Pente	< 5°	Entre 5° et 10°	> 10°
Note	10	5	3

Tableau 4 – Note appliquée à chaque tronçon de talweg en fonction de sa pente moyenne

3.2.3. Comparaison valeurs de l'indice de position topographique TPI vs type d'écoulement observé

Cette nouvelle analyse s'appuie sur les longueurs cumulées des tronçons de talwags sur les quatre sites visités, cette fois pour chacune des 10 classes de l'indice TPI calculé à partir de la méthode dérivée (cf. Tableau 1).

Pour chaque classe, le pourcentage de longueur cumulée a ensuite été réparti en fonction du type d'écoulement observé sur le terrain. Le résultat de cette analyse est reporté dans l'Illustration 21 ci-dessous.

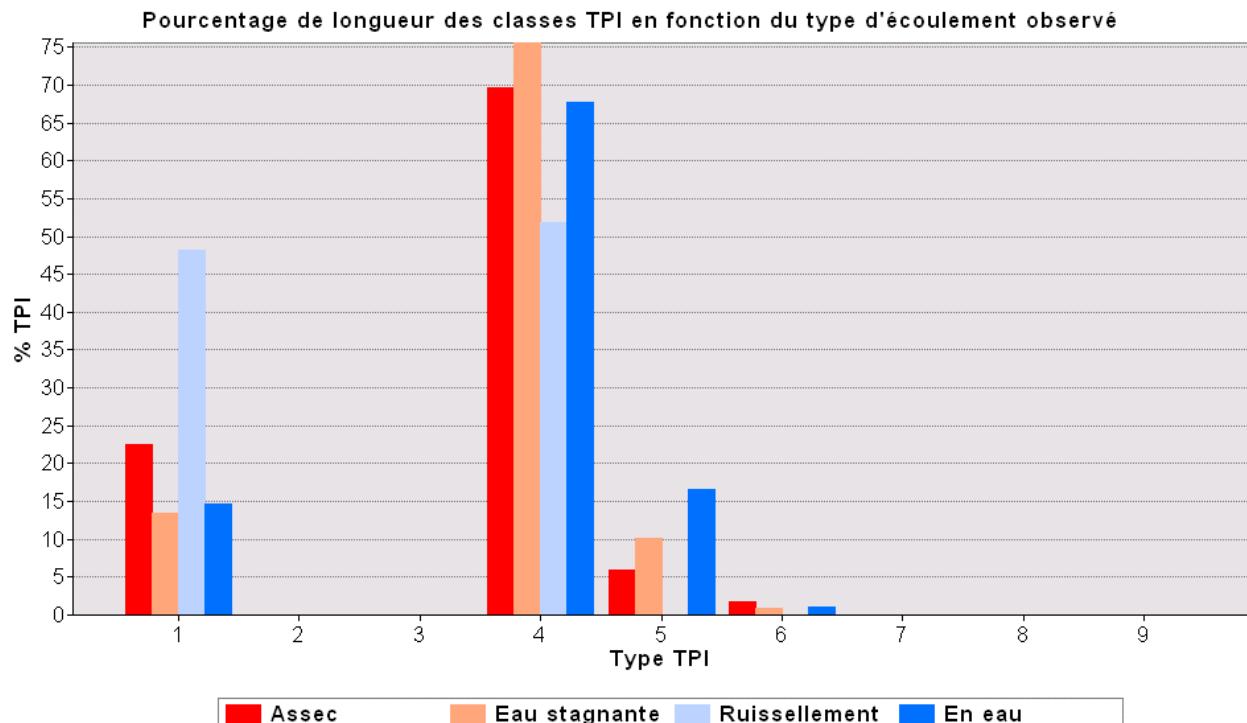


Illustration 21 – Répartition des pourcentages de longueur cumulée des tronçons par classes de TPI en fonction du type d'écoulement observé dans les quatre site visités

Pour compléter la démarche, un autre type de répartition a été mené en se basant uniquement sur les valeurs absolues de longueurs cumulées par classes de TPI (cf. Illustration 22).

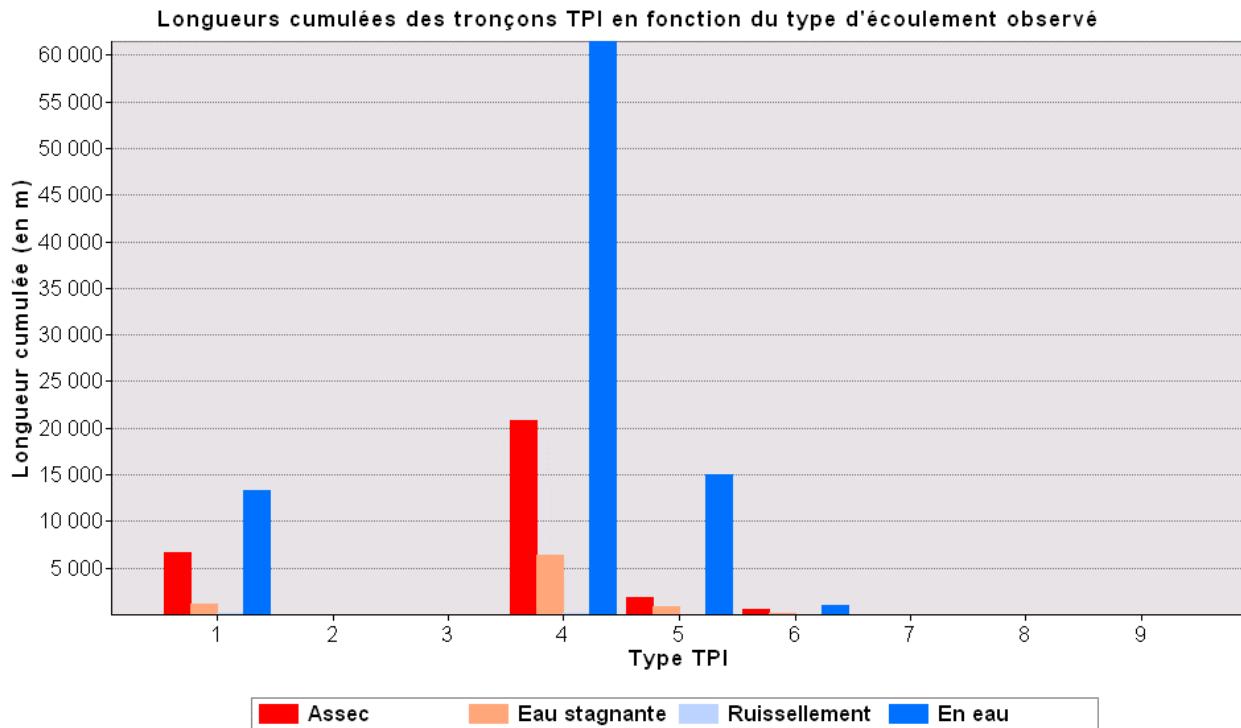


Illustration 22 - Répartition des longueurs cumulées des tronçons par classes de TPI en fonction du type d'écoulement observé dans les quatre sites visités

Dans les quatre vallées ayant fait l'objet d'observation terrain, les résultats de l'analyse géomorphologique TPI montrent une prédominance de « vallées en U ou en auges » (classe 4), de « canyons ou vallées très incisées » (classe 1) et de secteurs de plaine (classe 5). Quelques secteurs sont également classés en « pente raide ou abrupte » (classe 6).

Les talwegs en classe 5 sont quasi-systématiquement « en eau ».

Ces conclusions amènent à proposer l'application d'une note en fonction des classes de TPI (cf. Tableau 5). Une note élevée correspond à une très forte probabilité d'être le lieu d'un écoulement pérenne.

Note appliquée à la classe de l'indice TPI	1/ Canyon, vallée incisée	2/Pente moyenne, vallée peu incisée	3/ Vallée en altitude, limite amont des cours d'eau	4/ Vallée en U (ou en auge)	5/ Plaine
	5	5	5	7	10
6/ Pente raide, abrupte	7/ Haut de pente, partie supérieure du talus, mesa	8/ Petite crête localisée, colline dans une vallée	9/ Crête moyenne, colline dans une plaine	10/ Sommet de montagne, colline élevée, ligne de crête	
3	1	1	1	1	1

Tableau 5 – Note appliquée à chaque tronçon de talweg en fonction de sa classe TPI

3.2.4. Comparaison valeurs de l'indice topographique d'humidité TWI vs type d'écoulement observé

La distribution des valeurs moyennes, maximum et minimum de l'indice topographique d'humidité TWI, agrégés par tronçon de talweg, a ensuite été examinée, en fonction des types d'écoulement observés. Le résultat est présenté sous forme de boîtes à moustaches dans les illustrations ci-dessous.

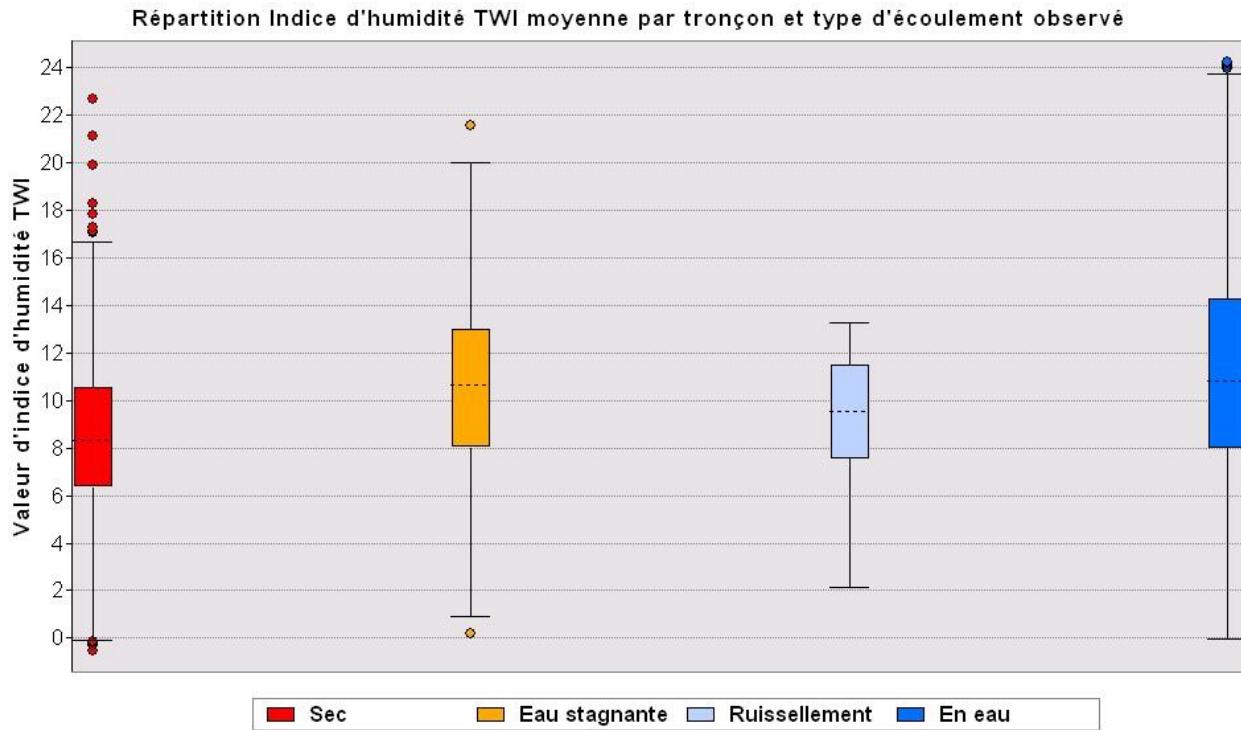


Illustration 23 – Répartition des valeurs moyennes d'indice d'humidité TWI des tronçons de talweg selon le type d'écoulement observé dans les quatre site visités

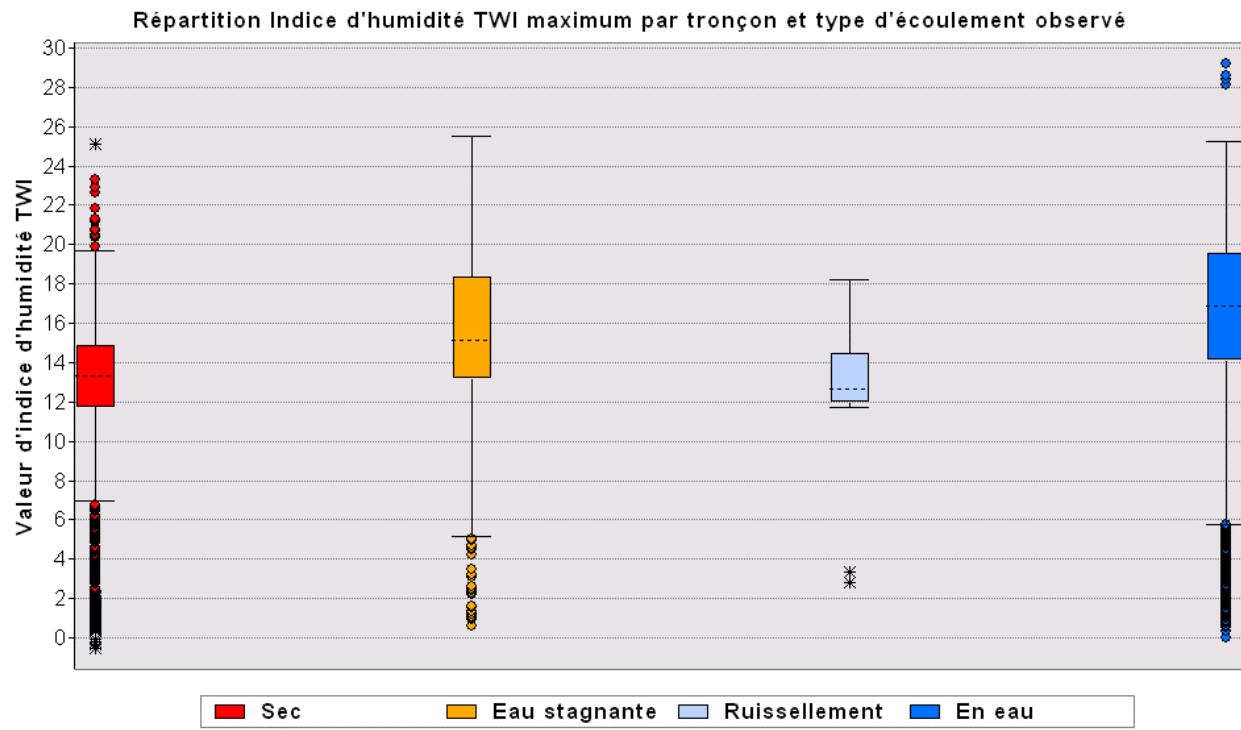


Illustration 24 – Répartition des valeurs maximums d'indice d'humidité TWI des tronçons de talweg selon le type d'écoulement observé dans les quatre site visités

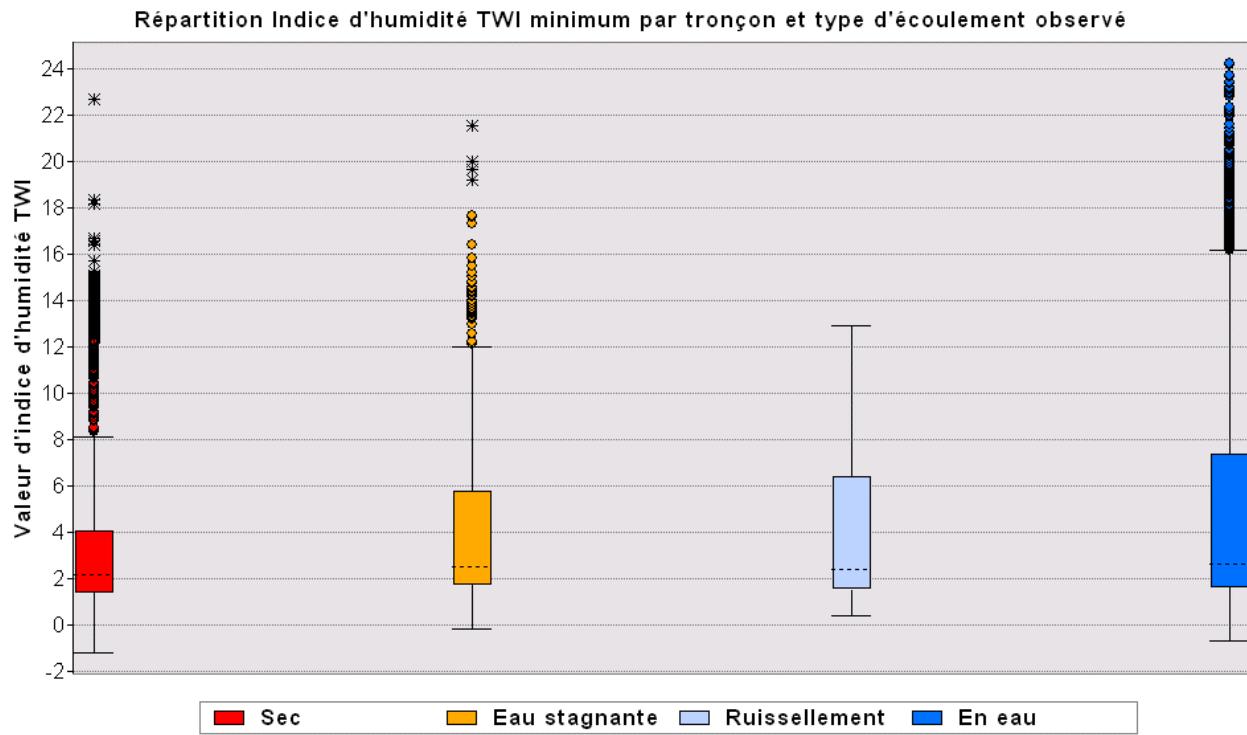


Illustration 25 – Répartition des valeurs minimums d'indice d'humidité TWI des tronçons de talweg selon le type d'écoulement observé dans les quatre site visités

Les deux types d'écoulement « en eau » et « eau stagnante » présentent des distributions de valeurs d'indice TWI assez similaires, mis à part sur les valeurs minimums qui apparaissent peut-être légèrement plus faibles pour le type « eau stagnante ».

La classe « ruissellement » n'étant pas représentative (car peu de tronçons sont caractérisés comme tel), il s'avère donc intéressant de s'appuyer sur les valeurs clés de l'indice TWI pour la classe « assec » pour distinguer les tronçons de cours d'eau entre eux pour ce critère.

Globalement, toute valeur moyenne d'indice TWI dépassant 10, garantit dans une bonne majorité des cas, l'appartenance du tronçon de talweg à une classe autre que « assec ». Toutefois, un croisement des calculs minimums, moyens et maximums de l'indice TWI a été effectué, pour affiner cette classification des tronçons pour ce critère.

Les conclusions de cet exercice amènent à proposer, pour ce critère TWI, la notation proposée dans le Tableau 6 ci-dessous. Une note élevée correspond à une très forte probabilité d'être le lieu d'un écoulement pérenne.

Note appliquée à l'indice TWI	Moy>=10 Max >=15 Min >=8	Moy>=10 Max <15 Min >=8	Moy>=10 Max <15 Min <8	Moy<10 Max >=10 Min>=4	Moy<10 Max<10 Min>=4	Moy<10 Max<10 Min<4
	10	10	5	5	2	1

Tableau 6 – Note appliquée à chaque tronçon de talweg en fonction de sa classe d'humidité TWI

3.3. CONCLUSIONS SUR LE PARAMÉTRAGE DE L'APPROCHE SIG

3.3.1. Mode d'affectation de la note finale par tronçons de talweg

L'approche multicritère entreprise ici établit donc, dans un premier temps, une note pondérée par tronçon de talweg et pour chacun des quatre critères identifiés précédemment. La seconde étape consiste à moyenner ces notes afin de classer ces talweds selon leur « aptitude » à contenir un cours d'eau.

En considérant un poids identique aux quatre critères considérés, les notes moyennes par tronçon unique de talweds ainsi obtenues se répartissent en fonction du type d'écoulement observé sur le terrain comme dans l'Illustration 26.

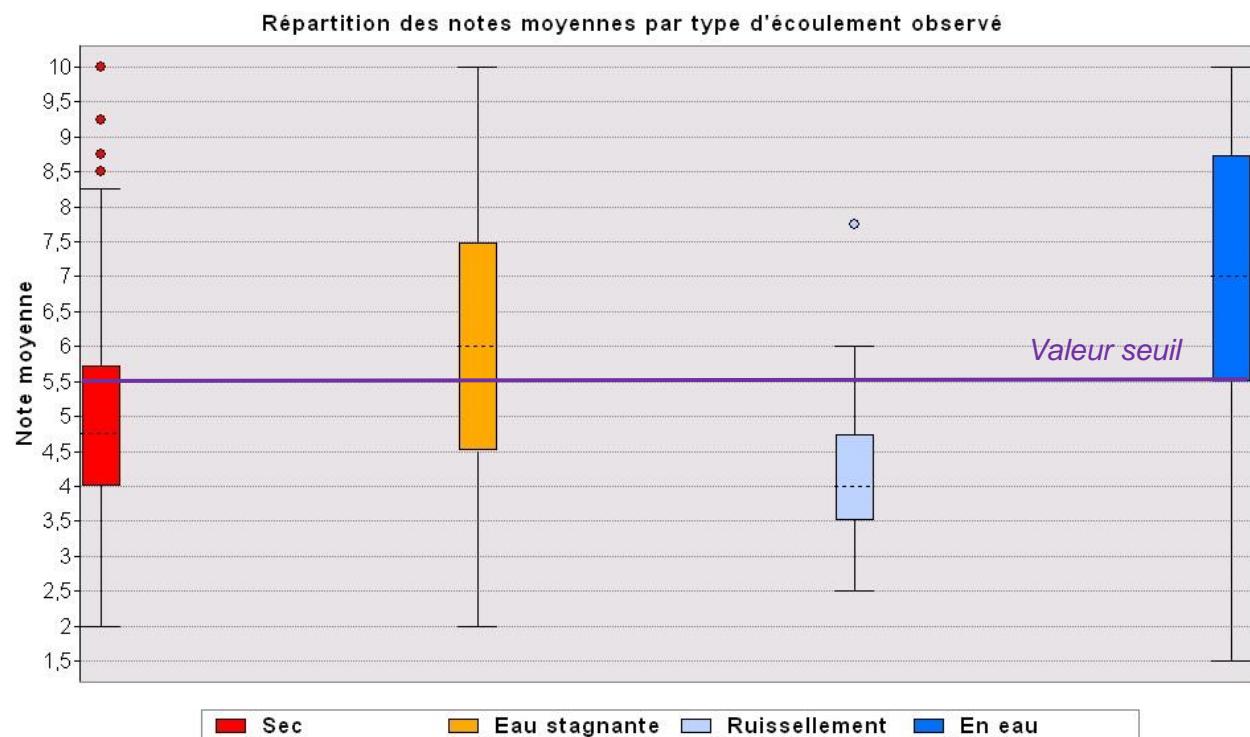


Illustration 26 - Répartition des notes moyennes obtenues pour les tronçons de talweg selon le type d'écoulement observé dans les quatre sites visités

$$\text{Note moyenne} = \frac{\text{Note strahler} + \text{Note pente moy} + \text{Note TPI} + \text{Note TWI}}{4}$$

En mettant de côté les type d'écoulement « eau stagnante » et « ruissellement » (par ailleurs en nombre insuffisant pour ce dernier), il ressort de cette représentation en boîtes à moustaches que la note moyenne de 5,5 constitue une valeur seuil intéressante, dans la mesure où :

- 75% des talweds « secs » présentent une note moyenne inférieure à cette valeur ;
- 75% des talweds « en eau » présentent une note moyenne supérieure à cette valeur.

3.3.2. Validation sur les quatre bassins visités

Si cette note moyenne semble pertinente pour différencier les talweds ayant une forte probabilité de voir de l'eau s'écouler en surface de manière pérenne de ceux étant très probablement intermittents, il semble toutefois nécessaire de vérifier cette hypothèse sur les quatre bassins versants ayant fait l'objet de reconnaissances de terrain.

Cet exercice de validation a été réalisé et montre que l'approche géomorphologique multicritère détaillée jusqu'à présent, utilisant la valeur charnière de 5,5, semble tout à fait pertinente dans la mesure où elle permet de caractériser des tronçons de talweds de façon très similaire à ce qui a été observé sur le terrain.

Une extrapolation à d'autres secteurs non visités semble dès lors tout à fait envisageable.

Néanmoins, certains tronçons présentent des résultats divergents entre observations et résultat de l'approche géomorphologique. Ces différences sont mises en évidence au travers de zones cerclées de rouge, validées par un point GPS et des zones cerclées de noires lorsqu'aucune observation réelle n'a été faite, ce qui fait qu'elles restent encore à confirmer. Ces comparaisons sont présentées en Illustration 27 pour la Rivière Oman et en Annexe 2 pour les rivières Pilote, Vatable et du Vauclin.

Les deux bassins les moins cohérents sont ceux de la rivière Oman pour laquelle quelques tronçons présentent des divergences qu'il faudrait analyser de plus près et ceux de la rivière Vauclin. Pour cette dernière, plusieurs petits cours d'eau affluents ne présentent pas du tout les mêmes réponses (considérés comme plutôt secs selon les observations mais plutôt en eau selon l'approche géomorphologique).

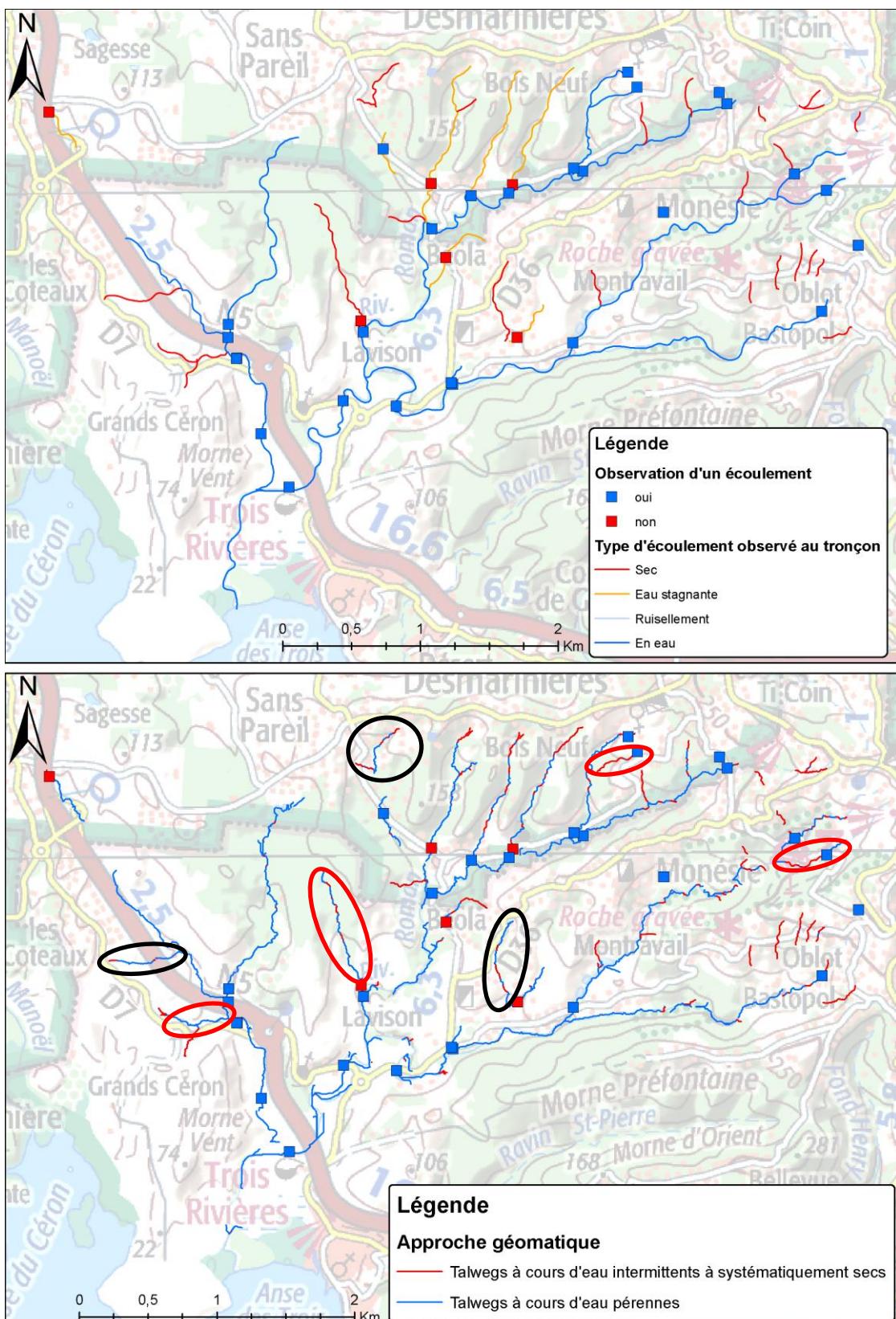


Illustration 27 – Comparaison des observations de terrain et des résultats de l'approche géomorphologique multicritère pour la Rivière Oman

4. Résultats de l'analyse géomorphologique multicritère

4.1. EXTRAPOLATION À L'ECHELLE DE LA MARTINIQUE

Le résultat de cette approche extrapolée à l'ensemble des tronçons de talweds de la Martinique, calculés à partir du MNT au pas de 1 m, est présenté dans l'illustration 28 ci-dessous.

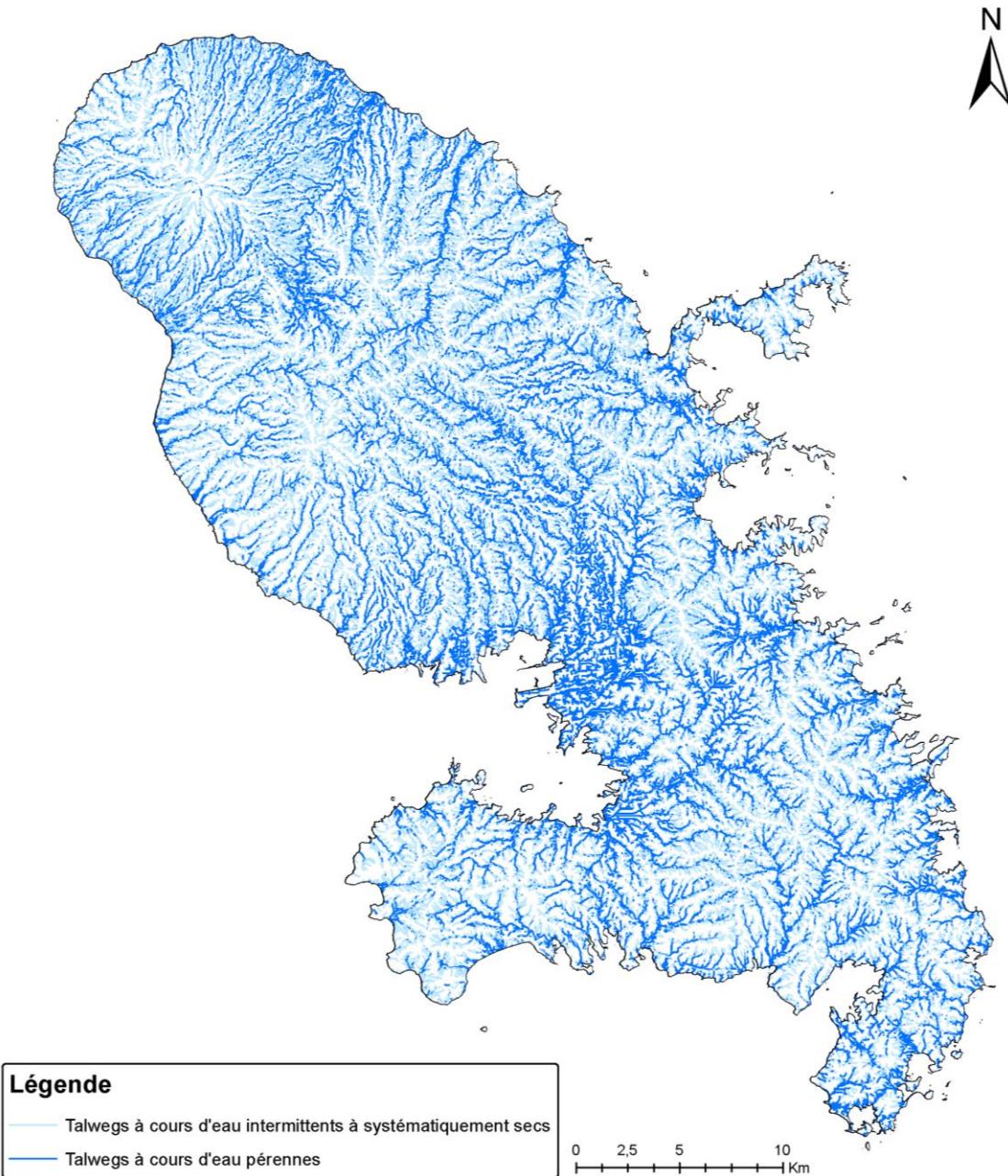


Illustration 28 – Localisation des talweds secs ou à cours d'eau intermittents et des talweds à cours d'eau pérennes d'après l'approche géomorphologique SIG

Cette approche par note moyenne permet de ne pas éliminer arbitrairement des brins mais plutôt de qualifier, du point de vue géomorphologique, leur potentiel plus ou moins important à être le lieu d'un écoulement en eau pérenne.

Le résultat de ces calculs se porte sur le réseau de talweg tiré du MNT et non sur une cartographie du réseau de drainage hydrographique existant. **Il ne s'agit pas ici d'une cartographie des cours d'eau pérennes et intermittents mais bien d'une caractérisation du potentiel qu'à chaque talweg à collecter et faire s'écouler (ou non) de l'eau de façon pérenne**, sur la base d'une analyse géomorphologique. Il est absolument nécessaire de valider ces résultats par de la connaissance locale (en complément de ce qui vient d'être fait sur les quatre bassins visités) et des reconnaissances terrain et de raccrocher ces résultats à une véritable cartographie du réseau de drainage de surface.

4.2. DISCUSSIONS ET PRÉCONISATIONS

L'hypothèse de départ qui justifie cette approche géomorphologique multicritère est que la géomorphologie d'un territoire reflète de manière indirecte la géologie et le climat. Le relief, représenté dans un SIG au travers d'un MNT, a donc été façonné par les mouvements géologiques et climatologiques (Calloz et Collet, 2011). Les écoulements qui ont lieu en surface sont également étroitement liés à cet ensemble de processus.

L'approche multicritère proposée a pu être étalonnée et ajustée grâce aux observations réalisées en mai et juin 2017 sur le terrain. Il semble raisonnable de penser qu'elle est déployable vers d'autres secteurs mal connus de l'île, mais sous certaines conditions. En effet, ce qui est reproductible sur d'autres secteurs aux contextes similaires à ceux visités sur le terrain pourrait l'être beaucoup moins dans des contextes qui s'avèrent bien différents. Ces reconnaissances terrain se sont concentrées uniquement dans la moitié Sud de l'île. Conserver cette approche multicritère en l'état et l'extrapoler sur l'ensemble de l'île apparaît donc assez discutable au vu de l'hétérogénéité des contextes climatiques, pédologiques, géologiques et hydrogéologiques qui règnent sur l'île (notamment entre le Nord et le Sud justement).

D'autres visites de terrain sont donc nécessaires, dans des secteurs préalablement ciblés du fait de leur singularité. Ceci permettra (i) de renforcer la robustesse des valeurs seuils choisies pour les quatre critères identifiés jusqu'à présent, (ii) de les ajuster si nécessaire pour répondre à des besoins non rencontrés dans la moitié Sud de l'île, voire également (iii) d'ajouter un ou plusieurs nouveaux critères à cette approche novatrice. Dans les secteurs à accès limité, l'exploitation de l'imagerie infrarouge issue de la BD Ortho de 2017 (@IGN) pourrait être testée.

Un croisement des secteurs observés avec la carte pédologique de la Martinique (cf. Illustration 29) réalisée par l'IRD suffit à constater que certains grands types de sols n'ont pas fait l'objet d'une reconnaissance de terrain, en particulier ceux rencontrés dans la moitié Nord de l'île (sols bruns, andosols, sols peu évolués sur cendres...).

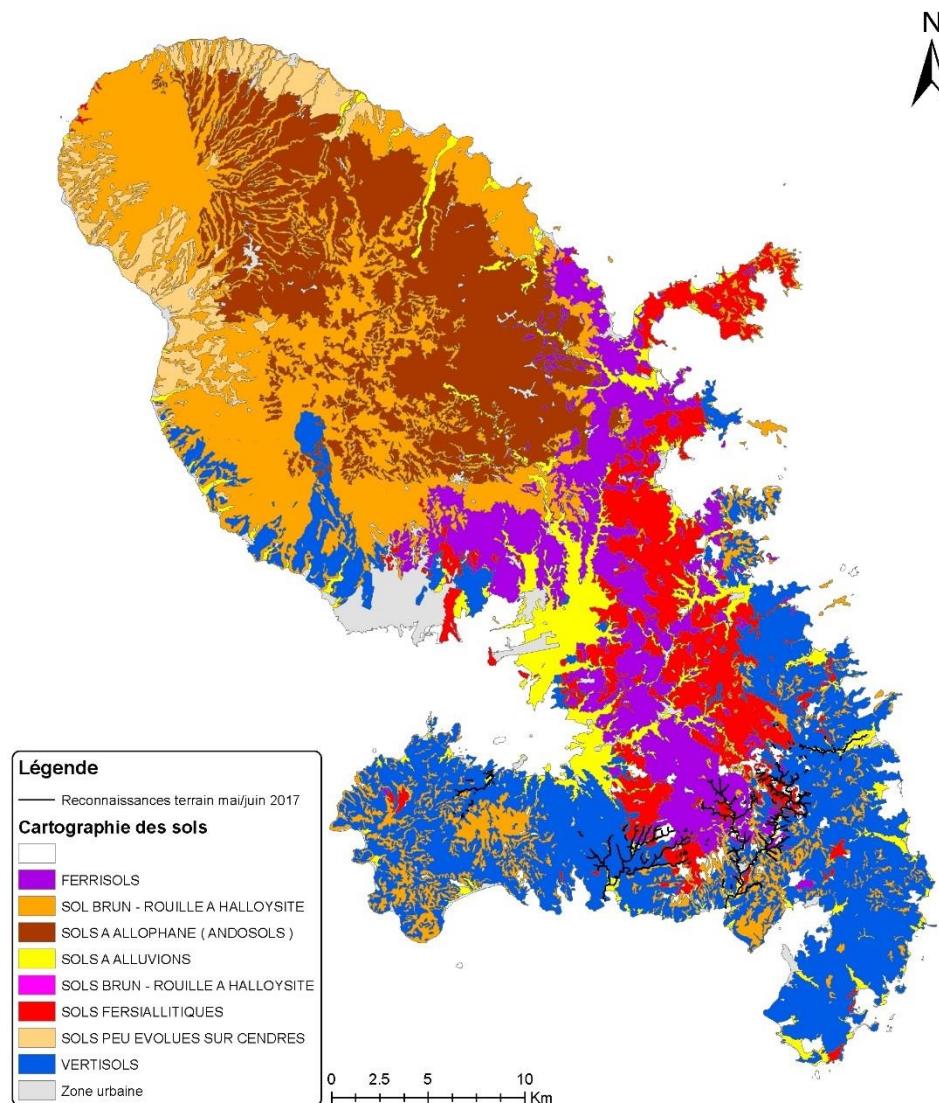


Illustration 29 – Cartographie des sols de la Martinique (IRD)

Il faudrait *a minima* mener un travail similaire de comparaison des résultats de l'approche SIG avec des observations terrain dans ces secteurs manquants. Mais plus encore, l'ajout d'un cinquième critère relatif à la perméabilité moyenne caractérisant les différents types de sols de cette carte pourrait apporter des éléments complémentaires aux seuls indices géomorphologiques utilisés jusqu'à présent. Une autre possibilité serait d'exploiter la cartographie des entités hydrogéologiques affleurantes du référentiel BDLISA et de s'appuyer sur la classification GTR des sols et roches (norme NF P 11 300) pour en ressortir une perméabilité moyenne et différencier ainsi les tronçons de talwegs en fonction du sol sur lesquels ils se trouvent.

Un autre critère complémentaire pourrait être celui des précipitations efficaces¹. En effet, à titre d'exemple, la carte de la pluie efficace moyenne interannuelle, calculée sur la période 1991 –

¹ Exprimées en mm, elles sont égales à la différence entre les précipitations totales et l'évapotranspiration et peuvent être calculées directement à partir des paramètres climatiques et de la réserve utile du sol. L'eau des précipitations efficaces est répartie, au niveau du sol, en deux fractions : l'écoulement superficiel et l'infiltration (source : EauFrance)

2010 lors des travaux de Arnaud *et al.* (2013) sur le changement climatique, met en lumière une séparation nette entre la moitié Nord et Sud de la Martinique pour ce critère (cf. Illustration 30).

Le domaine Nord présente des valeurs de pluie efficace particulièrement élevées (jusqu'à 5200 mm/an sur la Montagne Pelée) alors que la moitié Sud, présente des valeurs bien plus faibles (généralement <1000 mm/an) avec un minimum à 55 mm/an au niveau de la commune du Vauclin.

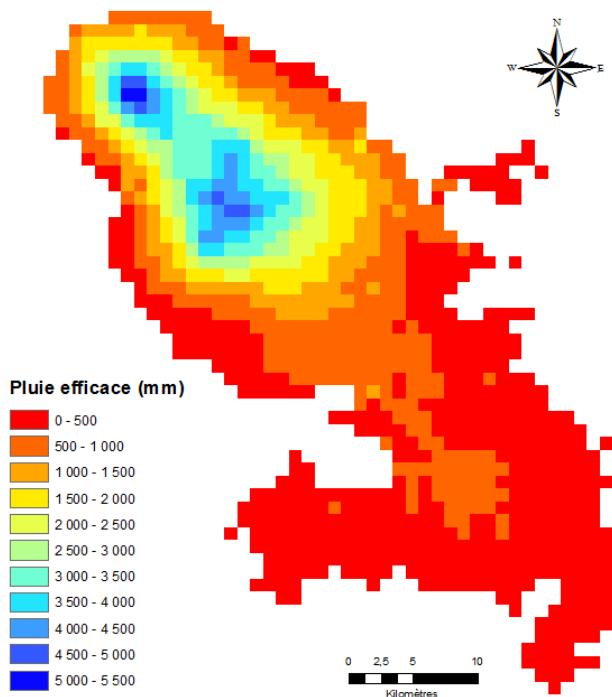


Illustration 30 - Carte de la pluie efficace moyenne interannuelle, calculée sur la période 1991–2010, en mm (Arnaud *et al.*, 2013)

Il se pourrait d'ailleurs que l'approche multicritère envisagée jusqu'alors sur l'ensemble de l'île soit à mener en deux fois (moitié Nord et moitié Sud), avec des classes de valeurs pour chaque critère considéré qui soient adaptées à ces deux contextes bien différents.

5. Conclusion

Pour les besoins de définition des cours d'eau de la Martinique sur la présence/permanence d'un lit naturel, d'un débit suffisant une majeure partie de l'année et d'une source à l'origine, une approche SIG géomorphologique innovante a été développée. Cette approche s'est basée sur le MNT du RGE Alti® au pas de 1 m disponible en Martinique et le croisement des quatre critères suivants que sont (1) la classification par ordre Strahler, (2) les pentes au droit des talwegs et deux indices géomorphologiques que sont (3) l'indice de position topographique (TPI) et (4) l'indice d'humidité du sol (TWI).

Cette approche géomatique multicritère a été validée en la confrontant à des observations terrain menées en mai et juin 2017 sur quatre bassins versants du sud de l'île. Dans un premier temps, il a été établi une note pondérée par tronçon de talweg et pour chacun des quatre critères identifiés précédemment. Puis, la moyenne de ces notes a permis de classer ces talwegs selon leur « aptitude » à contenir un cours d'eau. En considérant les tronçons caractérisés sur site « en eau » ou « assec », il est ressorti que la note moyenne de 5,5 constitue une valeur seuil intéressante. Cette validation qui s'est avérée très satisfaisante sur les quatre bassins versants étudiés a permis de proposer une première extrapolation à l'ensemble des tronçons de talwegs de la Martinique. Cette proposition met en exergue les talwegs très probablement systématiquement à sec ou en eau par intermittence et les distingue de ceux considérés comme étant les lieux d'un écoulement de surface pérenne. Il ne s'agit néanmoins pas d'une cartographie des cours d'eau pérennes et intermittents.

En effet, au regard de l'importante hétérogénéité climatique, pédologique, géologique et hydrogéologique qui règne sur l'île (notamment entre le Nord et le Sud justement), conserver cette approche multicritère en l'état et l'extrapoler sur l'ensemble de l'île reste arbitraire. Il apparaît donc indispensable :

- de réaliser de nouvelles reconnaissances de terrain pour renforcer la robustesse des valeurs seuils choisies des quatre critères identifiés et éventuellement d'exploiter l'imagerie infrarouge de la BD Ortho de 2017 (®IGN) dans les secteurs à accès limité ;
- d'ajuster si nécessaires, la pondération de ces critères pour répondre à des besoins non rencontrés dans la moitié sud de l'île.

De plus, cette approche exploratoire à partir d'indices géomorphologiques pourrait être complétée en testant de nouveaux paramètres d'entrées telles que la perméabilité des sols traversés par les talwegs ou l'hétérogénéité spatiale des précipitations efficaces, en essayant de se raccrocher à une cartographie précise du réseau de drainage existant en Martinique.

Il n'est pas exclu que cette approche multicritère envisagée jusqu'alors sur l'ensemble de l'île soit à mener en deux fois (moitié Nord et moitié Sud), avec des classes de valeurs pour chaque critère considéré, adaptées à ces deux contextes bien différents.

6. Bibliographie

- Arnaud L., Lanini S** (2014). Impact du changement climatique sur les ressources en eau de Martinique. Rapport BRGM/RP-62676-FR.
- Calloz R., Collet C.** (2011). Analyse spatiale de l'information géographique. Science et Ingénierie de l'Environnement. Presses polytechniques et universitaires romandes. ISBN 978-2-88074-902-6.
- Gessler P.E., Moore I.D., McKenzie N.J., Ryan P.J.** (1995). Soil-landscape modeling and spatial prediction of soil attributes. International Journal of GIS. 9(4):421-432.
- Jenness J.** (2004). Calculating landscape surface area from digital elevation models. Wildlife Society Bulletin 2004, 32(3):829–839.
- Jenness J.** (2006). Topographic Position Index (tpi_jen.avx) extension for ArcView 3.x, v. 1.2. Jenness Enterprises. Available at: <http://www.jennessent.com/arcview/tpi.htm>.
- Jenson S.K., Domingue J.O.** (1988). Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 54 (11): 1593-1600.
- Sauquet E.** (2000). Une cartographie des écoulements annuels et mensuels d'un grand bassin versant structurée par la topologie du réseau hydrographique. Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Tarboton D.G., Bras R.L., Rodriguez-Iturbe I.** (1991). On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data. Hydrological Processes, Vol. 5, 81–100.
- Tribe A.** (1992). Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models: a review and a new method. Journal of Hydrology, 139: 263-293.
- Tukey J.W.** (1977). « Exploratory Data Analysis » - EDA, Reading, MA, (Addison-Wesley).

Annexe 1

Compte-rendu de réunion du 28 juillet 2016

Réf. : DAT/GIR AT/BRGM MAR/16-061

Fort de France, le 01/08/2016

COMPTE RENDU DE RÉUNION	
Rédacteur : Anne-Lise Tailamé	Entité : DAT/GIR AT/BRGM MAR
Projet : Définition des cours d'eau de Martinique (Phase 1)	Numéro : AP15MAR019
Objet : Copil d'avancement n°1	
Date : 28/07/2016	Lieu : BRGM MAR
Participants : DEAL : O. Perronet, J.-Y. Lambert, M. Hauuy ; ODE : F. Rateau ; BRGM : B. Vittecoq, A. Brugeron (visio), A.-L. Tailamé	
Absents : Météo France : P. Palany, F. Gibier ; ODE : G. Hiellard, L. Mangeot ; DEAL : P. Marras, C. Gros	
Diffusion externe : participants et absents En cas de diffusion exteme visa et nom du responsable : B. Vittecoq	

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS
<p>1 – Suite à la réunion de lancement du projet de définition des cours d'eau du 10/03/2016, le COPIL se réunit afin de faire un point d'avancement du projet.</p> <p>La présentation projetée et distribuée en séance est jointe au présent compte-rendu (format PDF). La présentation est assurée, après un tour de table, par A. Brugeron, en visio depuis Orléans.</p>
<p>2 – Rappel du contexte et des objectifs du projet</p> <p>Partenaires : DEAL, ODE(Onema), BRGM Budget : 40k€ H.T. Durée : 12 mois</p> <p>Pour rappel la définition d'un cours d'eau selon la circulaire 02/03/05 est la suivante :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Présence et permanence d'un lit naturel à l'origine ; - Permanence d'un débit suffisant une majeure partie de l'année ; - alimentation par une source. <p>En Martinique, l'arrêté préfectoral du 8 décembre 2011 classe les cours d'eau selon un caractère permanent ou temporaire. Suite à cet arrêté plusieurs contestations ont été portées auprès de la DEAL.</p> <p>Une des difficultés réside à définir, sous le climat tropical de la Martinique et ses spécificités géologiques, hydrogéologiques et hydrologiques, ce qu'est un débit suffisant et comment qualifier une durée correspondant à une « majeure partie de l'année ».</p>
<p>IM 192 (8/07/2013)</p>

L'objectif du projet est de développer de nouveaux indicateurs qui permettront de pouvoir classer les cours d'eau en permanent ou temporaire et de pouvoir justifier ce classement par une méthodologie détaillée.

Initialement cette convention ne fait l'objet que du travail géomatique. A son issue des recommandations doivent être faites pour dimensionner une phase 2 d'investigations complémentaires de terrain.

3 - Présentation des premiers travaux

Les travaux et calculs suivants ont été réalisés depuis le précédent COPIL :

- Identification et calcul de trois nouveaux indices géomorphologiques, sur la base du MNT à 1 m :
 - Indice topographique d'humidité du sol (TWI)
 - indice de position topographique (TPI)
 - Indice de rugosité. Ce dernier indice ne sera pas retenu par la suite car il présente une similarité trop importante avec le TPI
- Calcul du réseau de talweg à partir du MNT 1m, avec classification strahler ;
- Calcul des pentes pour chaque tronçon ;

La mise à jour de l'IDPR a quant à elle été écartée, la méthode de calcul de cet indice ne pouvant s'affranchir d'une cartographie du réseau hydrographique existant.

- Les nouveaux indices et calculs (pentes, classification strahler) ont été présentés avec un zoom sur le secteur de Rivière Pilote comme support de réflexion.

Les résultats obtenus sont très satisfaisants, malgré un chevelu très important, et quelques artefacts du MNT au niveau de certaines routes.

L'étape suivante est maintenant de définir, pour chacun des indices (et notamment pour le TWI), les valeurs de seuil qui permettront de classer chaque tronçon en permanent ou temporaire. Il est également nécessaire, dans le cadre d'une cartographie multicritère regroupant différents indices/calculs, d'intégrer des pondérations selon les critères et leur importance.

A ce stade, le COPIL a acté qu'il s'avérait nécessaire de disposer d'éléments de calage sur le terrain pour pouvoir poursuivre le travail.

3 - Suite à donner

Afin de pouvoir cibler les cours d'eau à investiguer sur le terrain, qui serviront à constituer des éléments de calage, il a été proposé de réaliser une sectorisation de la Martinique en unités homogènes. Dans un second temps quelques cours d'eau représentatifs seront retenus pour y réaliser les investigations de terrain.

Le BRGM va donc proposer une ou plusieurs sectorisations selon plusieurs critères (géologie / hydrogéologie, zones pluviométriquement homogènes, cartographie de la pluie

efficace...), en se basant sur les données existantes dans ses archives. L'inventaire des sources sera également intégré au SIG, la présence d'une source fournit un indice de fiabilité élevé sur la présence d'un cours d'eau en aval (dans la plupart des cas).

En parallèle, sera réalisé la recherche des paramètres permettant de s'approcher des résultats de l'arrêté ; les différences mises en évidence entre les deux couches seront un point de départ de réflexion.

Des propositions de découpages seront soumises d'ici fin septembre / octobre aux membres du COPIL pour validation.

Par la suite quelques cours d'eau seront choisis en fonction de leur représentativité et de la connaissance actuelle du terrain, sur lesquels sera réalisée une investigation plus précise, pour servir de calage.

Parmi les zones déjà évoquées : Case Navire, Oman et rivière salée (?) sont connus de l'ODE. Le BRGM va regarder dans ses archives les données à disposition parmi l'ensemble des cours d'eau déjà investigués dans le cadre de diverses prospections hydrogéologiques. En parallèle la DEAL va rechercher les dossiers relatifs aux contestations de l'arrêté afin de servir également de points de calage.

L'ODE fournira au BRGM :

- la cartographie du SDAGE qui pourrait servir comme données de calage, au moins à l'aval des rivières (l'amont n'étant pas vérifié).
- Le référentiel typologique des talwegs, qui pourra être comparé au TPI.

L'ODE insiste également sur l'importance de bancariser des données brutes, exhaustives et réutilisables par la suite. Une harmonisation des données à renseigner sera à définir en amont des campagnes avec les équipes de terrain.

La notion « *d'un débit suffisant une majeure partie de l'année* » implique que les validations de terrain devront être réalisées plusieurs fois au cours de l'année.

A l'issue du travail décrit ci-dessus, le BRGM fera un point financier afin d'identifier ce qui peut être réalisé dans le cadre de la convention actuelle et ce qui devra être programmé dans le cadre de la phase 2.

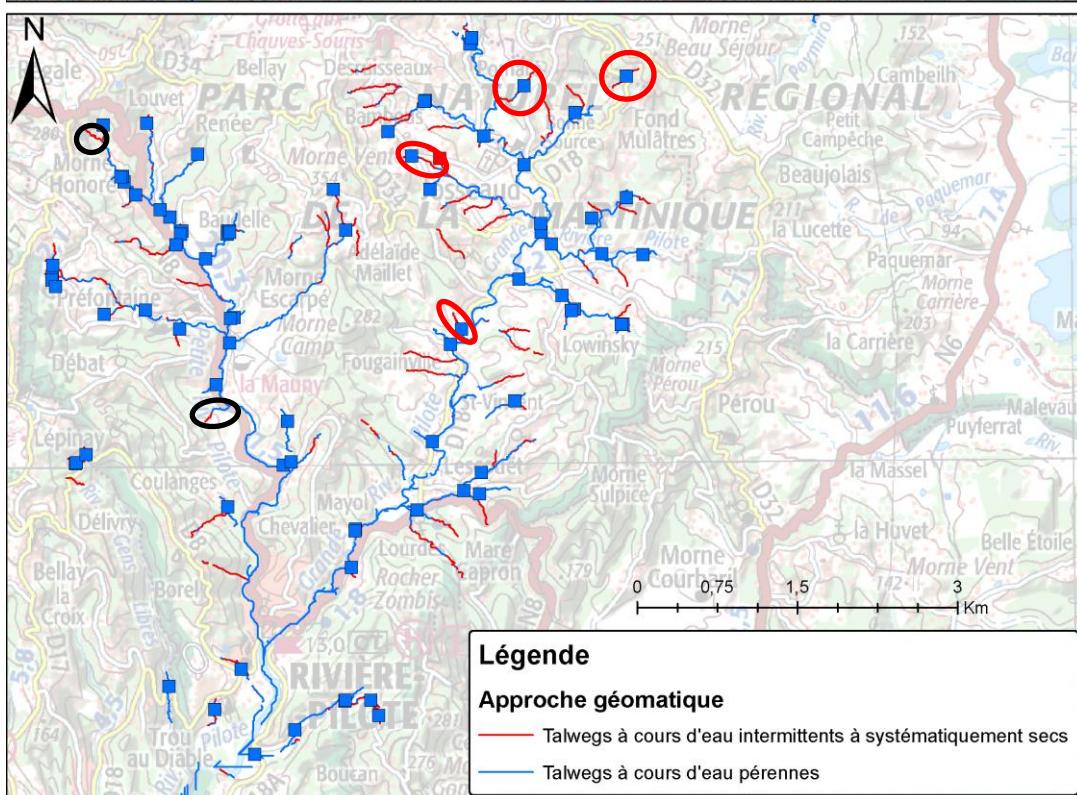
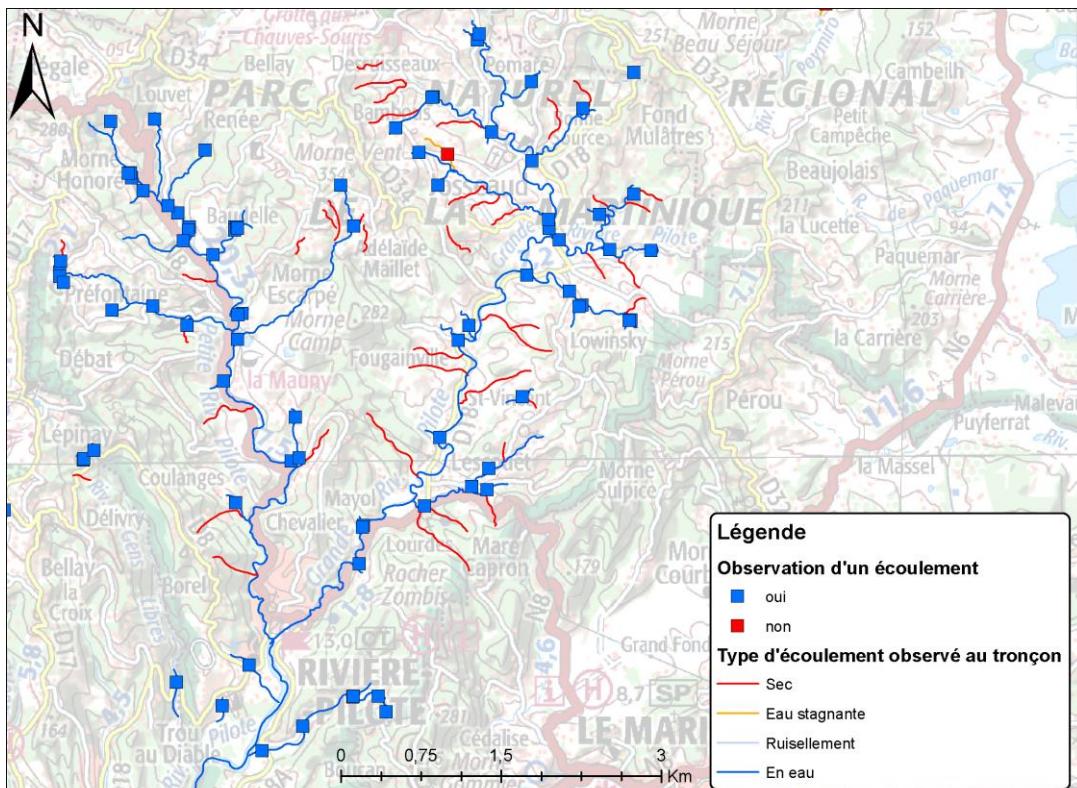
L'utilisation de données indirectes (IR, thermographie...) par image satellite ou aérienne a été évoquée, l'existence de données de ce type étant inconnues sur la région.

Le prochain COPIL est à envisager fin septembre / octobre.

Annexe 2

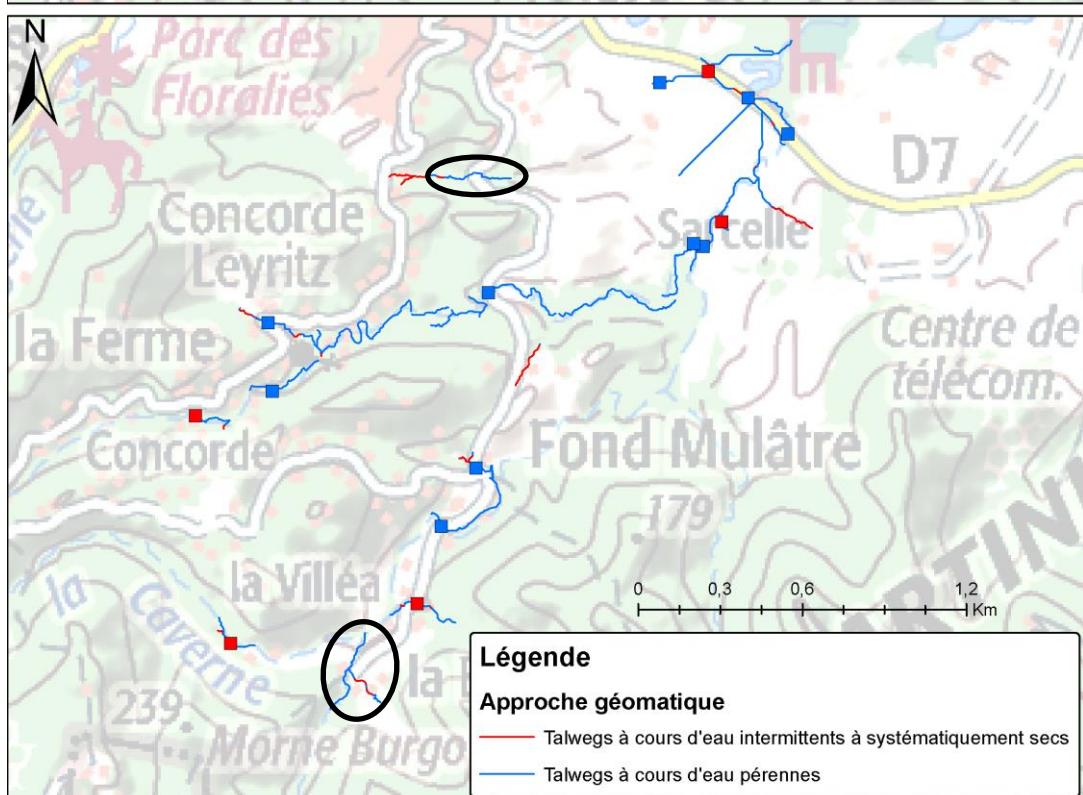
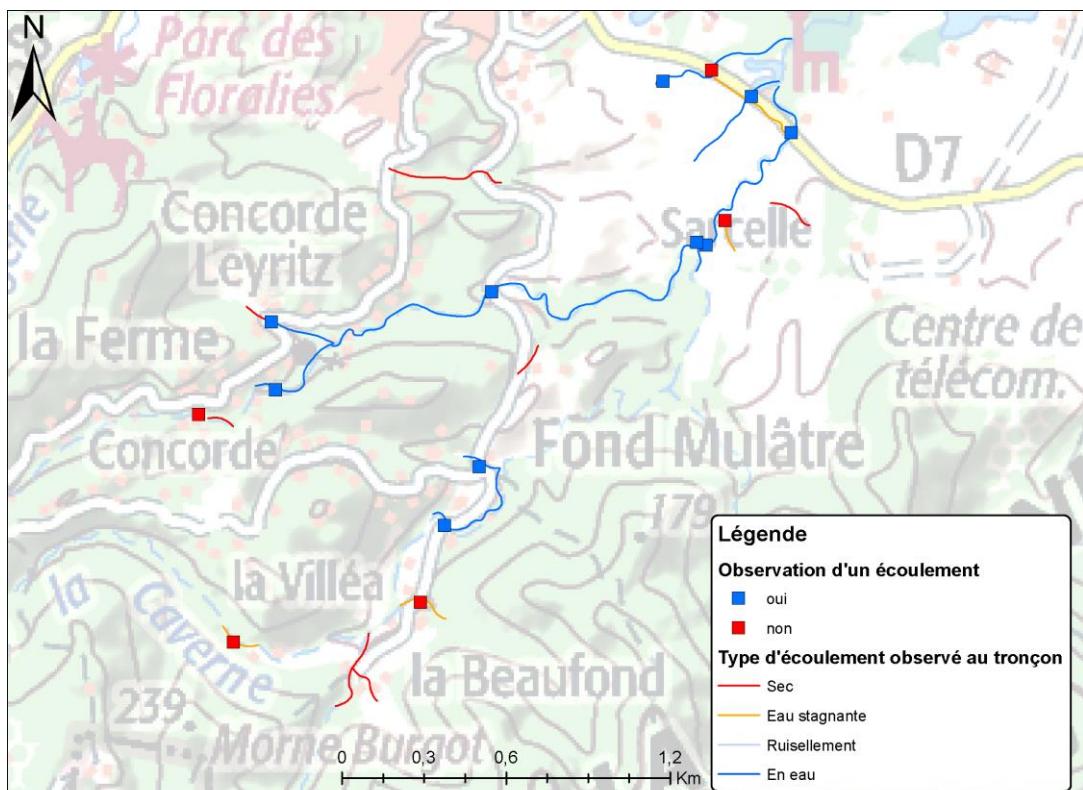
Comparaison des observations de terrain et des résultats de l'approche géomorphologique multicritère pour la Rivière Pilote, Vatable et Vauclin

Rivière Pilote



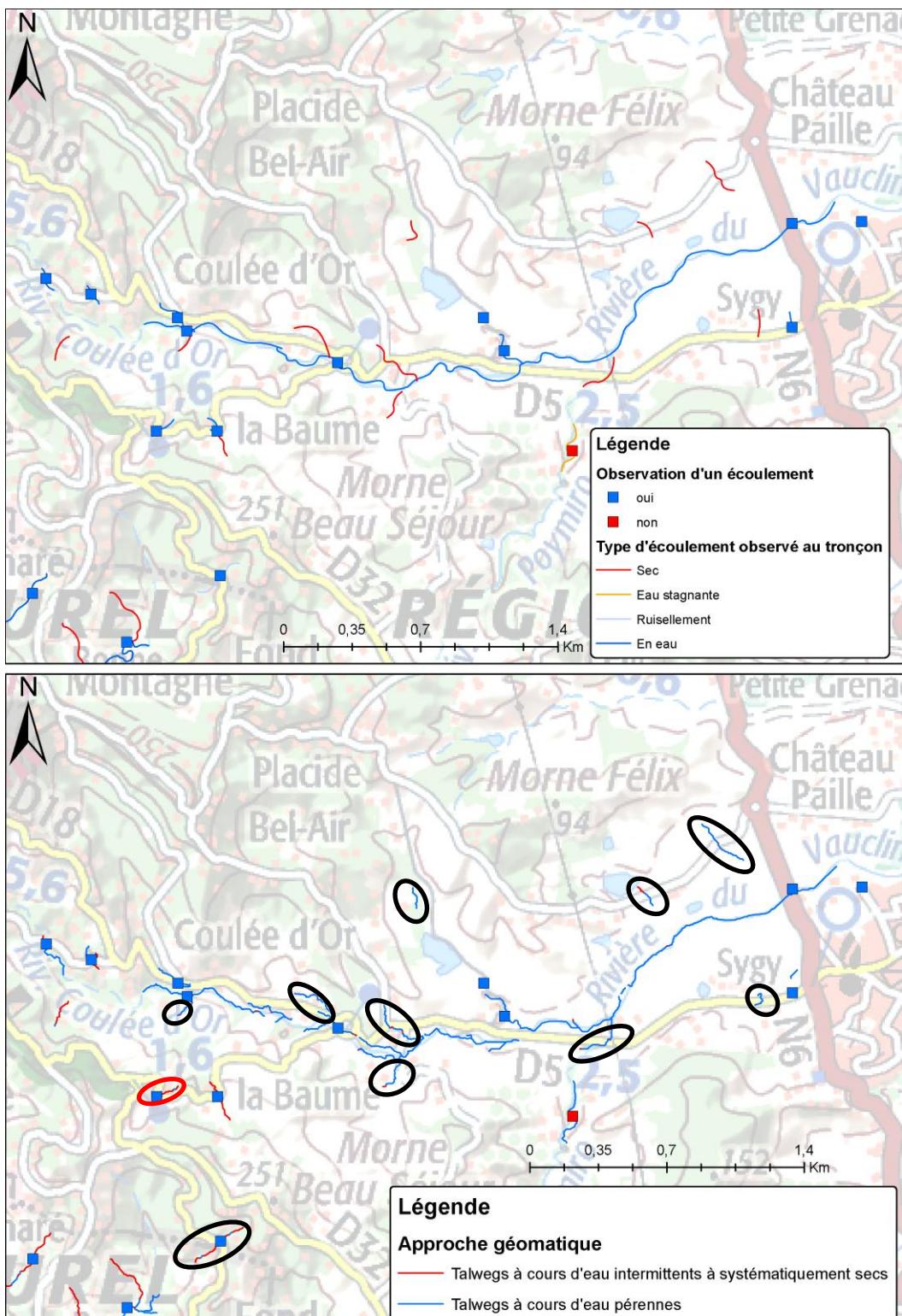
Comparaison des observations de terrain et des résultats de l'approche géomorphologique multicritère pour la Rivière Pilote (différences en zone cerclée, rouge si repérée sur le terrain et noire si à confirmer).

Rivière Vatable



Comparaison des observations de terrain et des résultats de l'approche géomorphologique multicritère pour la Rivière Vatable (différences en zone cerclée, rouge si repérée sur le terrain et noir si à confirmer).

Rivière Vauclin



Comparaison des observations de terrain et des résultats de l'approche géomorphologique multicritère pour la Rivière du Vauclin (différences en zone cerclée, rouge si repérée sur le terrain et noire si à confirmer).



Géosciences pour une Terre durable

brgm

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

Direction régionale Martinique
4, lotissement Miramar
route de Pointe des Nègres
97200 Fort-de-France
Tél. : 0596 71 17 70