



Indicateurs de caractérisation physique des milieux aquatiques.

Elise Wiederkehr, Simon Dufour, Hervé Piégay, Mélanie Bertrand

► **To cite this version:**

Elise Wiederkehr, Simon Dufour, Hervé Piégay, Mélanie Bertrand. Indicateurs de caractérisation physique des milieux aquatiques. : Premiers rendus cartographiques et premières analyses à l'échelle du réseau hydrographique.. 2012. <hal-00828831>

HAL Id: hal-00828831

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00828831>

Submitted on 4 Jun 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Indicateurs de caractérisation physique des milieux aquatiques.
Premiers rendus cartographiques et premières analyses à
l'échelle du réseau hydrographique.

Rapport final

Action n°22 du Programme 2010 au titre de l'accord
cadre Agence de l'Eau ZABR

E. Wiederkehr, S. Dufour, H. Piégay et M. Bertrand
Mars 2012



Rappel des objectifs

Depuis 2007, différents travaux ont été conduits pour développer des outils permettant de faire un état des lieux de l'état biophysique du réseau hydrographique du bassin rhodanien dans le cadre de la mise en œuvre de la DCE sur l'eau. Ces études ont été réalisées à partir d'images dans le but de compléter ou de minimiser les campagnes d'acquisition sur le terrain. Les orthophotographies de la BD Ortho® permettent de faire des études diachroniques et de disposer d'une information continue sur l'ensemble du territoire étudié (Wiederkehr, Dufour & Piégay 2008). En 2008 a été mise en place sur la rivière de la Drôme une méthode permettant l'extraction de métriques à partir des objets «eau», «bancs de galets» et «végétation», issues de la BD Ortho et différents types d'indicateurs ont été proposés (Wiederkehr, Dufour & Piégay 2009). En 2009, les tests ont été poursuivis en focalisant la recherche sur (1) l'objet « eau », en abordant la caractérisation des habitats piscicoles (Wiederkehr, Dufour & Piégay 2010) et (2) la détermination automatique des styles fluviaux (Wiederkehr, Dufour & Piégay 2010). Jusqu'à présent les tests ont été limités au bassin de la Drôme et à des tronçons courts issus du RHP.

L'objectif du travail présenté dans ce rapport est d'étendre le champ d'investigation à l'ensemble du bassin rhodanien et de présenter une première analyse géographique des indicateurs obtenus pour caractériser l'état biophysique du réseau rhodanien. La démarche repose sur l'utilisation d'outils géomatiques appliqués à des données vectorisées afin de caractériser les pressions anthropiques sur l'hydromorphologie. Cette approche permet d'optimiser l'acquisition de données, d'établir des diagnostics de l'état biophysique à large échelle et d'alimenter des modèles permettant d'établir des scénarios d'évolution.

L'action, lancée en 2010 dans le cadre de la convention de recherche qui lie la ZABR (Zone Atelier Bassin du Rhône) et l'agence de l'eau RMC, a été concrétisée par la rédaction :

- d'un rapport présentant la démarche d'extraction d'indicateurs à large échelle tout en précisant les difficultés rencontrées,
- d'un rendu cartographique reprenant les différentes cartes créées à partir de la méthode mise en place

Sommaire

Introduction	5
Partie 1. Principes d'élaboration d'indicateurs de l'état physique des milieux aquatiques	6
Partie 2. Classification automatique des images de la BD Ortho®	7
A. Le point sur la classification des images de la BD Ortho®	7
B. Mise en place d'une nouvelle méthode de classification à partir des données infrarouges de la BD Ortho IRC®	7
Méthode	10
Partie 1. Extraction des objets de la bande fluviale et analyse géographique de sa composition 12	
A. Extraction des données brutes.....	12
B. Représentation linéaire de la bande active : construction d'un nouveau référentiel.....	14
Partie 2. Sectorisation du réseau hydrographique en Tronçons homogènes.....	17
A. Principes et généralités concernant les tronçons géomorphologiques homogènes.....	17
B. Méthode d'extraction des « tronçons homogènes ».....	17
C. Réduction du nombre de TGH	21
Partie 3. Elaboration d'un tableau de données des caractéristiques physiques du réseau hydrographique	22
A. Les métriques calculées à partir des données de la bande active et du fond de vallée	22
B. Les métriques issues du Réseau Hydrographique Théorique (Tableau 3)	25
C. Tronçons géomorphologiques homogènes exploitables	27
Résultats	28
Partie 1. Analyse géographique des linéaires à galets et en eau (Figure 13)	30
A. Par sous bassin hydrographique.....	31
B. Par hydro-écorégion.....	33
Partie 2. Typologie des styles fluviaux à l'échelle du bassin Rhone MediterRanée Corse	35
A. Détermination des styles fluviaux.....	35
B. Analyse des styles fluviaux à l'échelle du bassin RMC	53
Partie 3. Identification des secteurs en tresses à haute valeur patrimoniale.....	56
A. Méthode pour déterminer les secteurs en tresses présentant une forte diversité potentielle d'habitats. 56	
B. Analyse des résultats	57
Partie 4. Détermination des secteurs présentant une forte mobilité latérale potentielle.....	58
A. Définition du modèle de prédiction de l'érosion latérale	58
Discussion et perspectives	61
Partie 1. Un travail méthodologique offrant des perspectives intéressantes	62
A. Élaboration d'indicateurs homogènes et continus sur un réseau hydrographique	62
B. Vers de nouvelles perspectives d'applications	65
C. Vers une typologie des cours d'eau à l'échelle nationale.....	68

Partie 1. La géomatique, un outil clé pour envisager une caractérisation physique du réseau hydrographique.	70
A. Les principaux enseignements à retenir de ces quatre années de recherche	70
B. Et les études de terrain ?	73
Illustrations et références	74

INTRODUCTION

PARTIE 1. PRINCIPES D'ELABORATION D'INDICATEURS DE L'ETAT PHYSIQUE DES MILIEUX AQUATIQUES

L'indicateur se définit comme une métrique ou une combinaison de métriques qui indique un état ou une évolution de cet état. Il permet d'établir un diagnostic et de mettre en place une politique d'actions planifiée à l'échelle d'un territoire ou de réaliser un suivi de cet état permettant de mesurer l'efficacité d'actions (Wiederkehr, Dufour & Piégay 2008). La construction d'un indicateur s'appuie sur un jeu de données spatialisées, où pour chaque objet géographique étudié, différentes métriques seront renseignées. Une métrique peut servir à créer plusieurs indicateurs et un indicateur peut être construit à partir d'une ou plusieurs métriques (Wiederkehr, Dufour & Piégay 2009). Afin d'élaborer des indicateurs qualifiant l'état physique des masses d'eaux à large échelle, il convient dans un premier temps, d'extraire les objets géographiques caractérisant le corridor fluvial qui serviront à la création de métriques (Wiederkehr, Dufour & Piégay 2009) (Figure 1).

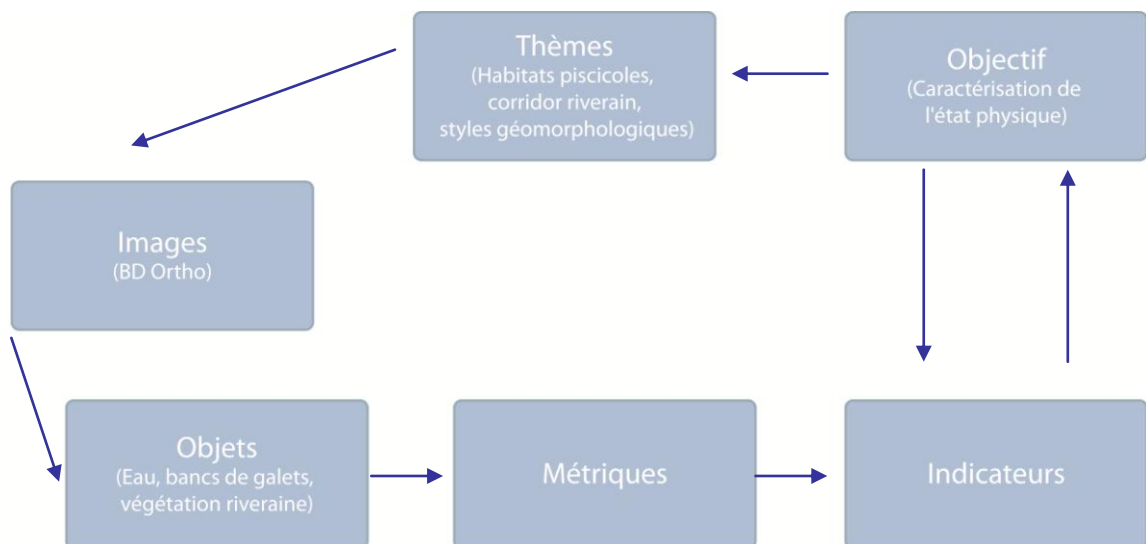


Figure 1. Démarche de création d'indicateurs

A partir des images, différents types d'objets peuvent être extraits (Wiederkehr, Dufour & Piégay 2008). La caractérisation du réseau hydrographique passe ainsi par l'analyse d'un corridor composé de différents types d'objets, parmi lesquels le chenal en eau, les bancs de galets et la végétation riveraine constituent une trame dominante et fournissent des métriques clés pour la définition d'indicateurs. L'identification de ces différents objets est une phase essentielle nécessitant la mise en place d'un protocole d'extraction sous forme vectorielle de ces objets.

PARTIE 2. CLASSIFICATION AUTOMATIQUE DES IMAGES DE LA BD ORTHO®

A. Le point sur la classification des images de la BD Ortho®

Dès 2008, la production d'une méthode automatique a été entreprise afin d'extraire la bande active par classification à partir des orthophotographies de la BD Ortho® de l'IGN. Cette méthode a d'abord été créée et testée sur le linéaire de la Drôme (Wiederkehr, Dufour & Piégay 2009). Les résultats obtenus sont globalement très probants : 91% de la surface est bien classée. De manière plus détaillée, les résultats sont très fiables pour les bancs de galets et la végétation. Pour le chenal en eau, la qualité de détection varie selon la largeur du chenal. En effet, seulement 50% des objets sont bien détectés pour les chenaux les plus étroits alors que dans les secteurs les plus larges le taux de détection peut atteindre les 80%.

Si durant l'année 2010 il a été possible de clarifier le processus de classification des images de la BD Ortho®, des limites sérieuses ont été mises en évidence. En effet, l'application d'une méthode de classification unique à l'ensemble du bassin RMC ne permet pas, dans le temps imparti, de produire une cartographie exhaustive des objets eau, bancs de sédiments et végétation. Ceci est dû 1) aux différences de dates de prise de vue des orthophotographies, 2) aux différences de contrastes sur ces orthophotos et 3) à la forte variabilité de l'occupation du sol, de la profondeur de l'eau et au relief (ensoleillement). De ce fait, l'application de règles de décision de classification sur l'ensemble du bassin RMC a montré que les résultats n'étaient pas suffisamment homogènes au regard de nos exigences et nécessitaient un «nettoyage» manuel très long. Les deux premiers points remettent en partie en question le choix des images supports (Wiederkehr, Dufour & Piégay 2008), et pourraient être théoriquement résolus en ayant recours à d'autres images (à un coût cependant probablement très important pour une résolution spatiale identique). Cependant le troisième point semble plus problématique. La mise à disposition récente de la BD Ortho IRC offre cependant de nouvelles opportunités et nous a conduits à relancer de nouvelles démarches de classification.

B. Mise en place d'une nouvelle méthode de classification à partir des données infrarouges de la BD Ortho IRC®

En 2010, nous avons obtenu un échantillon de la BD Ortho IRC® (infrarouge) sur le département de la Drôme. Ces images sont composées des bandes vertes, rouges et proches infrarouge. De nouvelles règles de classification ont pu être établies très rapidement afin de mettre en évidence les objets eau, bancs de sédiments et végétation et de tester l'intérêt de ce support pour la caractérisation des corridors fluviaux.

1) Méthode d'extraction

La méthodologie développée est la suivante :

1. Cartographie de l'eau

Un filtre médian a été appliqué sur un kernel (noyaux) de 3*3 (pixels) sur les bandes infrarouge et rouge. Deux règles de classification permettent de séparer l'eau des autres objets : la moyenne de la bande 1 (filtre médian sur la bande IR) est inférieure à 80, et le maximum de la bande 2 (filtre médian sur la bande rouge) est compris entre 160 et 200.

2. Cartographie de la végétation

Un ratio des bandes infrarouge sur rouge (de l'image originale) permet de distinguer les zones végétalisées. Le ratio permettant d'isoler la végétation est compris entre -0.7031 et 0.1.

3. Cartographie des bancs de sédiments

Les polygones (eau et végétation) contenus dans le fond de vallée sont ensuite sélectionnés, et les trous sont remplis et identifiés comme bancs de sédiments.

2) Automatisation de la méthode d'extraction

Une chaîne de traitement a été mise en place sous ENVI[®] afin de réaliser une classification orientée-objet. Une segmentation fine a été utilisée afin de détecter les objets (avec un paramètre d'échelle de 15 et un paramètre d'agrégation de 50). La cartographie des bancs de sédiments a été réalisée avec le plugin ETGeowizard[®] du logiciel ArcGIS[®] (ESRI). Cette méthode s'est avérée très efficace en termes de détection des objets (forme et nature) et, le «nettoyage» des résultats a été très limité. La cartographie à l'échelle de l'ensemble du réseau hydrographique de la Drôme a été produite en quelques semaines avec un taux d'erreur avoisinant les 0%.

Afin d'automatiser les procédures de classification, un code python a été développé, celui-ci reposant sur les étapes suivantes :

1. Production du filtre médian,
2. Classification pour la détection de l'eau,
3. Classification pour la détection de la végétation,
4. Séries d'étapes pour obtenir une topologie correcte des résultats (pas de superposition des polygones eau et végétation),
5. Création des polygones bancs de sédiments.

Ce code mis en œuvre uniquement pour la chaîne de traitement de classification orientée-objet fait appel à un code IDL compilé. De ce fait, l'environnement de développement utilisé (Eclipse) avec le

chargement des bibliothèques spécifiques permet de se passer d'une interface graphique ENVI / ArcGIS pour le lancement des codes et donc d'améliorer le temps de calcul. Ce code est donc portable sur un ordinateur.

La cartographie à large échelle de la bande active et de la végétation pourrait donc être relancée, sous réserve d'obtenir l'ensemble de la BD Ortho[®] IRC. Pour la suite de ce rapport, nous avons donc réalisé l'ensemble des démarches post-cartographie avec une information de moins bonne qualité tirée de la BD Topo[®] de l'IGN mais qui permet de tester les procédures géomatiques. Ainsi, lorsque la BD Ortho[®] IRC sera disponible sur l'ensemble du bassin, il sera possible et rapide d'appliquer ces procédures à partir de données de meilleure qualité.

METHODE

Dans cette partie, nous présentons les différentes étapes permettant à partir de données vectorielles, d'extraire in-fine des métriques de caractérisation du corridor fluvial.

Pour y parvenir, nous avons :

- *extrait les objets composant la bande fluviale en distinguant, l'eau des bancs de sédiments.*

- *créé un nouveau référentiel représentant la bande active de manière linéaire*

- *sectorisé le réseau hydrographique en tronçons homogènes.*

- *et enfin, créé une bibliothèque de métriques caractérisant l'état physique du corridor fluvial.*

PARTIE 1. EXTRACTION DES OBJETS DE LA BANDE FLUVIALE ET ANALYSE GEOGRAPHIQUE DE SA COMPOSITION

Pour les raisons présentées ci-dessus, l'extraction des objets «eau», «bancs de sédiments» et «végétation» à l'échelle du bassin RMC à partir de la BD Ortho[®] ne fournit pas dans l'immédiat des résultats pleinement satisfaisants. Or nous avons besoin de ces différents objets pour créer des indicateurs de qualité physique. Dans l'attente des données de la BD Ortho[®] IRC, nous avons choisi d'utiliser les couches vectorielles déjà existantes, comme celles issues de la BD Topo[®] de l'IGN. Cette base de données correspond à une description du territoire et de ses infrastructures sous forme vectorielle. Elle contient également des informations relatives à l'occupation du sol (réseau hydrographique, réseau ferré). Il s'agit d'une source de données déjà interprétées et représentées de manière uniforme sur l'ensemble du territoire. L'utilisation de la BD Topo[®] permet donc de gagner du temps en évitant la phase d'extraction des données vectorielles à partir des images de la BD Ortho[®] (Wiederkehr, Dufour & Piégay 2008). Cependant cette base de données présente plusieurs inconvénients comme le non accès à l'information brute, ou le manque d'informations sur certains départements (la couche végétation ne couvre pas toute la France). L'exploitation de ces données vectorielles permet d'extraire des informations concernant la géométrie et la nature des objets paysagers constituant le corridor fluvial. Pour obtenir le maximum de métriques, il est nécessaire de disposer d'un jeu de données sous deux formes :

- en surfacique, ce qui permettra d'étudier le tracé en plan du réseau hydrographique et,
- en linéaire pour compléter les données sur le profil en long du réseau.

A. Extraction des données brutes

1) Extraction de la bande fluviale à partir de la BD Topo[®]

La bande active est une entité qui intègre les chenaux en eau et les bancs de galets non végétalisés. La bande fluviale correspond à la bande active et aux îles végétalisées. Afin d'extraire de la BD TOPO[®] cette bande active, les éléments de la couche SURFACE_EAU, qui correspondent à la bande active, ont été sélectionnés. Ils sont contenus dans les fonds de vallées et intersectent la couche TRONCON_COURS_EAU ou lui sont adjacents. Les éléments lacs, bassins et gravières ont ensuite été éliminés. Après fusion de tous les éléments des bandes actives, un axe médian est généré. Afin d'avoir une continuité amont – aval, les éléments de la couche TRONCON_COURS_EAU situés entre plusieurs secteurs de bande active non continus sont récupérés. Ces éléments serviront d'axe médian pour les secteurs où la bande active n'a pas été digitalisée. Les axes médians des bandes actives avec ces portions de la couche TRONCON_COURS_EAU sont associés afin d'obtenir un axe médian continu. La nature des éléments de la bande active est ensuite identifiée. Pour les secteurs où la bande active n'était pas digitalisée, les portions de l'axe médian sont identifiées comme fictives. Les entités où le champ Régime indique « permanent » sont identifiées comme les chenaux en eau ; et

pour le Régime « intermittent », les entités sont identifiées comme des bancs de galets non végétalisés.

2) Distinction des objets eau et bancs de sédiments

Sur l'ensemble du bassin RMC, les polygones « bancs », « eau » et « eau + bancs » (Figure 2) représente une superficie de 1 146 km².

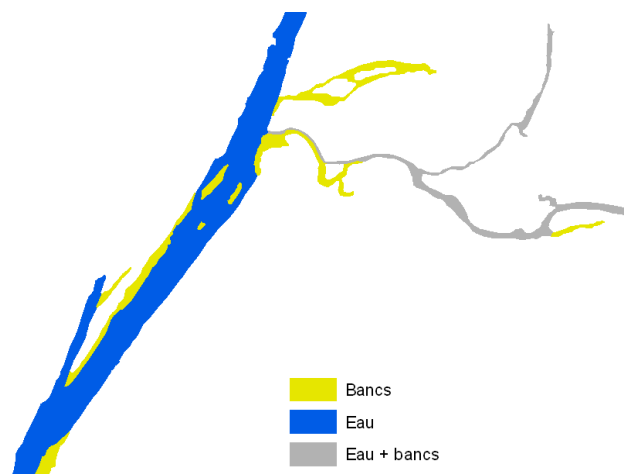


Figure 2. Exemple des polygones extraits à partir de données de la BD Topo®

L'analyse des résultats montre que les polygones en eau couvrent une surface de 836 km² ce qui représente un peu moins des $\frac{3}{4}$ de la surface totale occupée par les bandes actives du bassin RMC (Figure 3). Les bancs de sédiments seuls ne représentent que 16% de cette superficie contre 11% pour les polygones hybrides « Eau + bancs ».

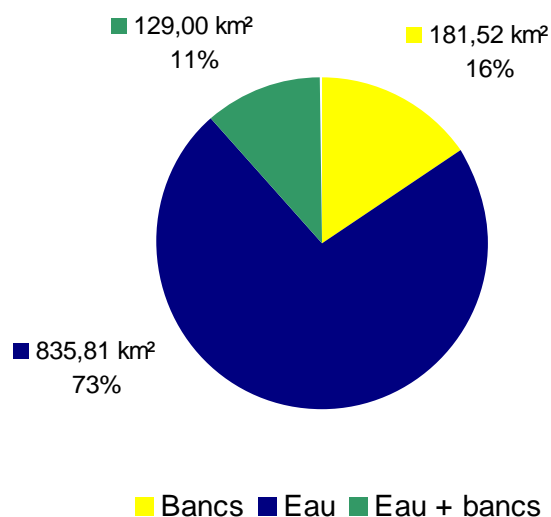


Figure 3. Répartition de la surface de bande active identifiée à partir de la BD Topo®.

Afin de distinguer d'une part les chenaux uniquement en eau et d'autre part les chenaux où des bancs alluviaux sont présents nous avons fusionné les polygones selon les règles définies ci-dessous (Tableau 1) :

Tableau 1. Règles de fusion des polygones « bancs », « eau » et « eau + bancs » pour créer les polygones « Chenal à galets » et « Chenal en eau ». (1 : présence / 0 : absence)

Bancs	Eau	Eau + bancs	Type de chenal
1	0	0	à galets
1	1	0	à galets
1	1	1	à galets
0	0	1	à galets
0	1	1	à galets
0	1	0	en eau

La bande active est construite en fusionnant les polygones « eau » et « à galets ». 75% de ce réseau hydrographique intermédiaire est composée uniquement d'eau.

B. Représentation linéaire de la bande active : construction d'un nouveau référentiel

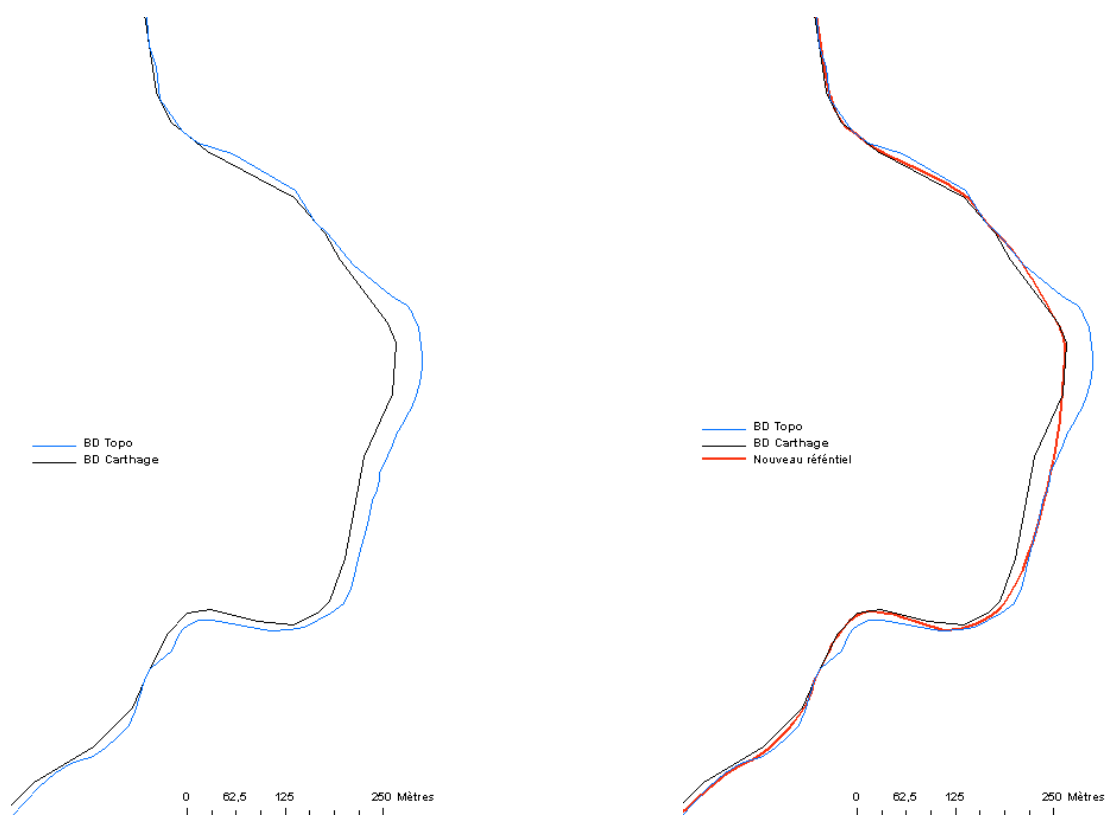


Figure 4. Présentation du nouveau référentiel en fonction de la couche « Hydro » de la BD Carthage et de la couche « Tronçon » de la BD Topo.

Afin de représenter linéairement les informations, il nous fallait disposer d'une couche vectorielle sous forme de polyligne. Les couches vectorielles existantes n'étaient pas satisfaisantes pour être conservées en l'état. La couche « tronçon » de la BD Topo[®] fournit un réseau bien trop dense pour être facilement exploitable. La couche « Hydro » de la BD Carthage[®] offre un réseau plus simple d'utilisation mais son tracé est trop approximatif. Pour résoudre les problèmes liés à ces deux réseaux, nous avons créé un nouveau référentiel issu de la fusion de deux couches (par une fonction d'accrochage, le « snapping ») (Figure 4). Nous obtenons un réseau d'environ 47 220 km de long sur le bassin RMC.

L'intersection de la couche polygone représentant le « chenal en eau » et le « chenal à galets » avec la polyligne du nouveau linéaire permet d'obtenir les informations suivantes (Figure 5) :

- « chenal en eau », représentant 17% du réseau hydrographique, soit 8 042 km.
- « chenal à galets », représentant 11% du réseau, soit 5 180 km.
- « non visible », il s'agit des polygones n'intersectant pas de polygones. Il s'agit, principalement des secteurs où la bande active est seulement schématisée sur la BD Topo[®] et non pas représentée dans sa réalité géographique.

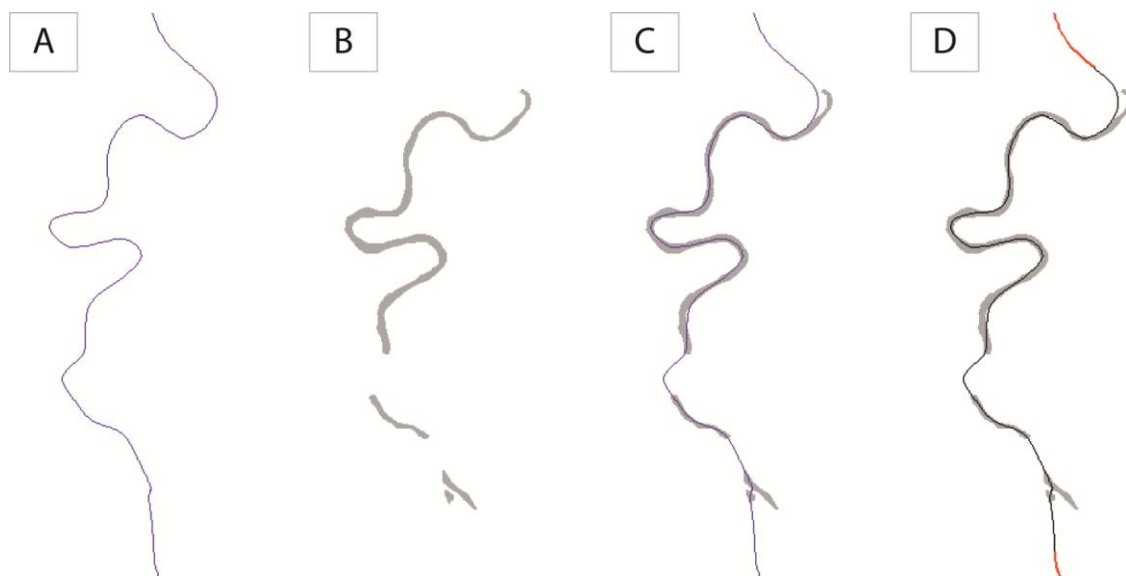


Figure 5. Illustration du linéaire (A) et des polygones (B) à intersecter (C). Présentation du linéaire avec les secteurs intitulés « non visible » en rouge (D).

Dans ce cas, l'information surfacique concernant la bande active, n'a pas été détectée à partir de la BD Topo[®]. Ce linéaire avec une longueur d'environ 34 000 km représente plus de 72% du réseau hydrographique (Figure 6).

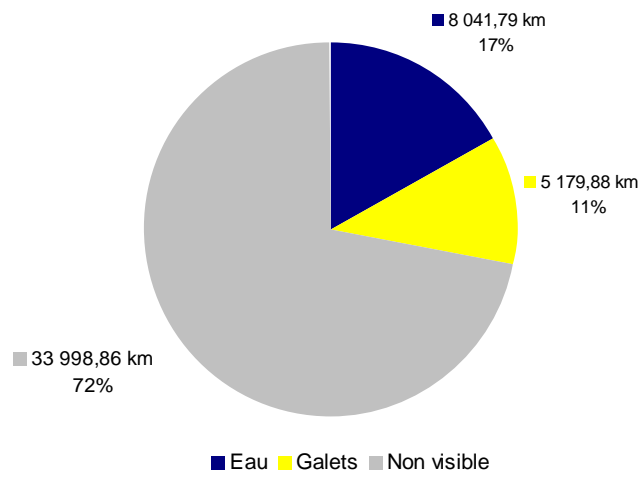


Figure 6. Répartition du type de linéaire sur le bassin RMC.

PARTIE 2. SECTORISATION DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE EN TRONÇONS HOMOGENES

La sectorisation consiste à faire un découpage d'un cours d'eau en secteurs homogènes, sur l'ensemble ou partie de son linéaire, en fonction de différents critères (hydrologique, morphologique ou écologiques) (Schmitt 2001). Comme l'indique (Malavoi, Bravard 2010), un cours d'eau présente des aspects morphologiques et fonctionnels différents de sa source à sa confluence, qui peuvent justifier ce travail de découpage. De fait, la sectorisation est bien souvent utilisée pour des travaux à large échelle (Maire, Wilms 1984)(Valette et al. 2008).

A. Principes et généralités concernant les tronçons géomorphologiques homogènes

Afin d'évaluer la qualité physique sur tout le réseau hydrographique de RMC, il convient d'agréger l'information et de créer ainsi des entités spatiales synthétiques au niveau desquelles des métriques de caractérisation peuvent être extraites (Wiederkehr, Dufour & Piegay 2010, Alber, Piégay 2011). Les entités spatiales créées doivent avoir une signification géographique. Cela rendra la production de métriques et de statistiques associées plus pertinentes (Wiederkehr, Dufour & Piegay 2010, Clément, Piégay 2003). Les unités spatiales retenues ici peuvent être définies comme des tronçons géomorphologiques homogènes (ou TGH), que l'on détermine en première instance en fonction de la largeur de la bande active (caractérisée dans la partie précédente cf. 1)) et de celle du fond de vallée. En effet, la variabilité longitudinale de la largeur du fond de vallée est un indicateur de l'organisation géologique du bassin, permettant de distinguer notamment les tronçons alluviaux des tronçons non alluviaux. Quant à la largeur de la bande active, elle permet de distinguer les tracés en plan en fonction d'un critère important qui est l'excès de charge. Les sections à chenal unique, étroites pour une taille de bassin versant donnée s'opposent ainsi à des sections présentant de nombreux bancs à galets, exondés à l'étiage (Wiederkehr, Dufour & Piegay 2010).

B. Méthode d'extraction des « tronçons homogènes »

Nous avons appliqué le test de Pettitt (Pettitt 1979) (Figure 7), qui permet d'identifier des sous-segments homogènes en moyenne au sein d'une série de valeurs. Il s'agit d'un test non paramétrique qui est une variante du test de Mann-Whitney, conçue à l'origine pour deux échantillons distincts. La statistique U_d, N suppose que pour chaque distance d avec une valeur entre 1 et N , les deux séquences longitudinales (X_i et X_j) pour $i = 1$ à d et pour $j = d + 1$ à N appartiennent à la même population. La variable qui doit être testée est le maximum, en valeur absolue, de la variable U_d, N . Ce test est ainsi appliqué ici pour identifier des tronçons homogènes en moyenne en termes de largeur de bande active, ou de largeur de fond de vallée.

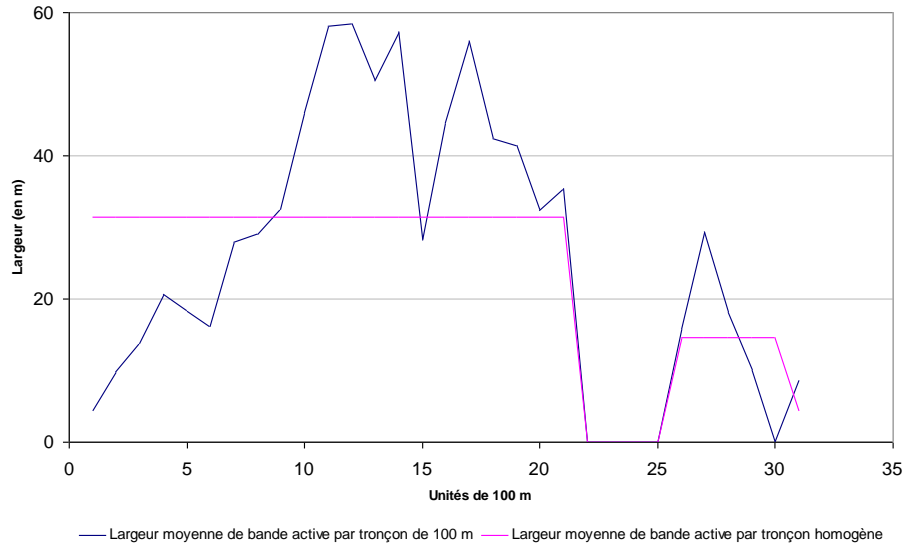
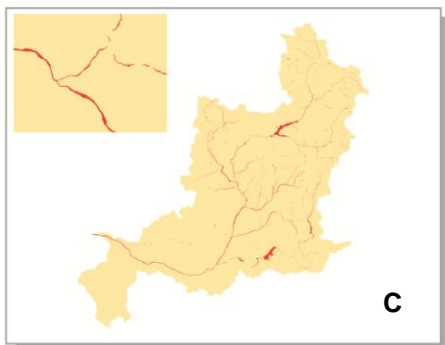
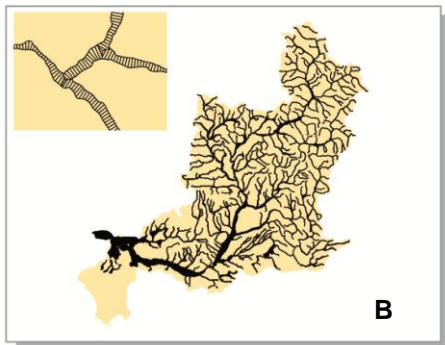
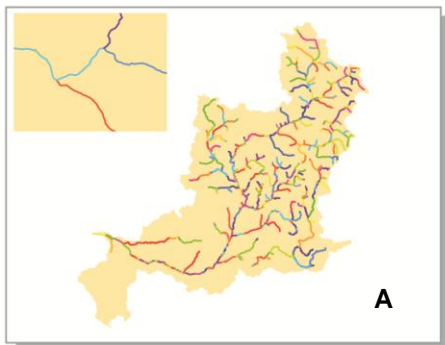


Figure 7. Exemple d'une série de valeurs (largeur du fond de vallée) mesurées tous les 100 m et agrégées ensuite à l'aide d'un test de Pettitt.

1. Données nécessaires à la construction des tronçons homogènes



L'identification des tronçons géomorphologiques homogènes (TGH) nécessite deux couches vectorielles (Figure 8) (Tableau 2):

- Celle de la bande active, qui correspond à l'agrégation de deux classes de polygones : les bancs de galets et le chenal en eau.
- Celle du fond de vallée résultant d'une procédure géomatique décrite dans (Alber, Piégay 2008). Dans ce travail, nous utilisons un fond de vallée découpé en segments élémentaires de 100 m.

Idéalement, les limites des TGH sont déterminées uniquement en fonction des largeurs de bande active et de fond de vallée. Afin de répondre à l'un des objectifs de cette étude, qui est d'automatiser l'extraction de métriques, nous avons également établi un premier découpage en fonction de l'identifiant de rivière. Cela permet notamment d'améliorer et faciliter la création des TGH.

Figure 8. Illustration des « identifiants » de rivière (A) ; du fond de vallée (B) et de la bande active segmentée en fonction de sa largeur (C).

Tableau 2. Présentation des couches vectorielles nécessaires à la construction des tronçons géomorphologiques homogènes (TGH).

Intitulés	Types d'entités	Longueur des segments élémentaires	Métrique
Bande active	Polygones	100 m	Largeur
Fond de vallée	Polygones	100 m	Largeur
Rivière	Polylignes	Variable	Identifiant de rivières

1) Construction des tronçons homogènes

L'identification des tronçons géomorphologiques homogènes se fait ainsi en 5 étapes :

1. La polyligne représentant le référentiel construit précédemment (Figure 9) est segmentée à chaque confluence en utilisant la fonction « split poly d'ArcGis ». Un identifiant différent est attribué à chaque segment.
2. cet axe est ensuite segmenté tous les 100 m et converti en point. A partir de cette couche vectorielle de points, des polygones de Thiessen sont construits.
3. ces polygones de Thiessen sont ensuite intersectés avec d'une part la couche bande active et, d'autre part, la couche fond de vallée. Pour chacune des unités spatiales ainsi générées, la surface des polygones a été calculée puis divisée par la longueur du segment élémentaire, soit 100 m, afin d'obtenir la largeur moyenne de chacun des polygones. On dispose ainsi pour chaque segment élémentaire d'un identifiant « rivière » et, des largeurs de la bande active et du fond de vallée.
4. La largeur du fond de vallée est alors segmentée à l'intérieur des segments de rivières à partir du test de Pettitt. A l'intérieur de ces segments, une seconde segmentation est réalisée sur la largeur de la bande active.
5. enfin, chacun de ces tronçons géomorphologiques homogènes est renseigné par un identifiant.

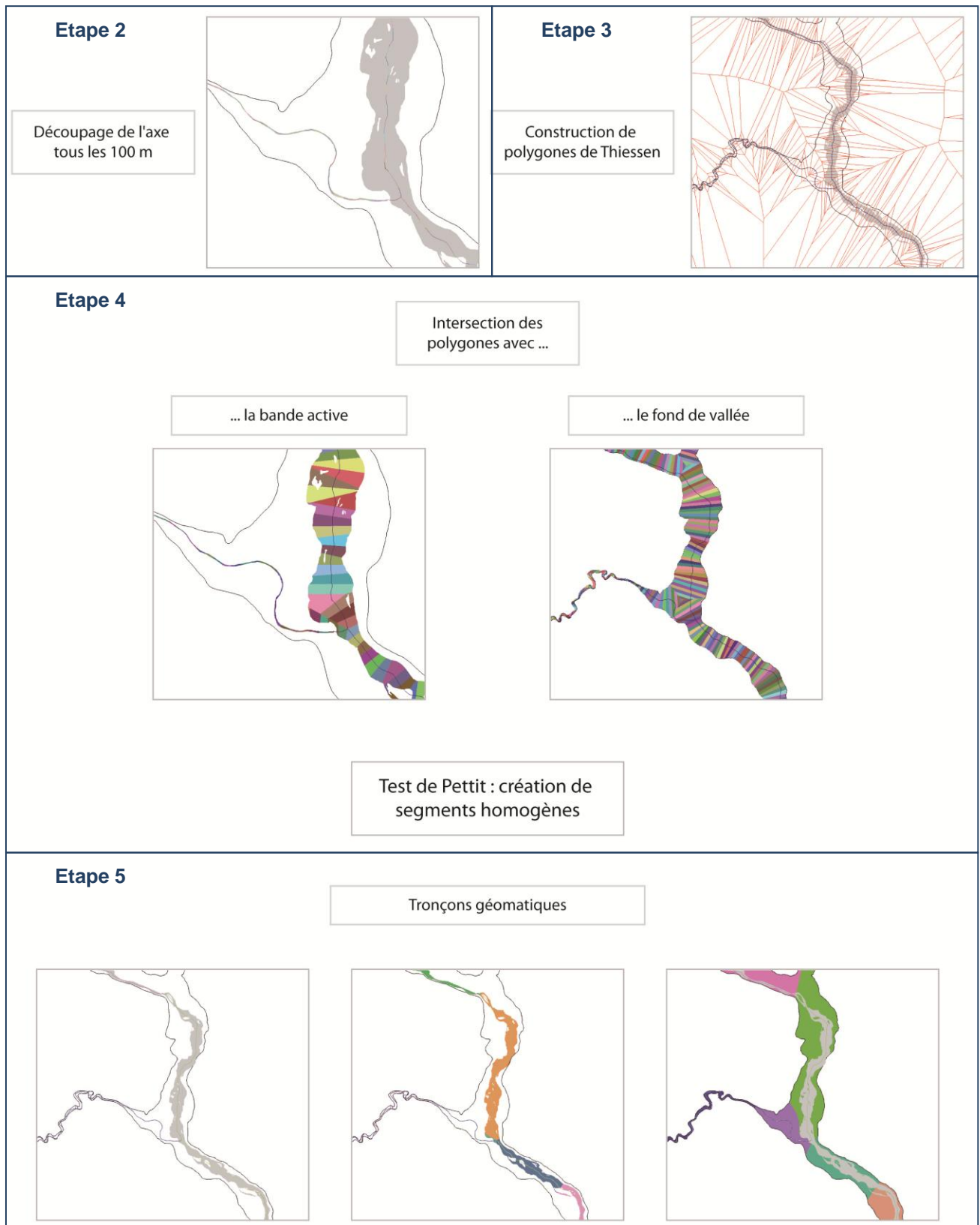


Figure 9. Illustration de la démarche d'élaboration des tronçons géomorphologiques homogènes de l'étape 2 à 5.

50 117 tronçons composent ainsi le réseau hydrographique RMC. La longueur moyenne de ces tronçons est de 928,97 m, allant de 0,004 à 19 989 m (Figure 10).

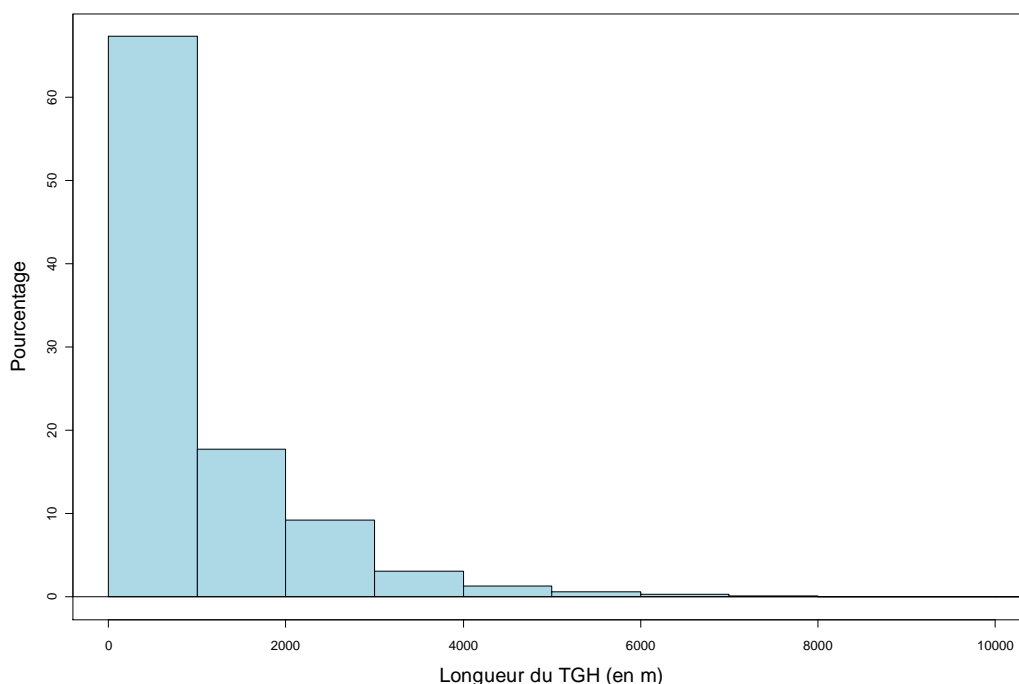


Figure 10. Histogramme représentant la longueur des tronçons géomorphologiques homogènes.

C. Réduction du nombre de TGH

Le jeu de données obtenues précédemment est très lourd. Certains des tronçons ont un ordre de Strahler inférieur ou égal à 2. Dans un premier temps, le réseau a donc été tronqué en écartant les cours d'eau de rang 1 et 2. Pour y parvenir, nous avons utilisé le Réseau Hydrographique Théorique (RHT), mis en place par le Cemagref (Pella et al.) qui dispose de l'ordre de Strahler. Nous avons donc conservé les TGH correspondant à un réseau d'ordre supérieur à 2. Pour effectuer cette sélection, nous avons intersecté notre réseau TGH avec les segments RHT d'ordre supérieur à 2. Toutefois, il se peut que certains des TGH sélectionnés correspondent à des cours d'eau dont le rang est inférieur ou égal à 2, ces erreurs seraient dues à des problèmes de traitement. Nous obtenons un réseau moins dense, composé de 18 552 tronçons, représentant un linéaire de 20 528,11 km.

PARTIE 3. ELABORATION D'UN TABLEAU DE DONNEES DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE

Le tableau de données est actuellement composé de 18 552 tronçons géomorphologiques homogènes, caractérisés par un ou plusieurs paramètres physiques décrivant le corridor fluvial ou le bassin amont. Pour construire ce tableau, deux sources de données ont été retenues, à savoir la BD Topo[®] de l'IGN et la base de données RHT du Cemagref.

A. Les métriques calculées à partir des données de la bande active et du fond de vallée.

Les informations obtenues concernant le corridor fluvial ont été extraites de données surfaciques ou linéaires.

1. Les données surfaciques

Les données surfaciques brutes représentent le chenal en eau, la bande active et la bande fluviale. La bande active est issue de l'union des polygones « eau » et « bancs de galets ». La bande fluviale correspond à la bande active et les îles végétalisées se situant à l'intérieur. Pour sa construction, nous avons utilisé l'outil « clean gaps » d'ET Geowizards, dont la fonction est de remplir les espaces vides situés à l'intérieur du polygone de bande active. La fusion de ces « espaces vides » avec le polygone « bande active » permet la création d'une nouvelle couche, appelée la bande fluviale (Figure 11). La couche vectorielle construite par Alber (Alber, Piégay 2008) représentant le fond de vallée a également été utilisée.

Pour chaque tronçon homogène, la surface en eau ainsi que celles de la bande active et de la bande fluviale ont été calculées en utilisant l'outil « *Calcul de géométrie* » d'ArcGis. Les largeurs moyennes de la bande active et du fond de vallée par segment sont par ailleurs le résultat du test de Pettitt réalisé précédemment.

La BD Topo[®] ne représente pas de manière surfacique les chenaux dont la largeur est inférieure à 7,5 m. Ceci explique que certains tronçons homogènes ne disposent pas d'informations surfaciques. Dans ce cas d'autres métriques ont été extraites.

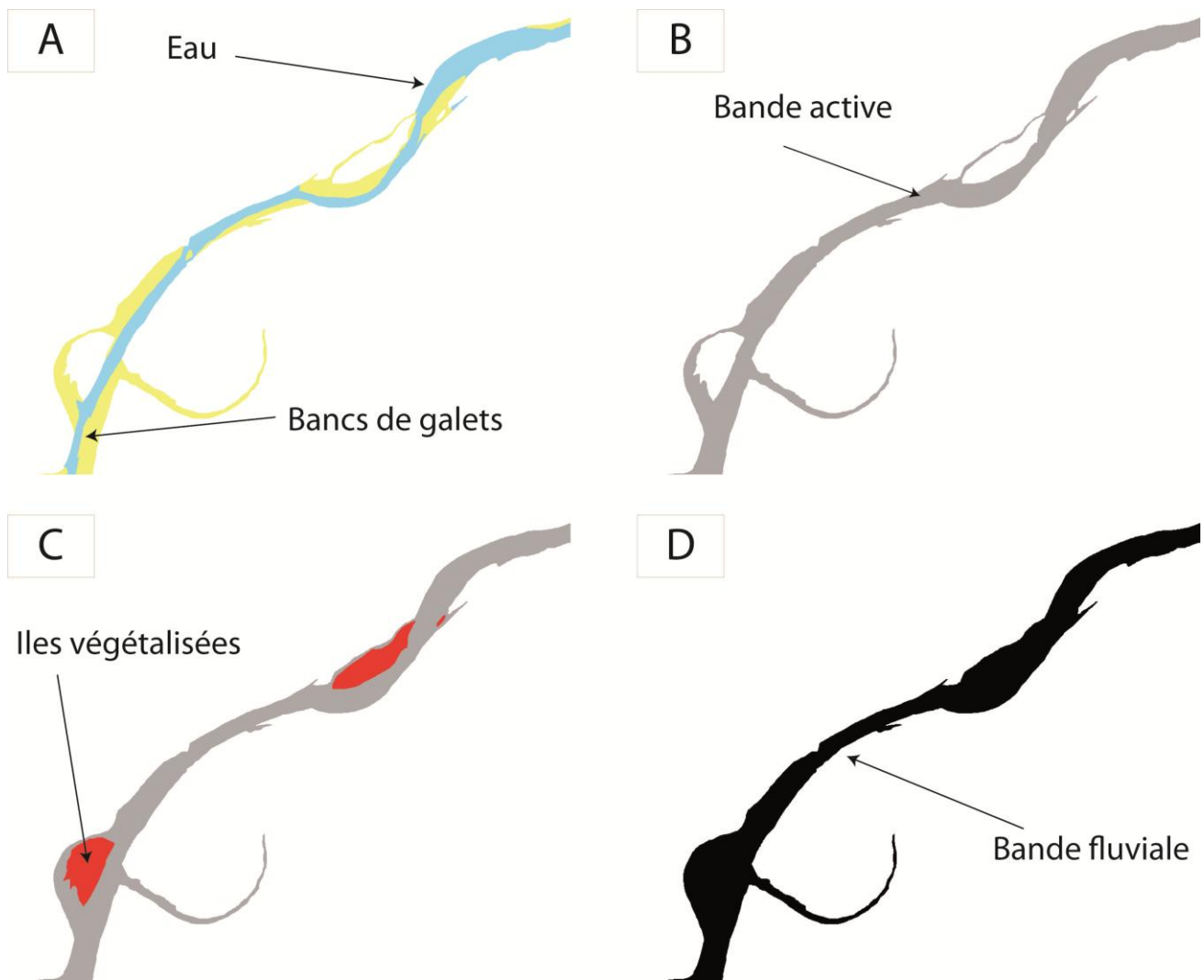


Figure 11. Illustration des polygones eau et bancs de galets (A) permettant la construction de la bande active (B). Identification des îles végétalisées (C) et construction de la bande fluviale (D).

1) Les données linéaires

Le réseau hydrographique est représenté sous la forme d'une polyligne à partir de laquelle deux métriques ont été extraites. La première correspond à la longueur de chaque tronçon en utilisant l'outil « Calcul de géométrie ». Le second paramètre est la longueur directe entre deux extrémités du tronçon (Figure 12).

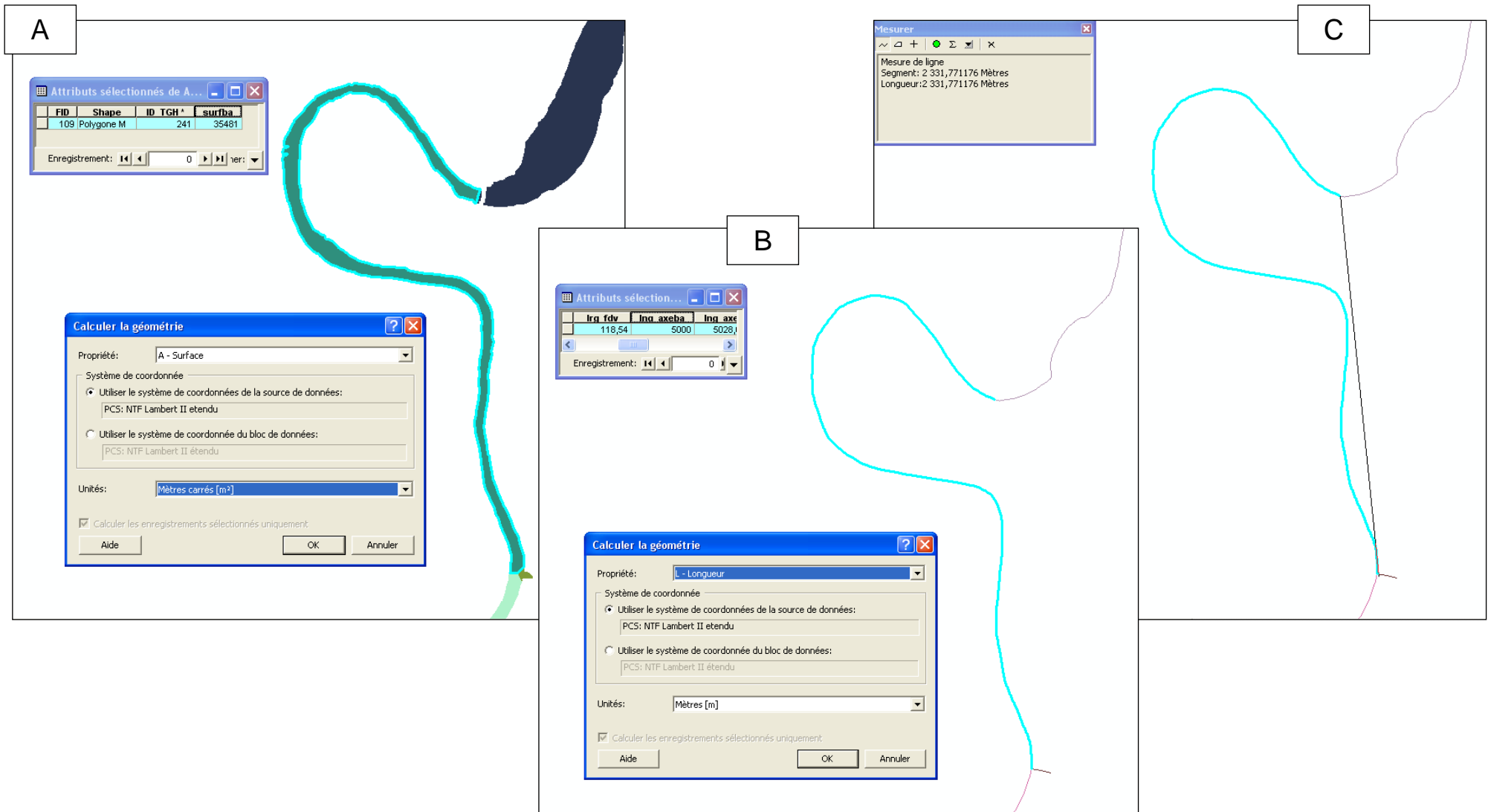


Figure 12. Calcul des métriques : à partir d'un polygone, calcul de la surface (A) ; à partir d'une polyligne, calcul de la longueur du tronçon (B) et de la longueur à vol d'oiseau (C).

B. Les métriques issues du Réseau Hydrographique Théorique (Tableau 3)

Pour étoffer le jeu de métriques, nous avons utilisé la base de données RHT du Cemagref. Cette base a été construite à partir d'un réseau hydrographique étendu (Pella et al. 2008) et de la BD Alti[®] de l'IGN au pas de 50 m. Le réseau est inséré au MNT, permettant de prendre en compte l'écoulement. Ceci permet d'obtenir « une meilleure estimation des limites du bassin versant, des surfaces des bassins et de la pente des tronçons » (Pella et al.). Cette base a été complétée par des attributs environnementaux grâce à la plateforme Estimkart. La base RHT présente ainsi des valeurs de débits, de hauteurs d'eau et de probabilité de présence d'espèces piscicoles. La principale difficulté rencontrée est liée au fait que les deux tracés (RHT et TGH) ne se superposent pas parfaitement et que les extrémités des segments RHT ne correspondent pas à ceux des tronçons homogènes (TGH). Afin de réduire au maximum le risque d'erreur lors du transfert d'information de la base RHT à nos tronçons, nous avons utilisé une zone tampon. Pour chaque TGH la moyenne des valeurs issues du RHT a été alors retenue. Toutefois un certain nombre de tronçons homogènes ne disposent pas des informations du RHT. Il s'agit principalement de petits cours d'eau ayant généralement un rang inférieur à 3 et qui ont pourtant été sélectionnés précédemment.

Tableau 3. Récapitulatif des métriques extraites par tronçon géomorphologique homogène

	Nom de la métrique	Données sources	Méthode	Type	Unité	
	Identifiant du Tronçon Géomorphologique RMC	id_tgh_rmc		Texte	Aucune	
	Coordonnées X	POINT_X	BD Topo et BD Carthage (ponctuel)	Position X (Lambert 2 étendue) du centre du TGH - fonction "calcul des coordonnées XY"	Réel	
	Coordonnées Y	POINT_Y	BD Topo et BD Carthage (ponctuel)	Position Y (Lambert 2 étendue) du centre du TGH - fonction "calcul des coordonnées XY"	Réel	
Positionnement géographique	Nom de l'hydroécocorégion	nom_her		Appartenance du centre (point) du TGH - fonction intersection entre HER et point TGH	Texte	Aucune
	Surface de l'hydroécocorégion	surf_her			Réel	
	Nom du sous bassin hydrographique	nom_ssbv		Appartenance du centre (point) du TGH - fonction intersection entre sous bassin et point TGH	Texte	Aucune
	Surface du bassin hydrographique	surf_ssbv			Réel	
Métriques issues d'autres bases de données	Largeur moyenne du fond de vallée	m_lrgm_fdv		Moyenne des DGO fond de vallée	Réel	m
		NOM				
		m_coef_a				
		m_coef_b				

	Nom de la métrique		Données sources	Méthode	Type	Unité
Métriques calculées	Largeur moyenne de la bande active	m_lrgm_ba	BD Topo (surfactive)	Surface de la bande active (en m ²) / Longueur du TGH (en m)	Réel	m
	Longueur du tronçon	m_dist_axe	BD Topo et BD Carthage (linéaire)	Longueur du TGH - fonction "Calculer la géométrie"	Réel	m
	Longueur à vol d'oiseau entre les deux extrémités du tronçon	m_dist_dir	BD Topo et BD Carthage (linéaire)		Réel	m
	Surface du chenal en eau	m_surf_eau	BD Topo (surfactive)	Surface des polygones eau - fonction "Calculer la géométrie"	Réel	m ²
	Surface de la bande active	m_surf_ba	BD Topo (surfactive)	Surface des polygones bande active - fonction "Calculer la géométrie"	Réel	m ²
	Surface de la bande fluviale	m_surf_bf	BD Topo (surfactive)	Surface des polygones bande fluviale - fonction "Calculer la géométrie"	Réel	m ²
	Ecart interquartile de la largeur de bande active adimensionnelle	m_eiqba	BD Topo (surfactive)	A VERIFIER	Réel	Aucune
Métriques issues du RHT	Distance à la source	m_d_source	Topologie du réseau	Parcours du réseau - Pour chaque arc, un programme parcourt le réseau vers l'aval en cumulant les distances des arcs parcourus. Le total représente la distance à la source.		km
	Superficie du bassin versant amont de l'arc	m_surfbv	Superficie des bassins versants unitaires (champ Sfbvu)	Cumul des superficies des bassins versants unitaires amont	Réel	km ²
	Ordre de Strahler	m_strahler		Calculé par un programme de parcours de réseau	Entier	Aucune
	Pente de l'arc ¹	m_pente	Modèle numérique de terrain à 50m de l'IGN	Analyse spatiale par segment - L'altitude du point amont et aval de l'arc est déterminée en interpolant de manière linéaire les altitudes du modèle numérique de terrain à 50 m de l'IGN. La pente est calculée en divisant la différence d'altitude entre l'amont et l'aval par la longueur de l'arc en mètres.	Réel	Pour mille

¹ (Pella et al.) : « lorsque l'altitude aval est supérieure à l'altitude amont, la pente calculée est affectée de la valeur 0.001 ». Pour faire face à cette difficulté, nous avons opté pour un calcul permettant d'avoir une approximation de cette pente, en faisant la moyenne des pentes présentes à l'amont et aval du TGH. Ce choix peut effectivement être débattu.

C. Tronçons géomorphologiques homogènes exploitables

Une fois l'ensemble des métriques extraites, nous avons identifié les tronçons qui ne sont pas exhaustivement renseignés. En effet, certains calculs ont donné des résultats incohérents et nous avons ainsi listé les erreurs possibles (Tableau 4) résultant soit d'incohérences géomatiques lors de l'extraction des métriques calculées à partir des données brutes (0,23% du linéaire), soit d'une absence d'informations sur le RHT (15% du linéaire).

Dans ce dernier cas, le contrôle visuel de tronçons pour lesquels le RHT n'a pas d'informations indique qu'il s'agit de petits cours d'eau, inférieurs au rang 2 pour certains. Le réseau exploitable reste continu sur les grands cours d'eau, ce qui est le plus important pour une étude conduite à large échelle.

Tableau 4. Liste des erreurs dans l'extraction des métriques.

					Tronçons géomatiques		Linéaire du réseau	
					Nombre	%	Longueur (en km)	%
sel_01	m_lrgm_ba	>	m_lrgm_fdv	Largeur moyenne de la bande active > largeur moyenne du fond de vallée	118	0,64	47	0,23
sel_07	m_surfbv	=	0	Impossibilité de calculer la largeur ba adim car Aucune information issue des données RHT	3 856	20,78	3 189	15,54
Nombre de tronçons inexploitables					3 961	21,35	3 233	15,75
Tronçons exploitables					18 554		20 528	

RESULTATS

Nous avons présenté une méthode semi-automatique permettant, à partir de données vectorielles représentant les bancs de galets et le chenal en eau, de construire un tableau de caractéristiques physiques du corridor fluvial et de son bassin versant amont.

Cet ensemble de métriques va nous servir dans ce chapitre à élaborer des indicateurs de caractérisation de l'état physique du réseau hydrographique. Nous ne cherchons pas à faire une présentation exhaustive de ce qui est faisable mais simplement de montrer les potentialités d'un tel tableau de données permettant d'envisager la visualisation de cartes à l'échelle du bassin RMC et la mise en place de requête spatiale.

Nous présentons ainsi 4 exemples thématiques fondés sur des indicateurs tirés de données de différentes natures :

- mise en forme de données brutes par requête spatiale permettant la cartographie des linéaires fluviaux en eau, à galets et sous canopée.*

- définition de tronçons homogènes et d'indicateurs morphologiques associés permettant à partir d'une sectorisation et d'une CAH, la cartographie des styles fluviaux.*

- définition de secteurs en tresses présentant une forte diversité potentielle d'habitats aquatiques à partir d'un indicateur statistique validé sur 50 tronçons et appliqué sur les tronçons en tresses définis précédemment*

- définition de secteurs potentiellement mobiles à partir d'un modèle statistique prédictif établi sur 109 tronçons et appliqué sur le réseau hydrographique rhodanien non contraint.*

PARTIE 1. ANALYSE GEOGRAPHIQUE DES LINEAIRES A GALETS ET EN EAU (FIGURE 13)

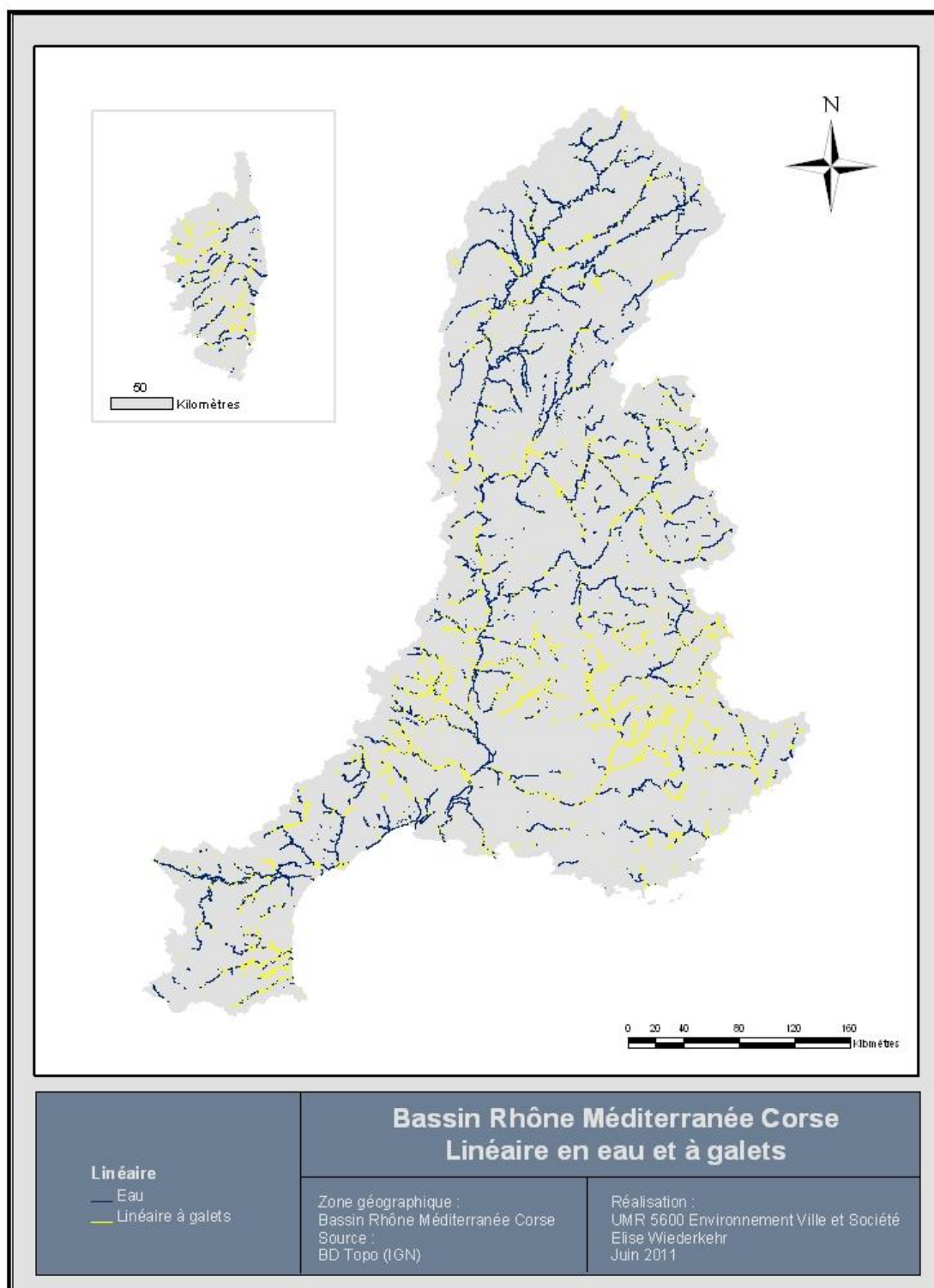


Figure 13. Représentation des linéaires en eau et à galets sur le bassin Rhône Méditerranée Corse.

A. Par sous bassin hydrographique

A partir, de la polygone représentant les chenaux à galets, en eau et non visibles, nous avons calculé la répartition de chacune de ces classes par grands bassins hydrographiques (Figure 14).

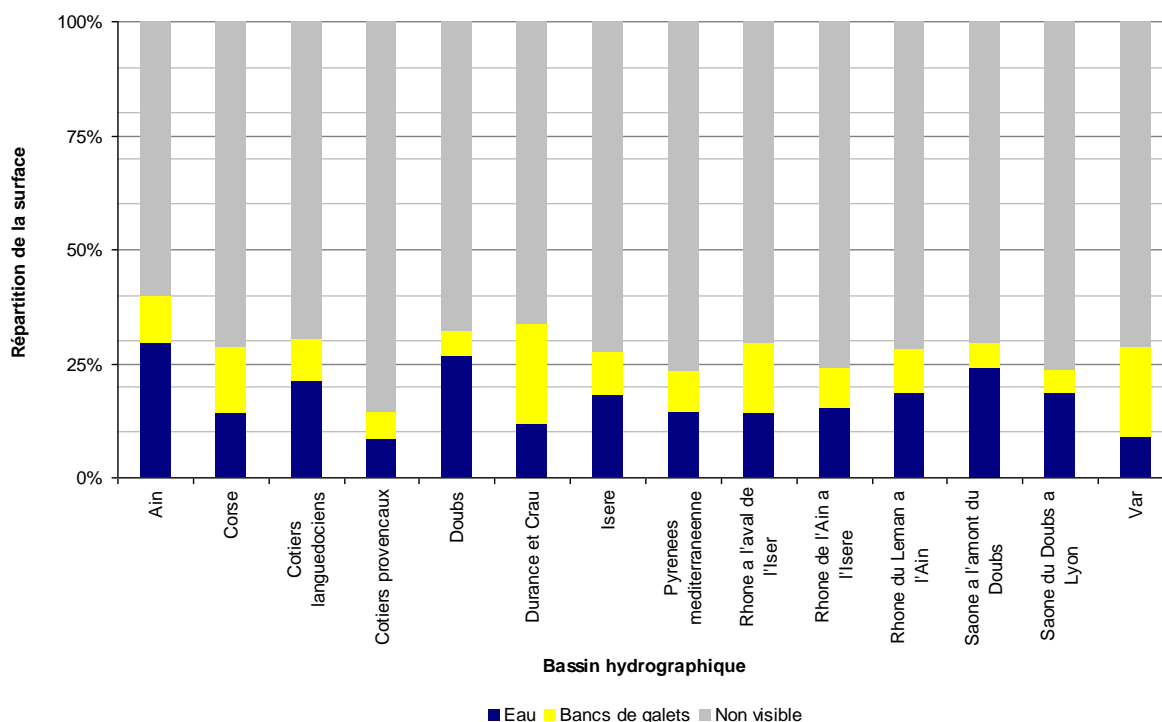


Figure 14. Répartition du linéaire de chaque type de polygones par bassin hydrographique.

Plus de 60% du linéaire du réseau d'origine n'est pas « visible ». Ce pourcentage varie entre 60% pour le bassin de l'Ain et 85% pour les bassins Côtiers provençaux. La distribution des types de chenaux montre un patron géographique marqué au sein du bassin RMC, avec notamment une forte présence dans la partie Sud-Sud-Est des tronçons à bacs de sédiments. L'analyse des types de chenaux par bassin hydrographique confirme ce patron (Figure 14). De fait 5 types de sous bassins peuvent être distingués (Figure 15) :

- Les bassins composés d'une proportion importante de secteurs à galets comme :
 - le bassin du Var qui est composé en grande majorité de secteurs à galets (Type A).
 - les bassins Côtiers provençaux et Isère avec une forte proportion de secteurs à « Eau + bacs » (Type B) et,
- Les bassins dont les chenaux sont essentiellement composés d'eau avec une très faible quantité de galets (moins de 20%), comme ceux de l'Ain, des Côtiers languedociens, du Doubs, de la Saône (Type C).
- Les bassins intermédiaires, dont la surface de galets représente de 20 à 50 % de la bande active. Il s'agit :

- des bassins Durance et Crau, des Pyrénées et du Rhône à l'aval de l'Isère, qui se caractérisent par une forte proportion relative de secteurs uniquement à galets (type D).
- des bassins de la Corse, du Rhône à l'aval et à l'amont de la confluence avec l'Ain

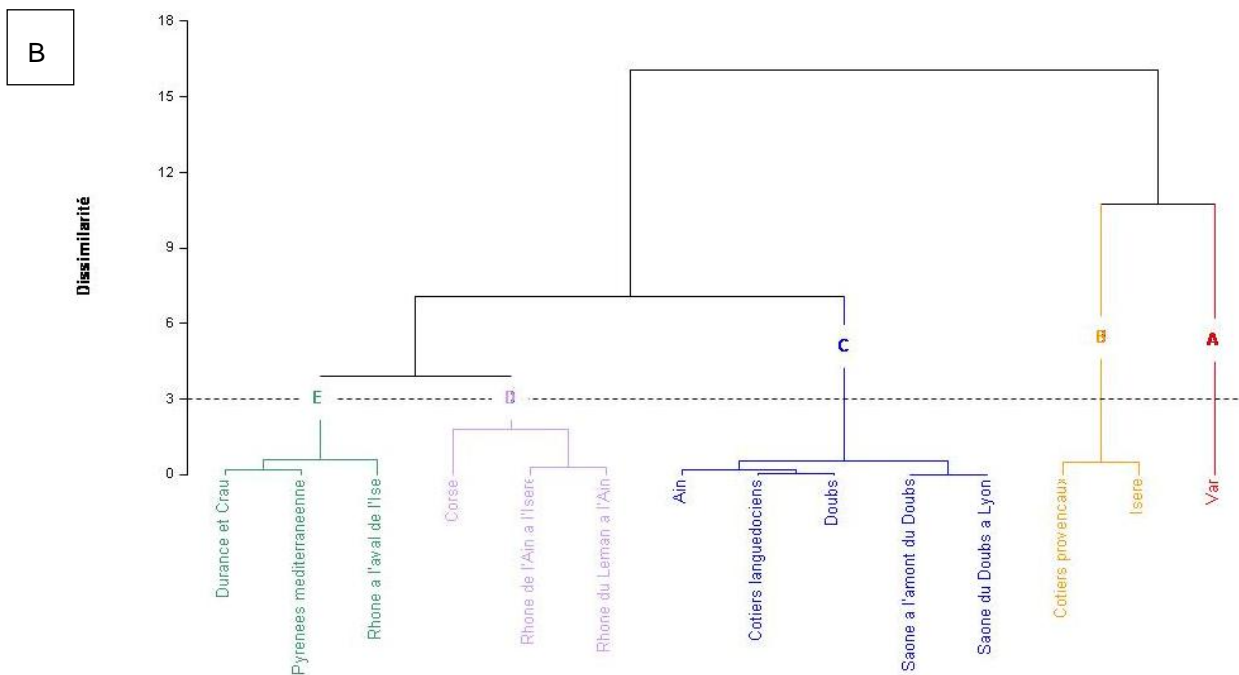
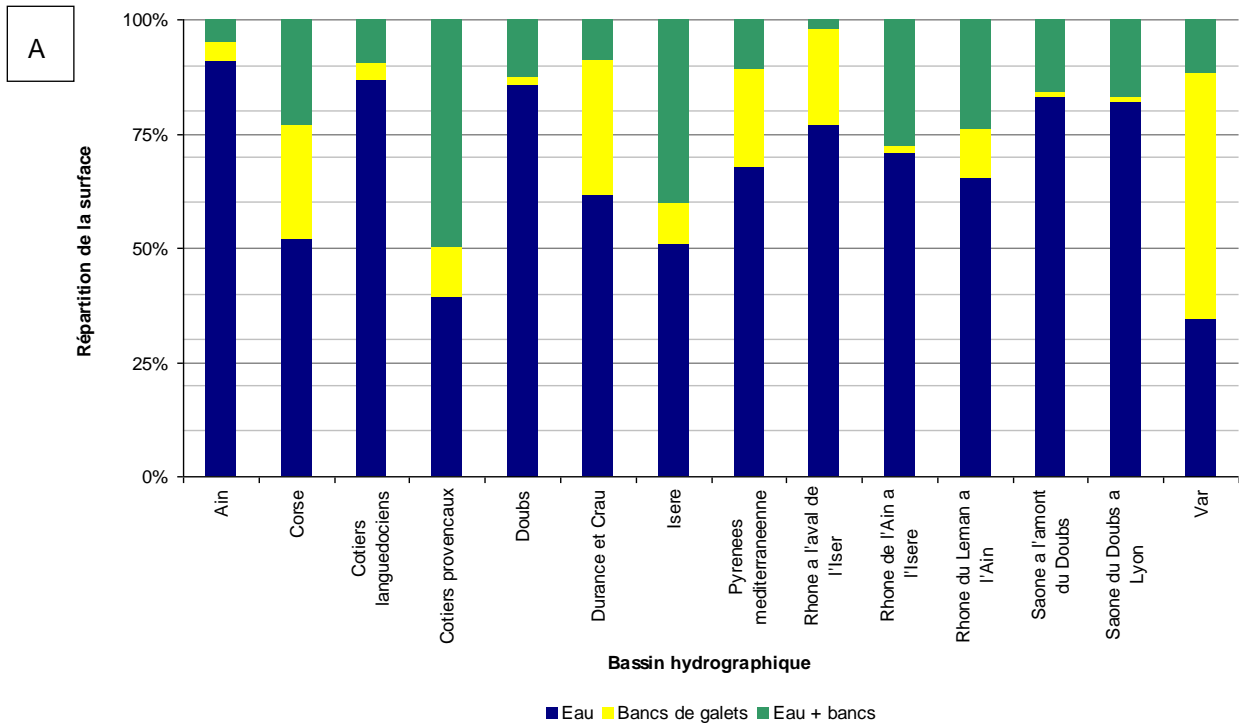


Figure 15. Répartition de la surface de chaque type de polygones par bassin hydrographique (A) et dendrogramme réalisé à partir des données surfaciques sur les différents types de polygones par bassin hydrographique (obtenu par classification ascendante hiérarchique) (B).

B. Par hydro-écorégion

L'analyse des résultats par hydro-écorégion confirme également le patron géographique de répartition des types de chenaux au sein du bassin RMC (Figure 16 et Tableau 5).

Ainsi 6 types peuvent être distingués :

- Le type A, qui est caractérisé par plus de 80% de polygones en eau. Il s'agit des hydro-écorégions : « Coteaux Aquitains », « Vosges », « Plaine de la Saône », « Alsace » et « Massif Central Nord ».
- Le type B, également caractérisé par des polygones « eau », représentant environ 75% de la surface de bande active, mais avec des tronçons à bancs de sédiments plus présents. Il s'agit des hydro-écorégions : « Pyrénées », « Jura-Préalpes du Nord », « Cévennes » et « Côtes Calcaire Est ».
- Le type C, comprenant les « Préalpes du Sud » et la « Corse » a une forte proportion de polygones composés uniquement de bancs de galets (plus de 25%) et une faible quantité de polygones en eau, seulement autour de 50%
- Le type D, composé uniquement de l'hydro-écorégion « Méditerranéen » qui est proche du type C mais avec une proportion plus forte de polygones en eau. Seulement 4% de la surface est constituée de polygones intermédiaires « eau et bancs ».
- Le type E, avec le « Massif Central » et les « Grands Causses » se caractérisent par une faible quantité de surface composé uniquement de « bancs de galets ». Ce type se caractérise par la moitié du réseau recouvert de polygones « eau » et l'autre moitié de polygones intermédiaires « eau + bancs ».
- Le type F, constitué uniquement des Alpes Internes, contient essentiellement des polygones mixtes, composés d'eau et de bancs, représentant environ 50% de la surface de l'hydro-écorégion.

Tableau 5. Répartition de chaque type d'unité par hydro-écorégion.

HER	Classes	Eau	Bancs de galets	Eau + bancs
Vosges		81,54	1,60	16,86
Coteaux Aquitains		91,45	2,83	5,72
Plaine Saône	A	83,02	1,60	15,38
Alsace		83,14	0,00	16,86
Massif Central Nord		84,28	0,00	15,72
Pyrénées		75,06	7,13	17,80
Jura - Préalpes du Nord	B	75,16	5,49	19,36
Cévennes		71,35	8,15	20,50
Côtes Calcaires Est		76,63	2,05	21,32
Préalpes du Sud	C	54,75	34,76	10,49
Corse		51,49	25,40	23,11
Méditerranéen	D	76,28	19,86	3,86
Massif Central	E	58,80	0,66	40,54
Grands Causses		49,15	4,01	46,83
Alpes Internes	F	30,11	19,64	50,25

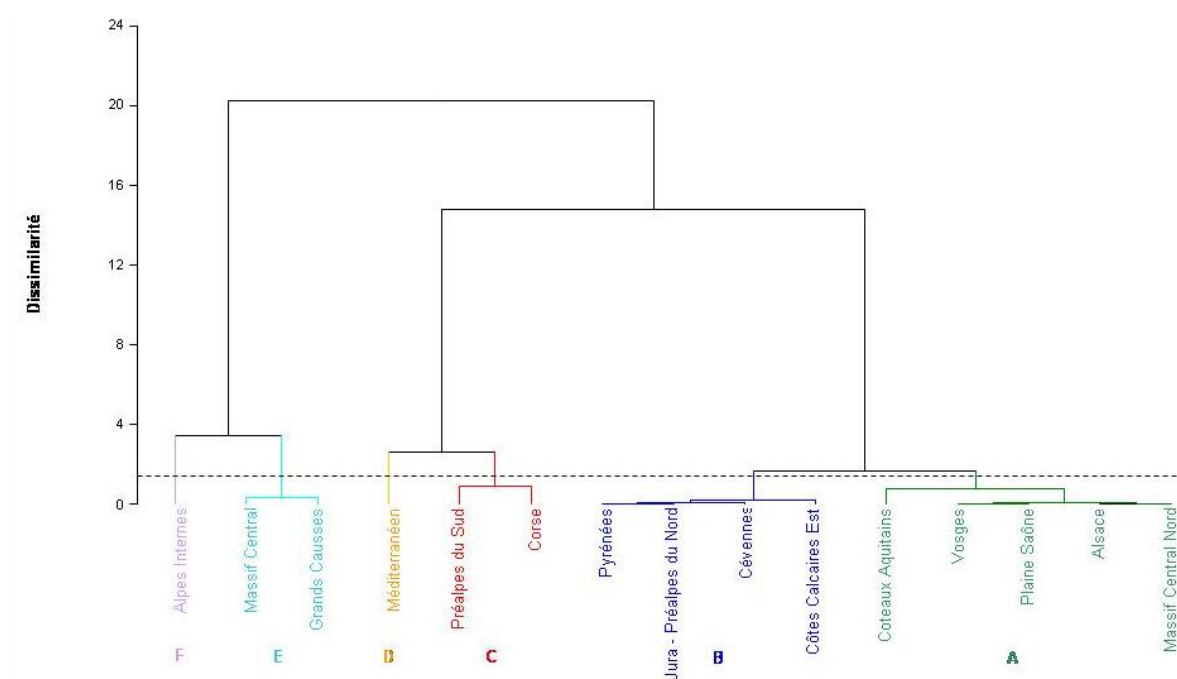


Figure 16. Dendrogramme réalisé à partir des données représentant la répartition en pourcentage de chaque type de polygones par hydro-écorégion.

PARTIE 2. TYPOLOGIE DES STYLES FLUVIAUX A L'ECHELLE DU BASSIN RHONE MEDITERRANEE CORSE

Comme le rappellent (Malavoi, Bravard 2010), le style fluvial fait partie des variables de réponses « dont dispose un cours d'eau naturel ou peu aménagé pour s'ajuster aux variations des paramètres de contrôle ». De fait, la détermination des styles fluviaux constitue un enjeu de gestion important car le style est à la fois un indicateur de fonctionnement et d'anthropisation. Le style se définit généralement par le nombre de bras en eaux et la sinuosité de ces bras.

A. Détermination des styles fluviaux

Dans cette partie, l'objectif est d'établir une typologie des styles fluviaux à partir du tableau des descripteurs physiques des TGH du réseau hydrographique RMC. Pour cela, nous avons élaboré dans un premier temps, des indicateurs permettant de mettre en avant les différentes caractéristiques des styles et, ensuite, nous avons déterminé la typologie de ces styles à l'aide d'une classification.

1. Elaboration d'indicateurs

Plusieurs indicateurs (Voir rendu cartographique) ont été créés à partir des métriques extraites précédemment (Tableau 6):

- La **pen**te. Cet indicateur permet d'avoir une idée de « l'énergie potentielle du cours d'eau et de sa capacité de mobilisation et de transport des sédiments » (Malavoi, Bravard 2010). C'est le seul indicateur qui n'est pas planimétrique mais il est important à intégrer car il régit la sensibilité d'un style au changement. Les rivières à méandres de piémont à plus forte pente que les rivières à méandres de plaine présentent ainsi une mobilité en plan plus importante qui explique qu'il soit utile de les distinguer même si leur planimétrie est finalement assez proche.
- L'**indice de sinuosité**, qui est calculé en faisant le rapport entre la longueur de l'axe médian et la longueur à vol d'oiseau par tronçon :
 - Les chenaux rectilignes, dont l'indice est inférieur à 1,05.
 - Les chenaux sinueux, dont l'indice est compris entre 1,05 et 1,25.
 - Les chenaux très sinueux, dont l'indice est compris entre 1,25 et 1,50.
 - Les chenaux méandriques, dont l'indice est supérieur à 1,50.
- Le **taux de confinement**, qui permet d'identifier les secteurs où le cours d'eau peut ou non potentiellement se déplacer latéralement.

- La **largeur de la bande active (adimensionnelle)** rapportée à la taille du bassin puissance 0,47. Cet indicateur ne rend pas compte de la taille mais de la disponibilité sédimentaire en identifiant les secteurs présentant des sur-largeurs (Piégay et al. 2009).
- Le **taux surfacique eau / bande active**. Un faible rapport eau / bande active indique un secteur dont la bande active est dominée par les dépôts sédimentaires au détriment du chenal en eau. Ce taux permet par exemple de détecter les zones en tresses.
- Le **taux surfacique bande active / bande fluviale**, qui permet de mettre en évidence les secteurs avec des îles végétalisées.
- L'**écart interquartile de la largeur de bande active adimensionnelle** (en fonction de la surface du bassin versant) pour chaque TGH. Cet indicateur permet de distinguer les tronçons homogènes en termes de largeur adimensionnelle de ceux qui ne le sont pas.

Le calcul des indicateurs se fait comme indiqué dans le tableau suivant. Les indicateurs extraits à partir de données surfaciques ne sont pas utilisés pour caractériser les secteurs où la BD Topo® ne donne qu'une représentation linéaire.

Tableau 6. Présentation des indicateurs utilisés pour la détermination des styles fluviaux.

Indicateurs	Métriques utilisées	Calcul (le cas échéant)
Pente	Pente (m_pente)	
Indice de sinuosité	Longueur à vol d'oiseau entre les deux extrémités du tronçon (m_dist_dir)	m_dist_dir / m_dist_axe
	Longueur du tronçon (m_dist_axe)	
Indice de confinement	Longueur du tronçon (m_dist_axe)	(m_dist_axe - m_dist_dir) / m_lrgm_fdv
	Longueur à vol d'oiseau entre les deux extrémités du tronçon (m_dist_dir)	
	Largeur moyenne du fond de vallée (m_lrgm_fdv)	
Largeur de la bande active adimensionnelle	Largeur de la bande active	Largeur de la bande active / (m_surfbv) ^{0.47}
	Surface du bassin versant (m_surfbv)	
Taux surfacique eau / bande active	Surface du chenal en eau (m_surfeau)	m_surfeau / m_surfba
	Surface de la bande active (m_surfba)	
Taux surfacique bande active / bande fluviale	Surface de la bande active (m_surfba)	m_surfba / m_surfbf
	Surface de la bande fluviale (m_surfbf)	
Ecart interquartile de la largeur de bande active	Largeur adimensionnelle de la bande active par DGO	Calcul de l'écart interquartile par TGH

1) Classement des styles fluviaux

Le jeu de données initial a été divisé en deux sous-ensembles selon la présence ou non de polygones de bande active. Les TGH sans bande active sont ceux où cette information n'est pas représentée de façon surfacique mais linéaire, en conséquent les indicateurs calculés à partir des données surfaciques ne sont pas exploitables. Pour identifier statistiquement les styles fluviaux, nous avons recours à une méthode de classification. L'objectif est d'identifier pour chaque TGH une classe.

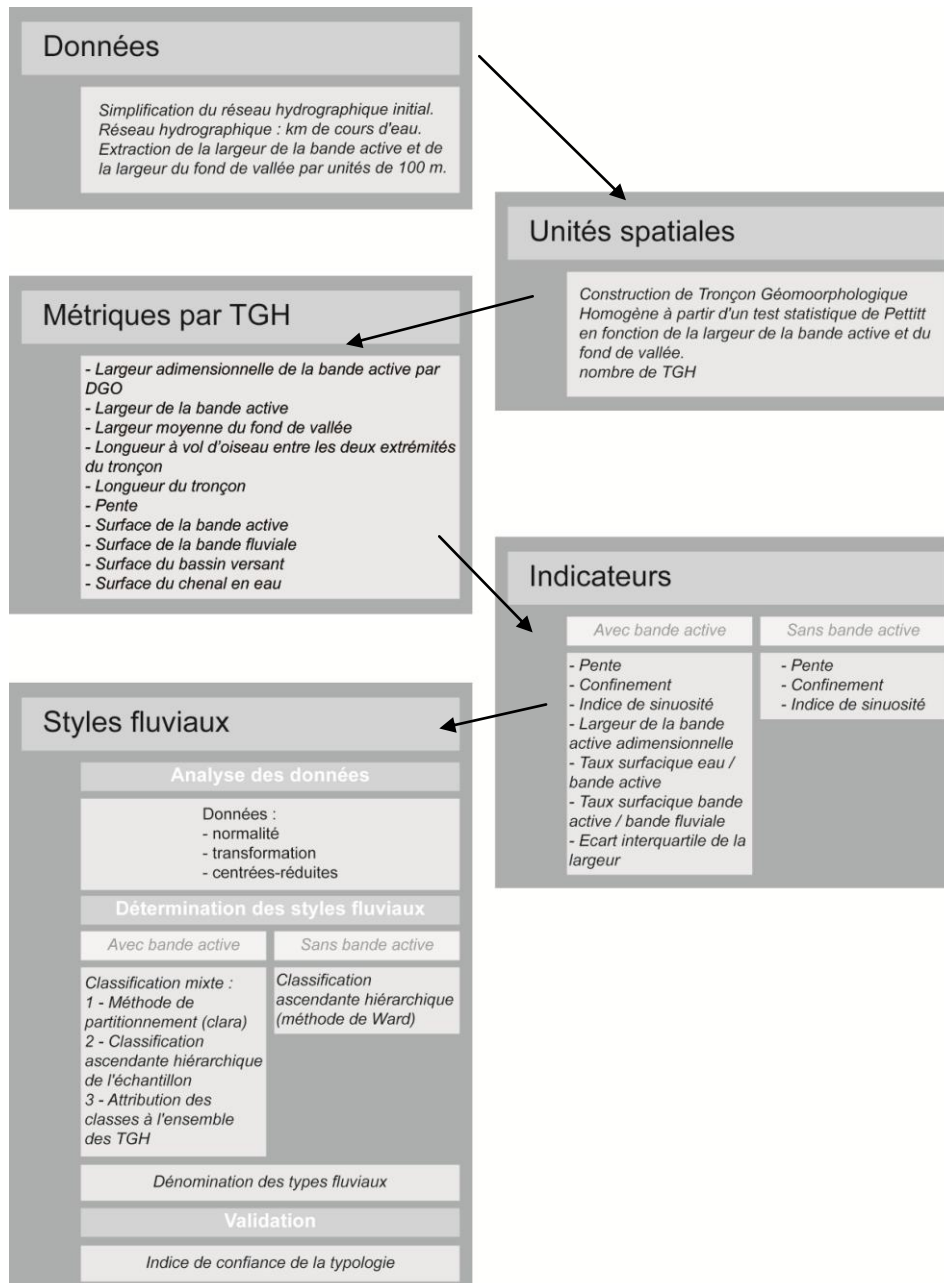


Figure 17. Présentation de la démarche conduisant à la mise en place d'une typologie des styles fluviaux à l'échelle du bassin Rhône Méditerranée Corse.

Pour y parvenir, quatre étapes sont nécessaires, que ce soit avec ou sans bande active (Figure 17) :

1. la première consiste à « préparer » les données pour les rendre exploitable et réduire au maximum les « interférences » liées aux valeurs extrêmes,
2. la seconde est la mise en place d'une analyse statistique permettant d'établir des classes en fonction des métriques.
3. la troisième étape est l'attribution pour chaque classe d'un type correspondant à une réalité morphologique.
4. et enfin, l'étape de validation qui va nous permettre d'obtenir un indice de confiance quant à la validité de cette typologie.

a. Tronçons géomorphologiques homogènes sans bande active

Trois indicateurs sont utilisés pour déterminer les styles fluviaux des 3922 TGH sans bande active. Il s'agit de la pente, des indices de confinement et de sinuosité.

Analyse des données

L'objectif de ce paragraphe est de connaître la distribution des données afin de voir si elles répondent à l'hypothèse de normalité. Dans le cas contraire, nous opérons une transformation des données afin qu'elles suivent une distribution normale.

Normalité des données

(a) Utilisation de la méthode graphique

La normalité des données a été évaluée par une approche graphique en utilisant 3 modes de représentation :

1. l'histogramme de distribution des données qui permet d'observer la distribution statistique en lui superposant une loi normale, sous forme de courbe. Plus cette courbe s'approche de la cime de l'histogramme plus notre distribution s'approche d'une distribution normale.
2. une boîte à moustaches. En cas de symétrie, la loi normale se vérifie.
3. la distribution des quantiles, qui consiste à comparer l'échantillon observé avec celui d'une distribution théorique.

Pour chacun des indicateurs sélectionnés, nous avons construit ces trois graphiques. L'observation de ces graphiques infirme souvent l'hypothèse de normalité. Nous devons donc transformer les données.

(b) Transformation des données

Trois types de transformations pour normaliser les données ont été testés : les transformations logarithmique, racine ou de Box-Cox. Il en résulte que les meilleurs résultats sont obtenus avec la dernière transformation, celle de Box-Cox.

Cette transformation non linéaire repose sur la formule générale suivante :

$$B(x, \lambda) = \begin{cases} \frac{x^\lambda - 1}{\lambda} & \text{quand } \lambda \neq 0 \\ \log(x) & \text{quand } \lambda = 0 \end{cases}$$

X doit être positif

Pour identifier l'exposant gamma, nous avons utilisé la fonction `powerTransform()` sur le logiciel R.

(c) Vérification de l'hypothèse de normalité

Une fois ces données transformées, nous avons vérifié l'appartenance à la loi normale de chaque nouvelle variable par la méthode des graphiques. Cette procédure ne permet pas d'obtenir systématiquement une distribution normale des données mais elle permet au moins de transformer la distribution pour se rapprocher d'une distribution normale.

(d) Variables centrées réduites

Afin de d'homogénéiser le poids des variables et de leur variation dans la détermination des types, nous les avons également centrées et réduites. Cette transformation rend les données indépendantes de l'unité, leur moyenne étant égale à 0 et leur écart-type à 1.

Pour effectuer ce changement, nous avons appliqué la formule suivante :

$$\frac{V - m}{\sigma}$$

Avec V : variable, m : moyenne et σ : écart-type

b. Classification ascendante hiérarchique des données

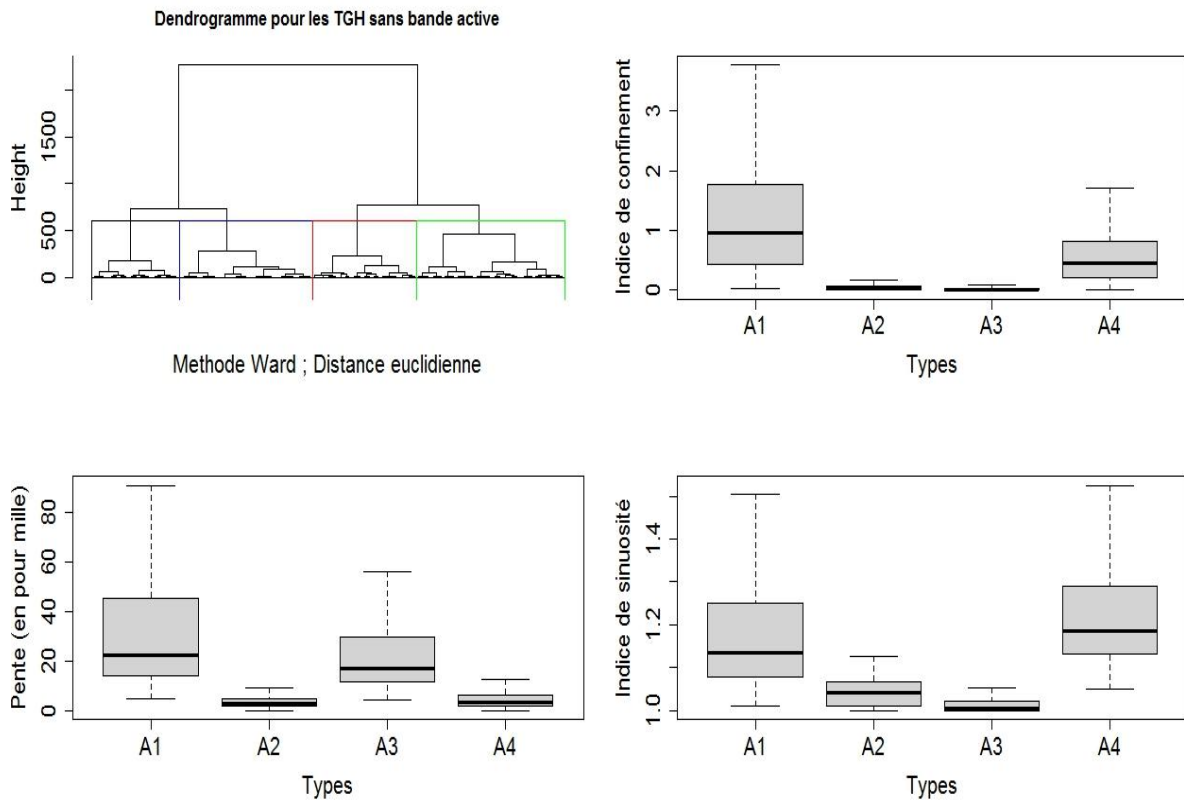


Figure 18. Résultat de la classification ascendante hiérarchique pour les TGH sans bande active caractérisés par 3 indicateurs géomorphologiques.

Afin de répartir l'ensemble des TGH selon 3 critères (pente, sinuosité et confinement) en plusieurs sous-ensembles les plus homogènes possible une classification ascendante hiérarchique (CAH) a été réalisée. La classification hiérarchique donne comme résultat une hiérarchie des classes, c'est-à-dire que deux individus peuvent être regroupés à un niveau donné et être séparés au niveau inférieur ou regroupés au niveau supérieur. Nous avons utilisé la méthode de Ward, dont le principe est de « regrouper à chaque pas deux éléments en maximisant la qualité de la partition obtenue » (Husson, Lê & Pagès 2009). Nous avons utilisé l'algorithme *hclust* du logiciel R, qui a donné comme résultat le dendrogramme suivant. Nous avons choisi de créer 4 sous ensembles homogènes (Figure 18).

2) Tronçons géomorphologiques homogènes avec bande active

Précédemment, les TGH sans bande active ont été classés selon 3 facteurs. Pour les TGH avec bande active, 3 critères supplémentaires ont été introduits : la largeur de bande active adimensionnelle, le taux surfacique eau / bande active, et l'écart interquartile par TGH calculé pour la largeur de bande active adimensionnelle.

a. Algorithme mixte

Comme précédemment, les données ont été transformées pour chacun des indicateurs en utilisant la transformation de Box-Cox. Cependant, pour les TGH avec bande active, leur nombre (plus de 10 000), nécessite une étape préalable à la CAH de réduction du nombre d'individus.

Pour cela, nous avons utilisé un algorithme mixte s'appuyant sur deux étapes successives :

- La première concerne l'étape de partitionnement, en utilisant un algorithme de type CLARA.
- La seconde est la classification automatique.

Méthode de partitionnement : l'algorithme CLARA

Nous avons un tableau de données composé de plus de 10 053 individus caractérisés par 7 variables (les nouvelles variables centrées-réduites créées à partir des indicateurs après la transformation Box Cox). L'utilisation d'une classification automatique n'est pas possible en l'état car la matrice de données est trop importante pour être traitée. La réduction du jeu de données a été réalisée par un algorithme de type partitionnement. Il s'agit de classer N objets en k-partitions. L'objectif est de créer k partitions et d'effectuer des corrections jusqu'à l'obtention d'une similarité qui nous satisfasse, c'est-à-dire de réduire au maximum la similarité inter-classes et de maximiser la similarité intra-classes.

La méthode de partitionnement sélectionnée, l'algorithme CLARA (Clustering LARge Applications) est de type k-medoids. Cet algorithme est développé par (Kaufman, Rousseeuw 1990). Il s'effectue en deux temps :

1. Dans une première étape, les TGH sont partitionnés. Il faut paramétrer le nombre de classes dans l'algorithme. Dans notre cas, nous avons imposé le nombre 300, en-deçà le nombre de classes nous semblait insuffisant et au-delà le traitement algorithmique était trop lourd pour l'ordinateur dont nous disposons.
2. Dans une seconde étape, chaque TGH est affecté à une de ces classes.

Classification automatique : Classification Ascendante Hiérarchique

Notre jeu de données initiales composées de 10 053 TGH caractérisés par 6 indicateurs a été transformé en une matrice de 300 individus (classes obtenus par la méthode de partitionnement) croisés à 6 variables quantitatives. De cette matrice, une classification ascendante hiérarchique a été réalisée (Figure 19) et 14 classes ont été retenues à partir du dendrogramme :

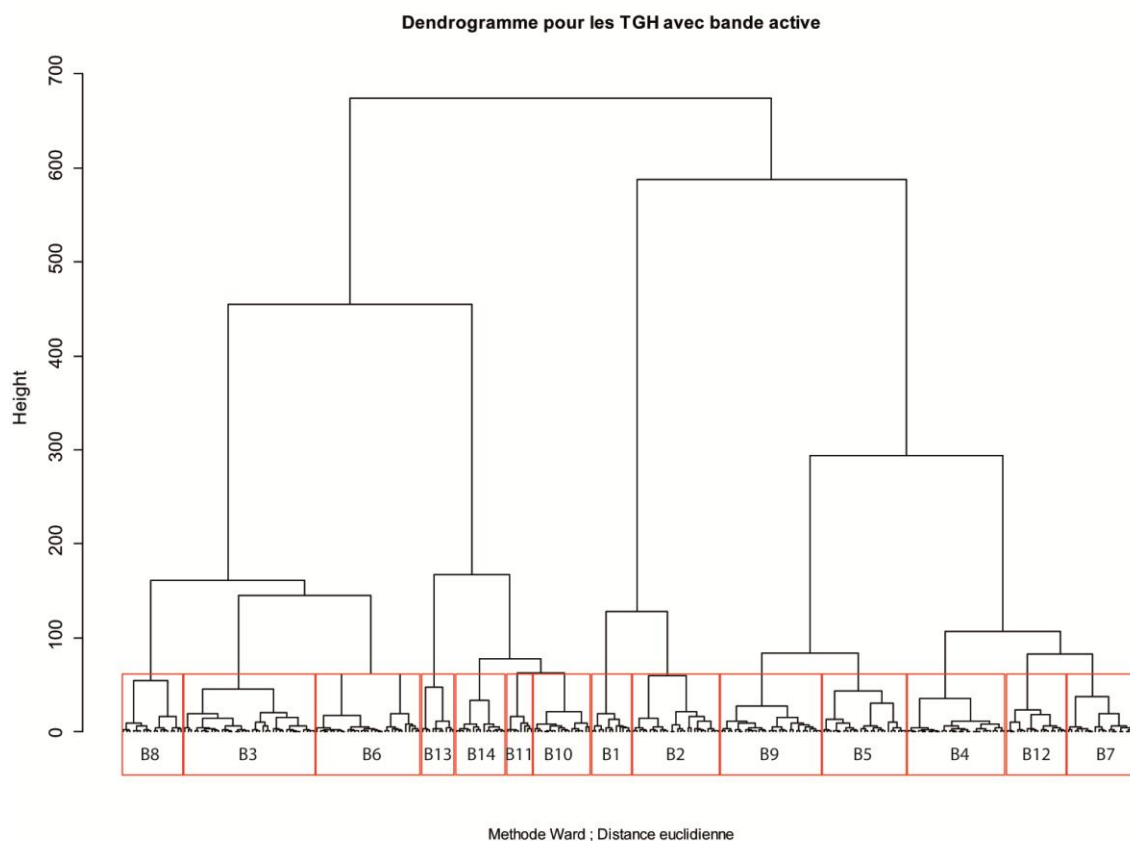


Figure 19. Résultats de la classification ascendante hiérarchique pour les TGH avec bande active.

Chaque classe est caractérisée par les indicateurs géomorphologiques (Figure 20).

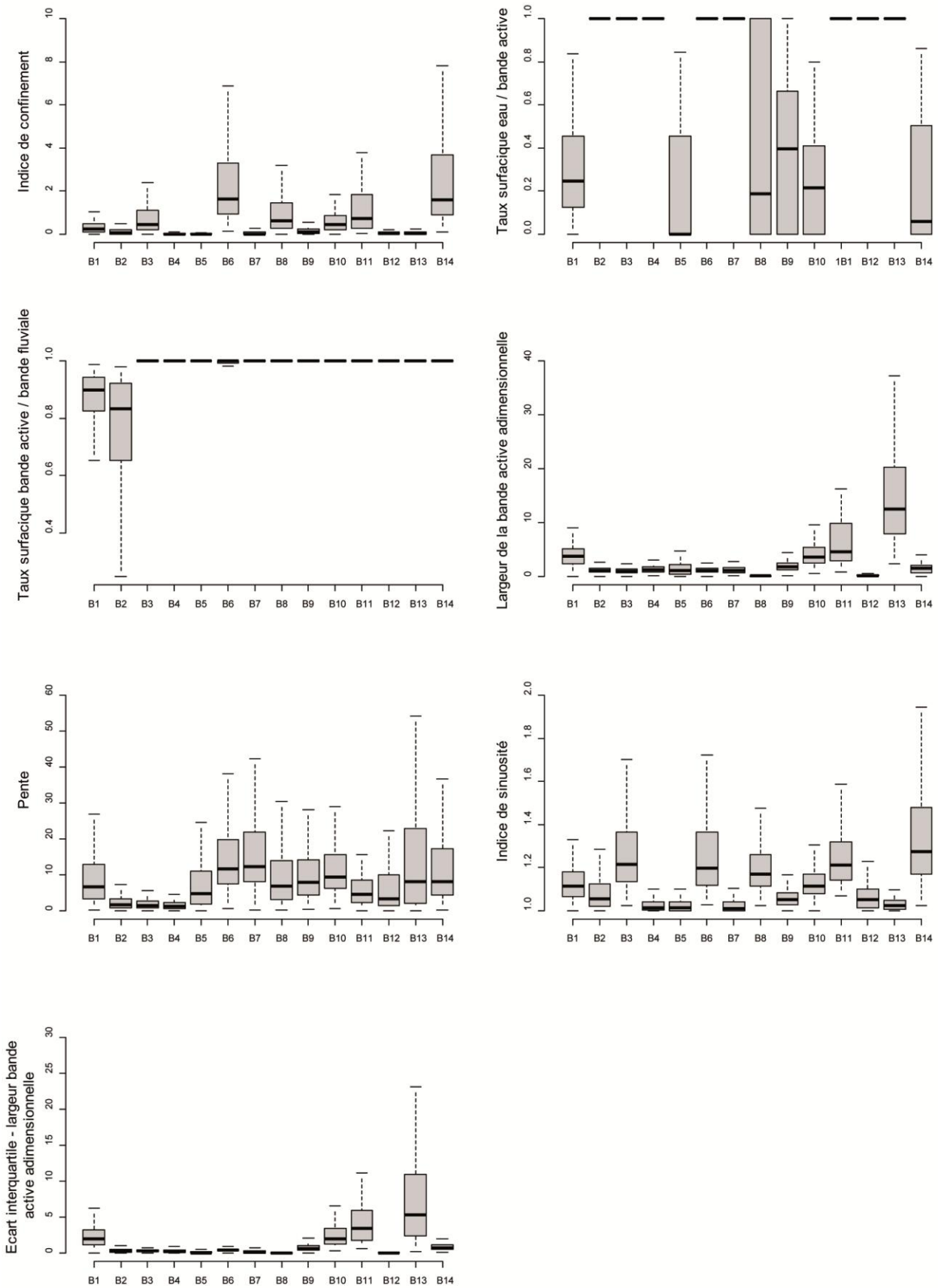


Figure 20. Caractérisation des styles fluviaux par 7 indicateurs géomorphologiques.

3) Identification des styles fluviaux à l'échelle du bassin RMC

Chaque TGH s'est vu attribué un type auquel il convient de donner une signification géomorphologique. Pour cela, nous avons observé les valeurs médianes et moyennes prises par chacun des indicateurs par classes. Ceci nous a permis d'identifier des seuils définissant plusieurs groupes par indicateurs (Figure 21). Ainsi pour la pente, nous avons créé 3 groupes : pente faible, modérée ou forte.

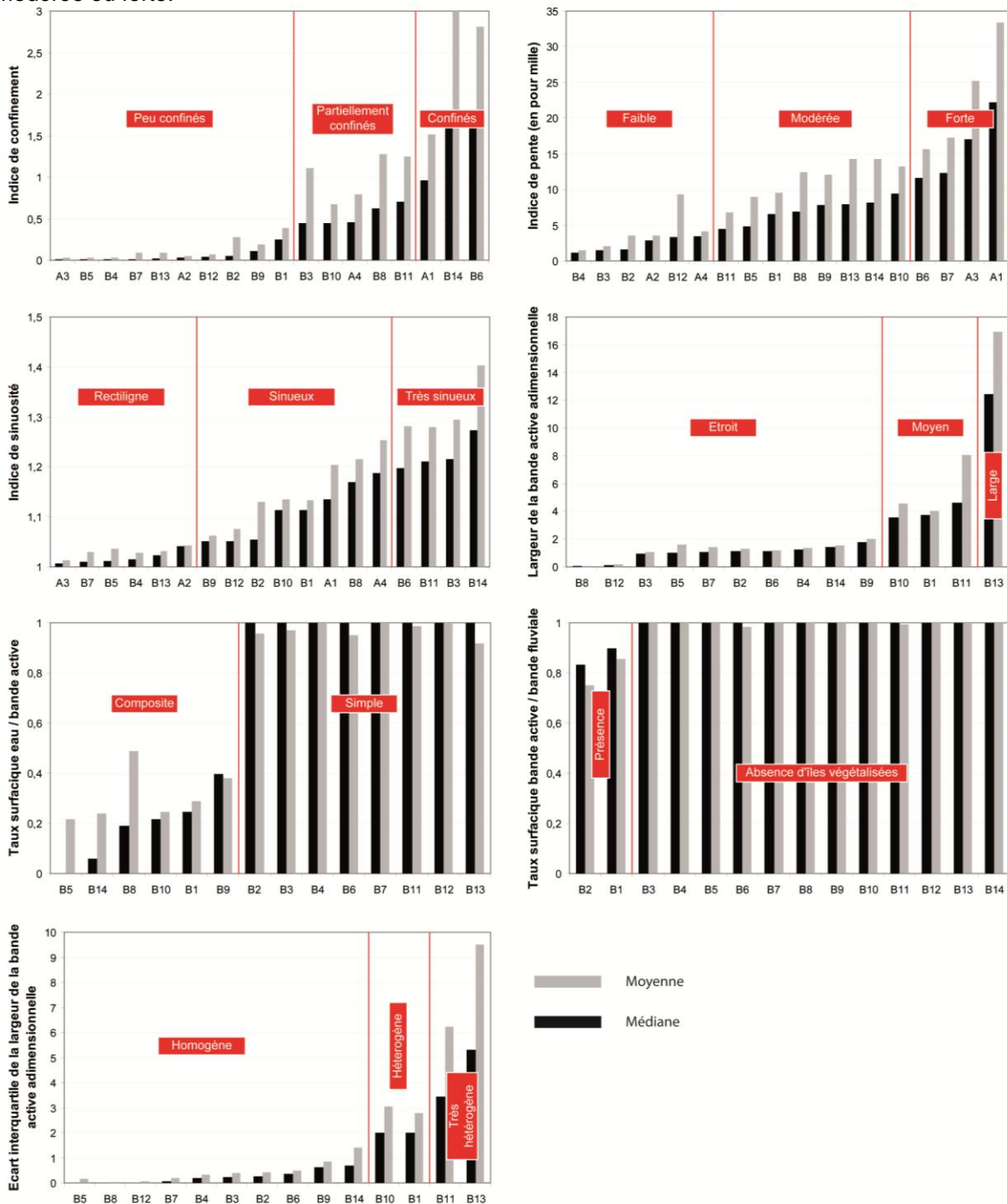


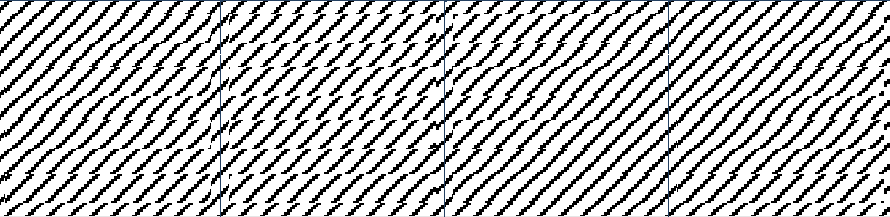
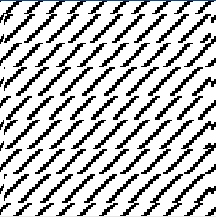
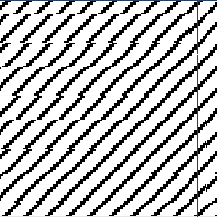
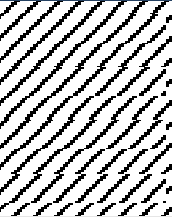
Figure 21. Valeurs médianes et moyennes par TGH des indicateurs par classes.

Nous avons ensuite mis en place une typologie de l'ensemble de ces classes. Elle comprend 3 groupes principaux :

- Les **petits systèmes**, qui correspondent aux tronçons sans bande active (identifiables à partir des données vectorisées de l'IGN).
- Les **bandes actives simples**. Il s'agit des tronçons dominés par un type d'objet : soit uniquement de l'eau, soit plus rarement seulement des bancs de galets.
- Les **bandes actives composites**, qui sont les tronçons comprenant à la fois de l'eau et des bancs de galets à des degrés différents : chenaux en tresses, ou chenaux en eau à bancs alternés.

Dans le schéma suivant, nous avons pour chacune de ces classes, décrit son type selon ces critères morphologiques, en s'intéressant d'abord aux indices de confinement et de sinuosité, puis de la pente pour l'ensemble des TGH (Tableau 7). Pour les TGH à bande active, nous avons fait une distinction entre les classes en utilisant les indicateurs de largeur. Et ensuite, nous avons nommé ces classes en fonction de leurs principales caractéristiques (Figure 22).

Tableau 7. Caractérisation géomorphologique des classes.

Types	Indice de confinement	Indice de pente	Indice de sinuosité	Largeur de la bande active adimensionnelle	Taux surfacique eau / bande active	Taux surfacique bande active / bande fluviale	Ecart interquartile de la largeur de la bande active adimensionnelle	Longueur moyenne des TGH (en m)
A1	Confinés	Forte	Sinueux					1 469,47
A2	Peu confinés	Faible	Rectiligne					1 101,34
A3	Peu confinés	Forte	Rectiligne					299,20
A4	Partiellement confinés	Faible	Sinueux					2 603,79
B1	Peu confinés	Modérée	Sinueux	Moyen	Bande active composite	Présence d'îles végétalisées	Bande active hétérogène	2 303,61
B2	Peu confinés	Faible	Sinueux	Étroit	Bande active simple	Présence d'îles végétalisées	Bande active homogène	2 035,26
B3	Partiellement confinés	Faible	Très sinueux	Étroit	Bande active simple	Absence d'îles végétalisées	Bande active homogène	3 408,09
B4	Peu confinés	Faible	Rectiligne	Étroit	Bande active simple	Absence d'îles végétalisées	Bande active homogène	1 554,27
B5	Peu confinés	Modérée	Rectiligne	Étroit	Bande active composite	Absence d'îles végétalisées	Bande active homogène	621,67
B6	Confinés	Forte	Très sinueux	Étroit	Bande active simple	Absence d'îles végétalisées	Bande active homogène	2 587,27
B7	Peu confinés	Forte	Rectiligne	Étroit	Bande active simple	Absence d'îles végétalisées	Bande active homogène	527,35
B8	Partiellement confinés	Modérée	Sinueux	Étroit	Bande active composite	Absence d'îles végétalisées	Bande active homogène	1 796,06
B9	Peu confinés	Modérée	Sinueux	Étroit	Bande active composite	Absence d'îles végétalisées	Bande active homogène	1 326,17
B10	Partiellement confinés	Modérée	Sinueux	Moyen	Bande active composite	Absence d'îles végétalisées	Bande active hétérogène	2 393,76
B11	Partiellement confinés	Modérée	Très sinueux	Moyen	Bande active simple	Absence d'îles végétalisées	Bande active très hétérogène	2 567,72
B12	Peu confinés	Modérée	Sinueux	Étroit	Bande active simple	Absence d'îles végétalisées	Bande active homogène	689,63
B13	Peu confinés	Modérée	Rectiligne	Large	Bande active simple	Absence d'îles végétalisées	Bande active très hétérogène	1 817,23
B14	Confinés	Modérée	Très sinueux	Étroit	Bande active composite	Absence d'îles végétalisées	Bande active homogène	2 354,56

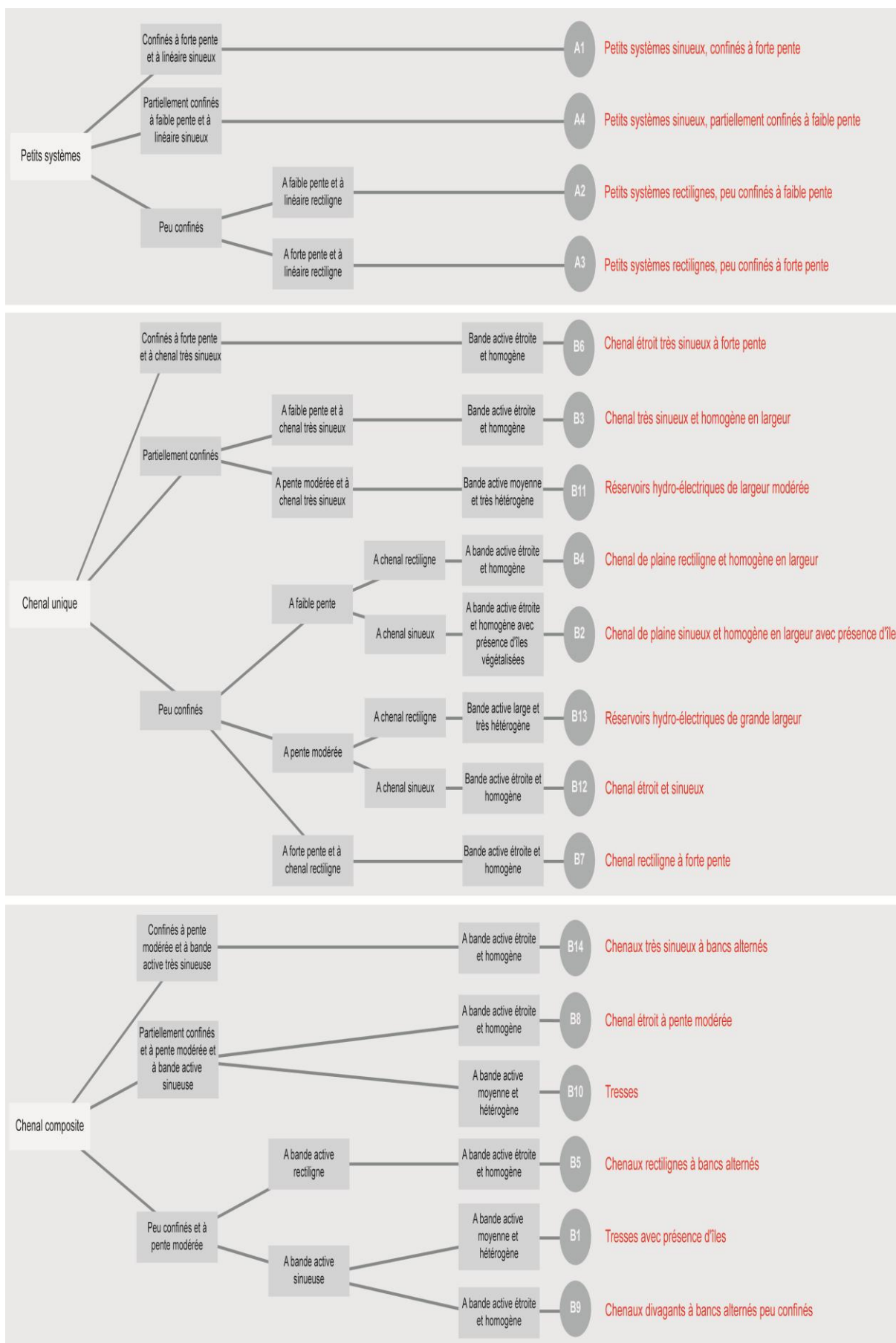


Figure 22. Schéma de la typologie des styles fluviaux du bassin Rhône Méditerranée Corse.

4) Estimation de la pertinence de la typologie des cours d'eau à l'échelle du bassin Rhône Méditerranée Corse

Pour réaliser une validation experte de qualité, il est nécessaire d'avoir une connaissance de terrain pertinente et homogène sur l'ensemble du bassin. Or nous n'avons à notre disposition aucune typologie de référence des styles fluviaux pouvant être utilisée comme point de comparaison. Par typologie de référence, nous entendons par là une typologie uniforme (faite par le même opérateur et / ou avec les mêmes données) couvrant tout le bassin.

Bien évidemment, il existe de nombreux travaux pouvant servir de point de comparaison pour un ou plusieurs secteurs mais sans méthode de reconnaissance des styles fluviaux uniforme à l'échelle du bassin il est difficile de faire une évaluation complète de notre typologie. Nous pourrions voir si notre typologie est cohérente sur le bassin de la Drôme en comparant nos résultats avec ceux de (Wiederkehr, Dufour & Piégay 2010) ou (Bertrand et al.). Nous pouvons également voir si les tronçons que nous avons défini comme des tresses (B1 et B10) correspondent à ceux identifiés par (Piégay et al. 2009). Dans ce cas particulier, la carte des tronçons en tresses que nous obtenons est assez semblable avec celle établie par (Piégay et al. 2009), ce qui est encourageant (Figure 23).

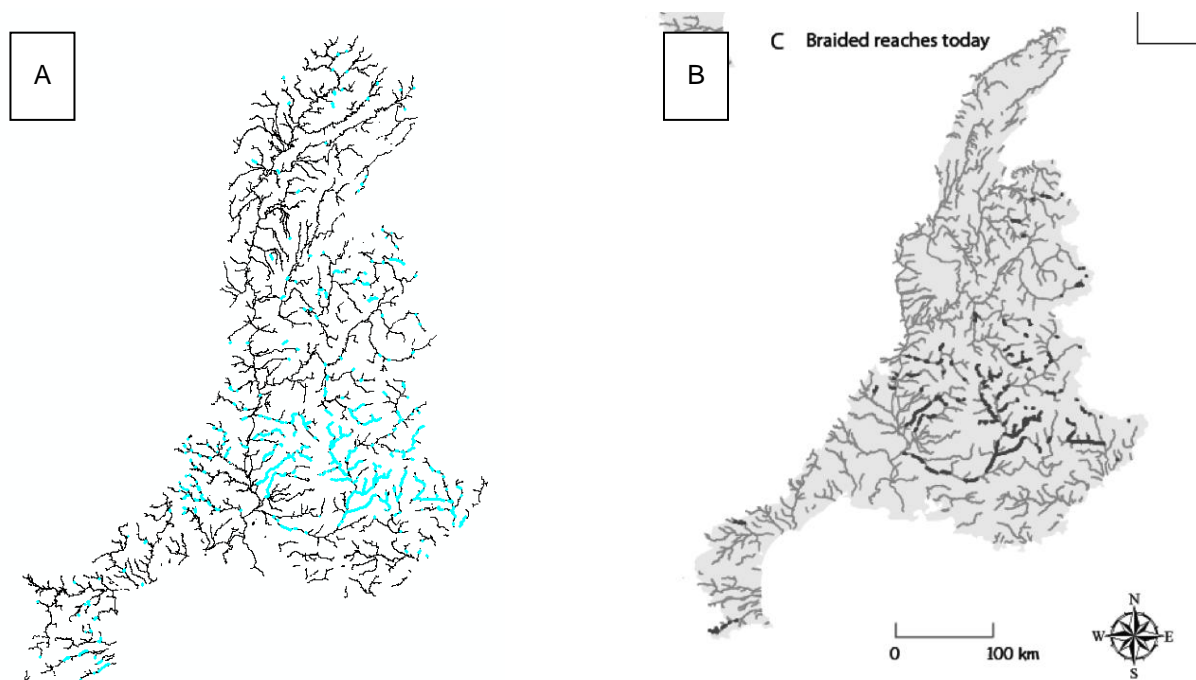


Figure 23 : Localisation des rivières en tresses par une méthode semi-automatique (A) et par analyse experte (Piégay et al. 2009) (B).

Mais tous cela n'est pas suffisant pour avoir un résultat pertinent à l'échelle du bassin RMC, c'est pourquoi nous avons décidé de mettre en place, un indice de confiance simple permettant de juger le degré de cohérence de cette typologie. On ne peut pas à proprement parler de validation de la typologie, le nombre de TGH testés est bien insuffisant (180 / 14 475, soit 1%).

a. Méthode utilisée

Pour évaluer le degré de cohérence de la typologie, plusieurs indices de confiance ont été définis :

- Un **indice de confiance global** sur l'ensemble de la typologie permettant d'avoir d'un coup d'œil une idée de la qualité de la typologie créée.
- Un **indice de confiance par indicateur**, permettant d'avoir une idée de la qualité de chaque indicateur défini précédemment.
- Un **indice de confiance par type**, pour voir la pertinence de chaque type.

Pour construire ces indices, 3 étapes ont été nécessaires :

1. En premier lieu, nous avons construit un jeu de données « test », constitué d'un échantillon de 180 TGH soit 10 par type, répartis sur l'ensemble du bassin (Figure 24). Pour faire cette sélection, la fonction « *random* » du logiciel R a été utilisée.
2. Ensuite, pour chaque TGH, nous avons donné une note (de 0 à 1) à la modalité prise par chaque indicateur en fonction de sa pertinence. Par exemple, pour l'indicateur « pente », si le TGH présentait une pente forte alors qu'il était attendu d'après la typologie une pente « faible », alors la note de 0/1 sur lui était attribuée. Les résultats obtenus ont été comparés avec la BD Topo.
3. Et en dernier lieu, chaque indice de confiance a été calculé et estimé en pourcentage.

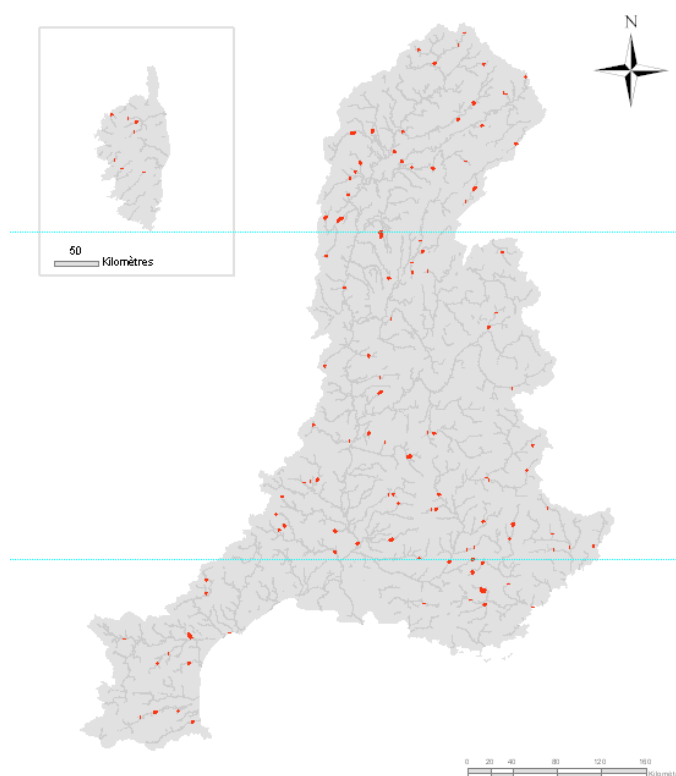


Figure 24. Répartition spatiale des 180 TGH retenus (en rouge) pour la validation de la typologie des cours d'eau du bassin RMC.

Les résultats que nous obtenons sont relativement pertinents avec un indice de confiance global de plus de 85%. Les indices de confiance par indicateur et par type sont également très satisfaisants, supérieurs à 80% (Figure 25).

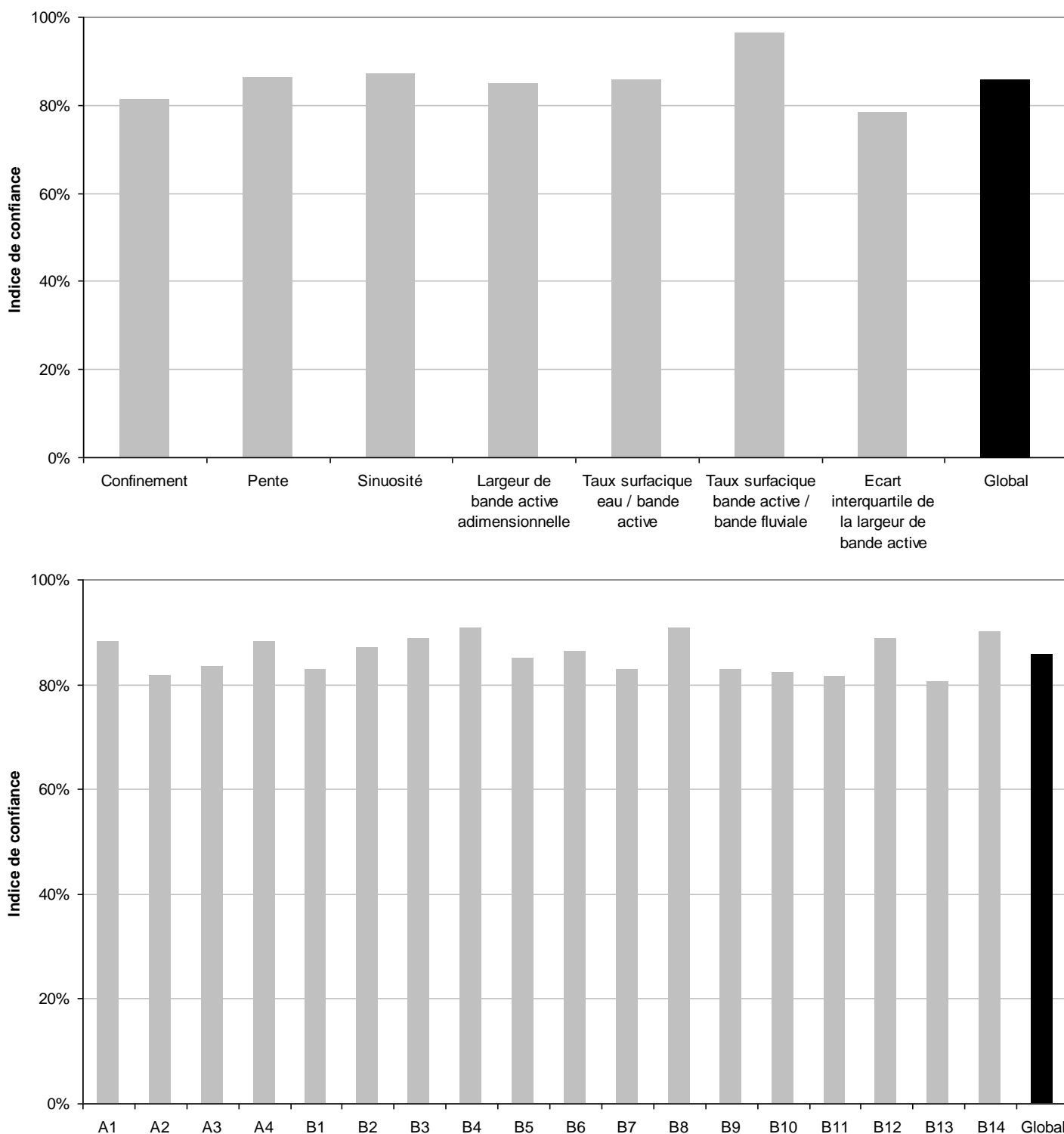


Figure 25 : Indices de confiance par indicateur et par type.

Si l'on observe le résultat par type pour chaque indicateur, on remarque que certains types sont mal définis par un ou plusieurs indicateurs. Par exemple, l'indice de confiance pour le confinement pour le type B13 est relativement moyen (inférieur à 50%) (Figure 26).

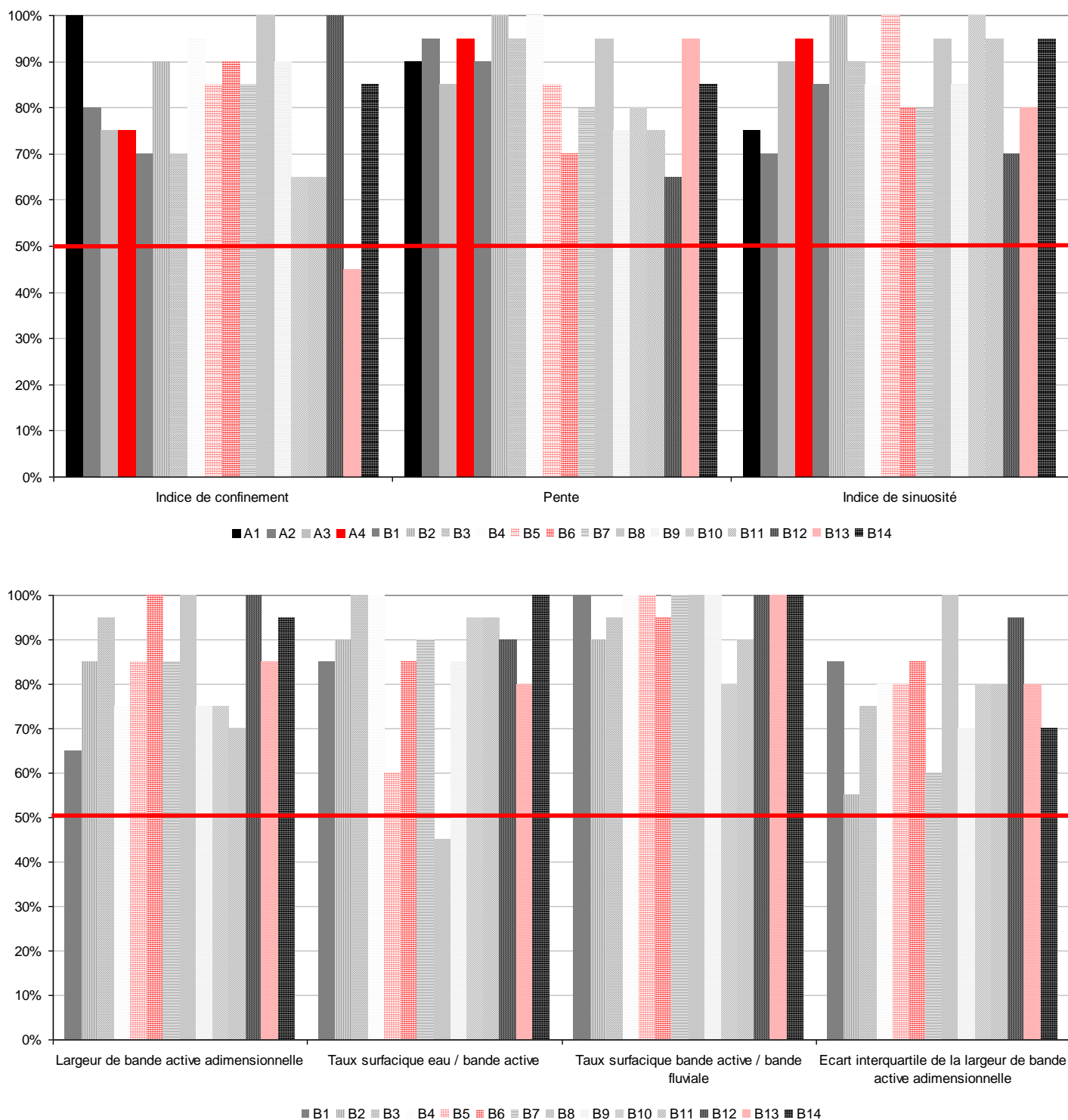


Figure 26 : Indices de confiance par indicateur en fonction du type.

En ce qui concerne le type B8, son indice de confiance pour l'indicateur « taux surfacique eau / bande active » est inférieur à 50%. Quand on observe ces cas de plus près (Figure 27), on constate qu'il s'agit de cours d'eau très étroits qui auraient dû apparaître comme des « petits systèmes ».

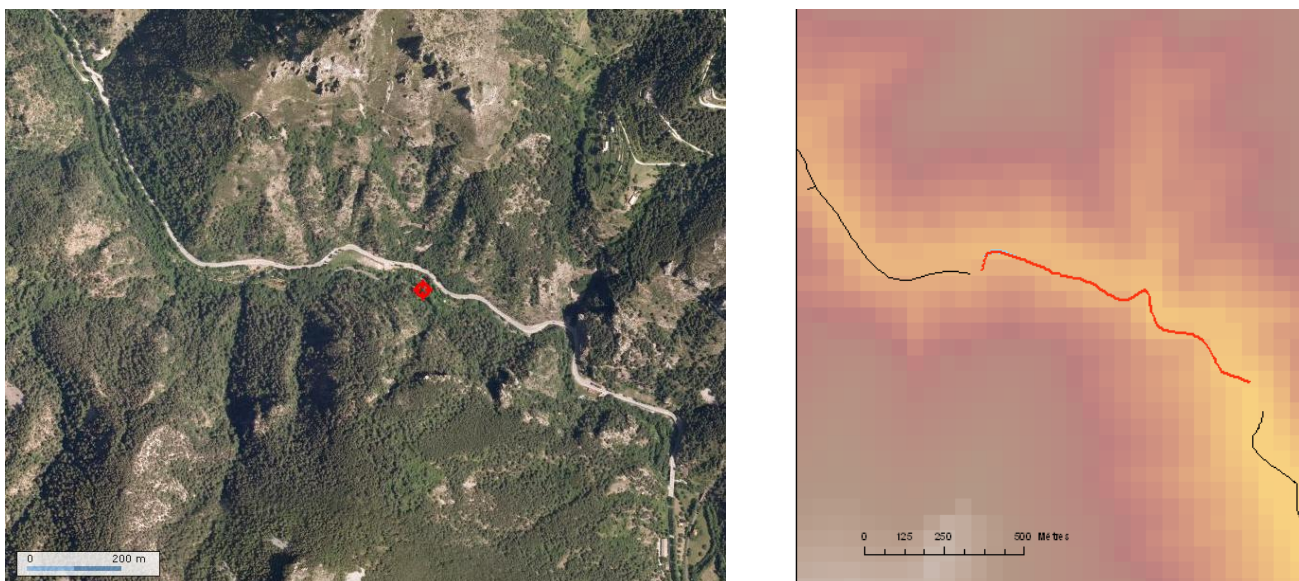


Figure 27 : Illustration d'un TGH de type B8 : à partir de l'orthophotographie (Géoportail) et représenté de manière vectorielle.

B. Analyse des styles fluviaux à l'échelle du bassin RMC

La typologie des styles fluviaux a été réalisée sur 14 475 TGH de longueur moyenne de 1,18 km. Nous avons défini 18 types de cours d'eau, sur les 17 038 km étudiés. Après avoir fusionné les TGH adjacents de type identique, nous obtenons plus que 10 543 segments dont la longueur moyenne est de 1,62 km (Tableau 8).

Tableau 8 : Présentation des segments (après fusion des TGH adjacents de même type) par types.

Types	Nombre	Longueur total (en km)	Longueur moyenne par segment (en m)
A1	986	1 449	1 469,47
A2	546	601	1 101,34
A3	896	268	299,20
A4	596	1 552	2 603,61
B1	162	373	2 303,79
B2	569	1 158	2 035,26
B3	871	2 968	3 408,09
B4	1 032	1 604	1 554,27
B5	516	321	621,67
B6	804	2 080	2 587,27
B7	1 009	532	527,35
B8	336	603	1 796,06
B9	548	727	1 326,17
B10	403	965	2 393,76
B11	106	272	2 567,72
B12	669	461	689,63
B13	113	205	1 817,23
B14	381	897	2 354,56
	10 543	17 038	1 616,02

1) Taille du bassin versant par styles fluviaux

our chaque TGH nous avons extrait la métrique « taille du bassin versant » issue des données du RHT. Nous avons ensuite représenté cette information par types (Figure 28). On remarque que les TGH des petits systèmes ont une surface de bassin versant de petites tailles, ce qui confirme leur position en tête de bassin. Les chenaux composites ont des surfaces de bassins versants de taille modérée.

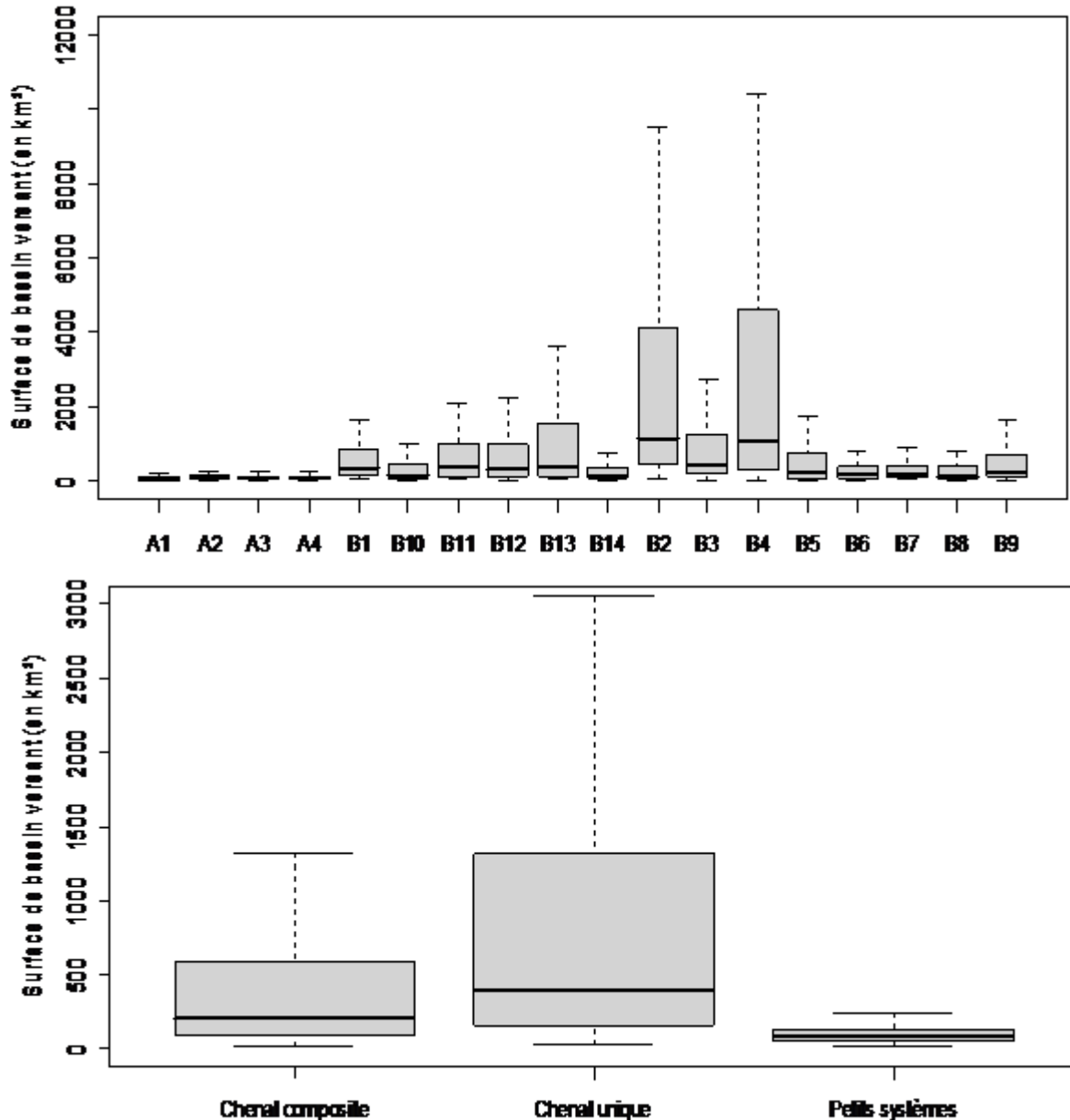


Figure 28 : Taille du bassin versant par types fluviaux.

2) Répartition des styles par hydro-écorégion

Nous avons étudié la répartition de chaque style par hydro-écorégions (Figure 29).

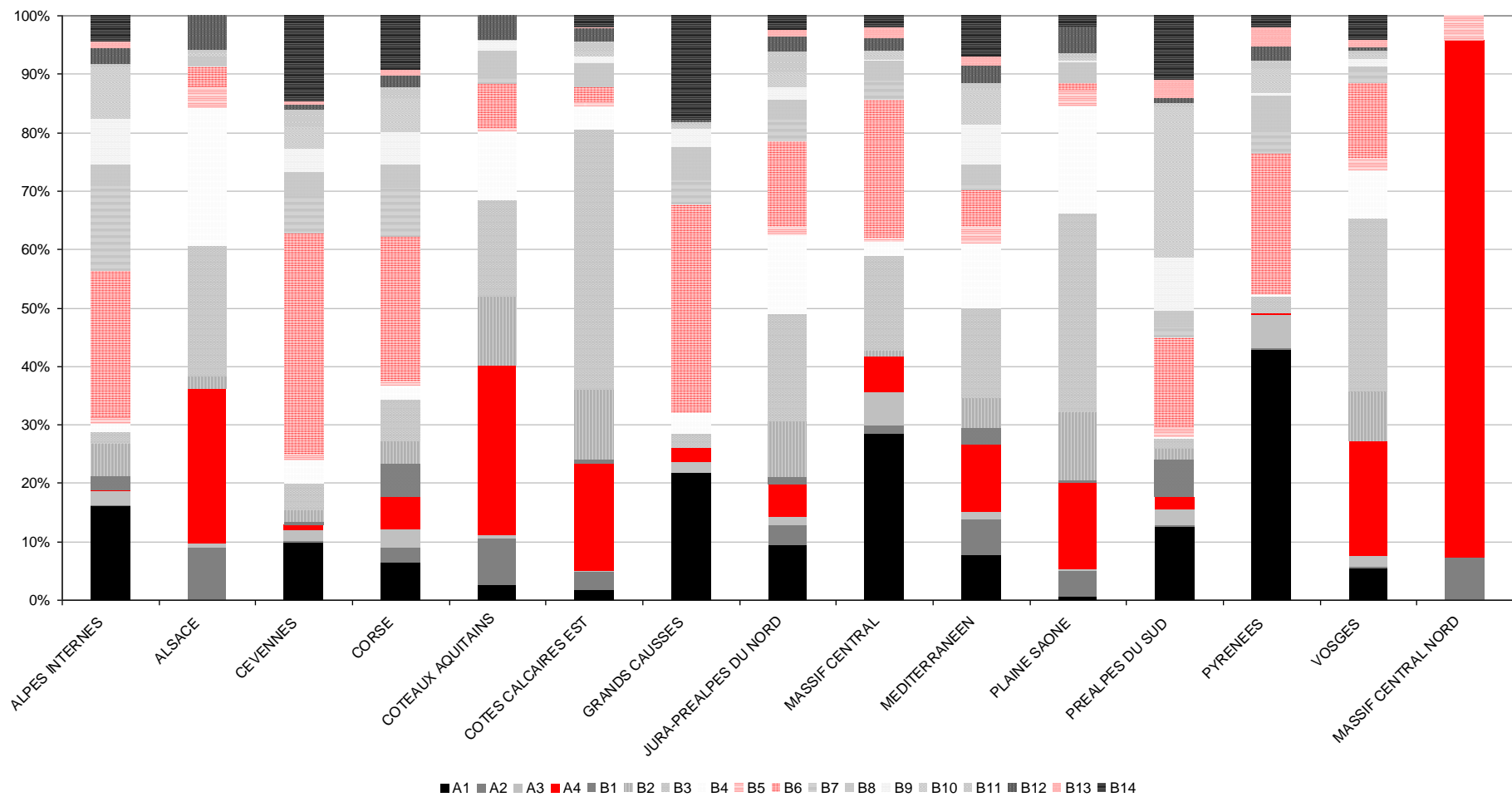


Figure 29 : Répartition (en % du linéaire) des styles fluviaux par hydro-écorégion.

PARTIE 3. IDENTIFICATION DES SECTEURS EN TRESSSES A HAUTE VALEUR PATRIMONIALE

Dans cette partie, nous allons identifier les tronçons en tresses présentant une bonne diversité potentielle d'habitats aquatiques. (Belletti, Dufour & Piégay) ont montré qu'il était possible d'identifier pour les secteurs en tresses une forte diversité des habitats aquatiques si la largeur de la zone de tressage rapportée à la taille du bassin exposant 0,47 était supérieure à 10 (Figure 30).

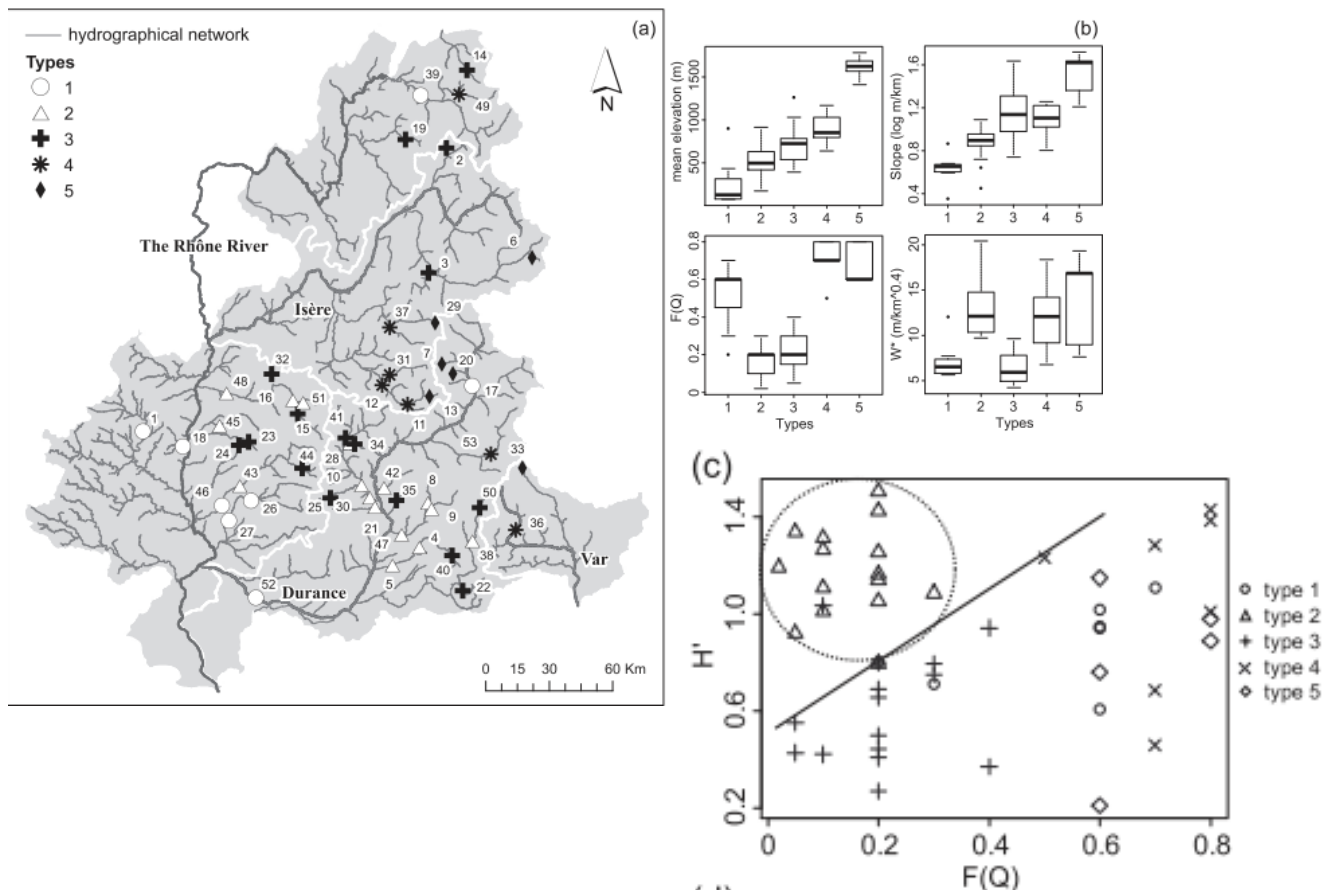


Figure 30. Caractérisation des zones d'études basées sur les facteurs de contrôle : a) Distribution spatiale des 6 types hydro-géographiques, b) Caractéristiques de chaque type hydro-géographique en fonction des facteurs de contrôle, c) Relation entre l'indice de diversité de Shannon et la fréquence de dépassement de débit (les types hydro-géographiques sont affichés). Est présentée la loi au-dessus de laquelle pour un $F(Q)$, H' n'augmente pas (Le type 2 n'est pas inclus) (Belletti, Dufour & Piégay).

A. Méthode pour déterminer les secteurs en tresses présentant une forte diversité potentielle d'habitats.

Pour identifier ces secteurs, nous avons procédé en deux étapes :

1. La première consistait à sélectionner les secteurs qualifiés « en tresses ». Nous avons donc sélectionné les tronçons classés en B1 et en B10 de la typologie. Ces deux types se caractérisent par une bande active composite de largeur de bande active moyenne à large mais hétérogène, voire très hétérogène. 771 TGH ont été sélectionnés représentant un linéaire de 1338 km.

2. La seconde était d'identifier parmi ces zones en tresses les secteurs dont la **largeur de la bande active adimensionnelle** est supérieure à 10 considérés comme des secteurs potentiels en termes de diversité d'habitats aquatiques et de les cartographier.

B. Analyse des résultats

Les résultats montrent que 5,3% des TGH en tresses (61,4 km) sont des secteurs avec une diversité potentielle d'habitats qui est forte (Figure 31).

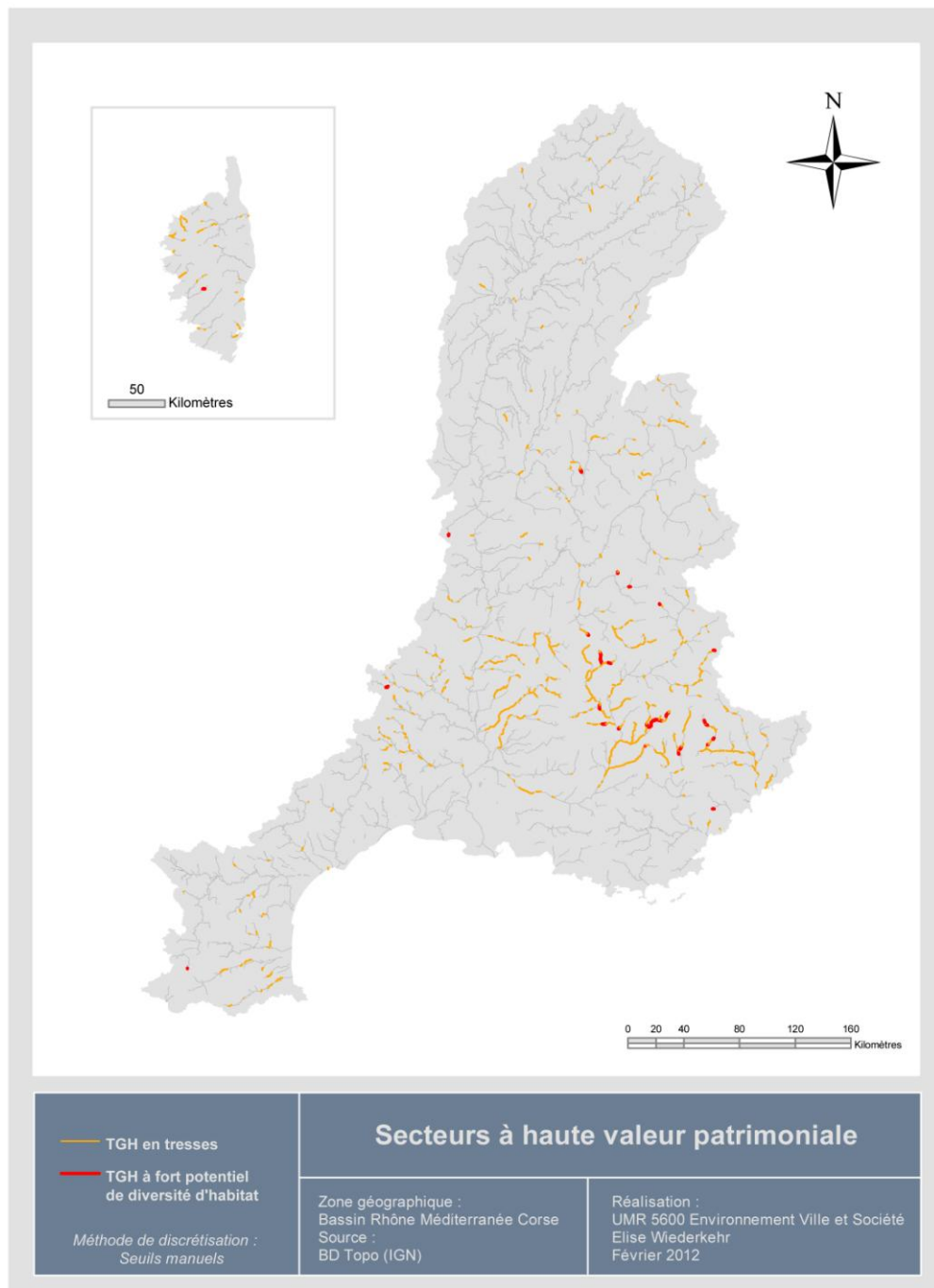


Figure 31 : Localisation des secteurs en tresses présentant un potentiel de diversité des habitats aquatiques fort

PARTIE 4. DETERMINATION DES SECTEURS PRESENTANT UNE FORTE MOBILITE LATERALE POTENTIELLE

Le tableau des descripteurs physiques des TGH du réseau hydrographique RMC peut nous servir à calculer certains indicateurs résultant de modèles préalablement définis. Dans cette partie, nous allons simplement montrer comment des données extraites par cette méthode semi-automatique, vont nous permettre d'utiliser un **modèle de prédiction de l'érosion latérale**. Il ne s'agit pas de faire une analyse de cette érosion potentielle à l'échelle du bassin RMC mais de montrer comment les données acquises peuvent être exploitées.

A. Définition du modèle de prédiction de l'érosion latérale

1) Tronçons Géomorphologiques homogènes retenus pour l'application du modèle de prédiction

Alber et Piégay (*non publié*) ont établi un modèle d'érosion latérale potentielle à l'échelle du bassin RMC. Celui-ci dépend de deux paramètres, la puissance brute pour un débit biennal et la surlargeur (largeur de la bande active rapportée à la taille du bassin versant $\wedge 0.47$). Aucune valeur d'érosion n'a été calculée pour les bassins Pyrénées et Corse, ainsi que pour le fleuve Rhône car nous n'avons pas calculé les débits biennaux et les puissances associées.

Le taux de confinement est utilisé afin de ne sélectionner que des fonds de vallée au sein desquels le chenal est potentiellement mobile. Nous n'avons ainsi retenu que les tronçons appartenant aux classes de confinement qualifiés de « peu confinés » et « partiellement confinés ». Après avoir éliminé l'ensemble des TGH où la démarche n'est pas applicable, l'érosion potentielle est calculée sur 7 148 TGH, représentant 7 785 km du réseau hydrographique *rhodanien* (Figure 32).

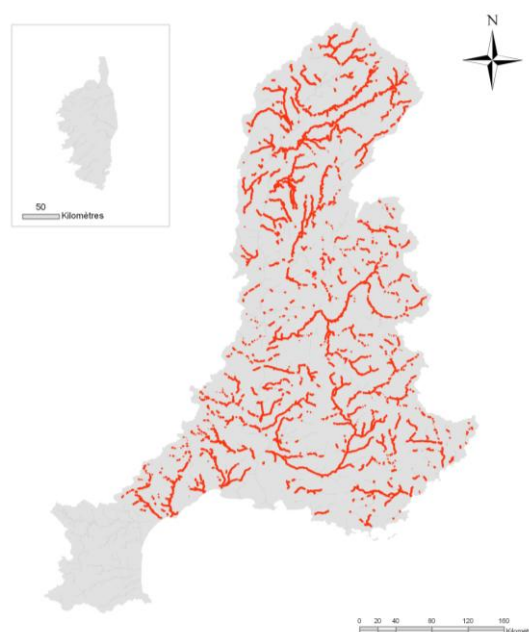


Figure 32. Réseau hydrographique où l'érosion latérale potentielle peut être prédite par SIG.

2) Les différents modèles de prédiction

L'équation suivante permet de déterminer le taux d'érosion latérale par TGH :

$$EroLat = 10^{(-1,8+0,42 \times \log \Omega + 0,47 \times \log W^*)}$$

avec W^* : largeur adimensionnelle

sachant que la puissance brute par un débit biennal s'obtient par la formule suivante :

$$\Omega = \rho g Q_2 S$$

Avec ρ : masse volumique de l'eau (1000 kg/m³), g : l'accélération de la gravité (9.8 m/s²), Q_2 : le débit de fréquence biennale et S : la pente moyenne de la ligne d'eau (en m/m) et Ω : exprimée en W/m

Le débit biennal s'obtient en appliquant la formule suivante :

$$Q_2 = a \times Surface \times v^b$$

Les coefficients a et b ont été déterminés par Alber et Piégay (*non publié*) par sous-bassin. Il n'y a pas un modèle commun à l'ensemble du bassin RMC. 15 modèles ont été définis correspondant à des sous zones du bassin du Rhône (Figure 33).

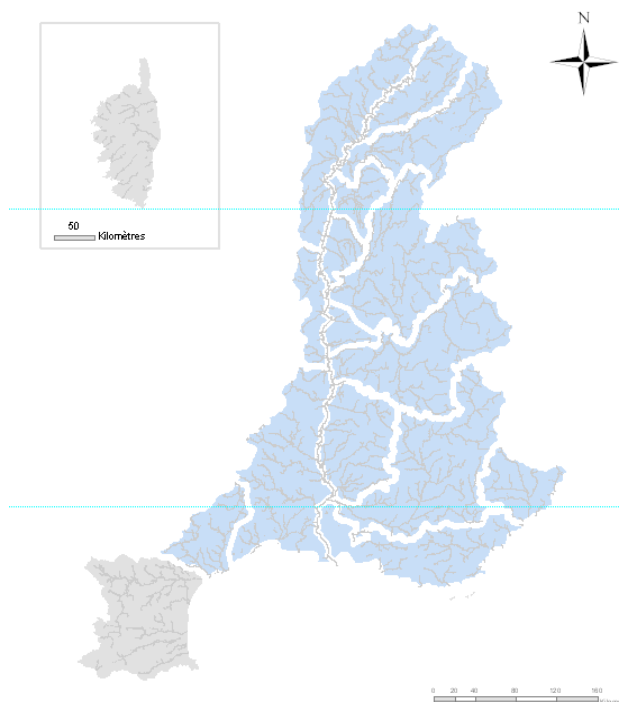


Figure 33 : Un modèle de prédiction est défini par sous-bassin (en bleu).

Pour mettre en place le modèle, nous devons procéder en 3 étapes :

1. déterminer la valeur du débit biennal par sous-bassin, sachant que la surface du bassin versant est définie pour chaque TGH par la base de données RHT.
2. calculer la puissance brute à partir du débit calculé précédemment. Nous disposons des valeurs de pente, également extraite de la base RHT.
3. appliquer le modèle d'érosion latérale, en utilisant la largeur de bande active adimensionnelle calculée pour chaque TGH.

Nous obtenons la carte suivante (Figure 34) :

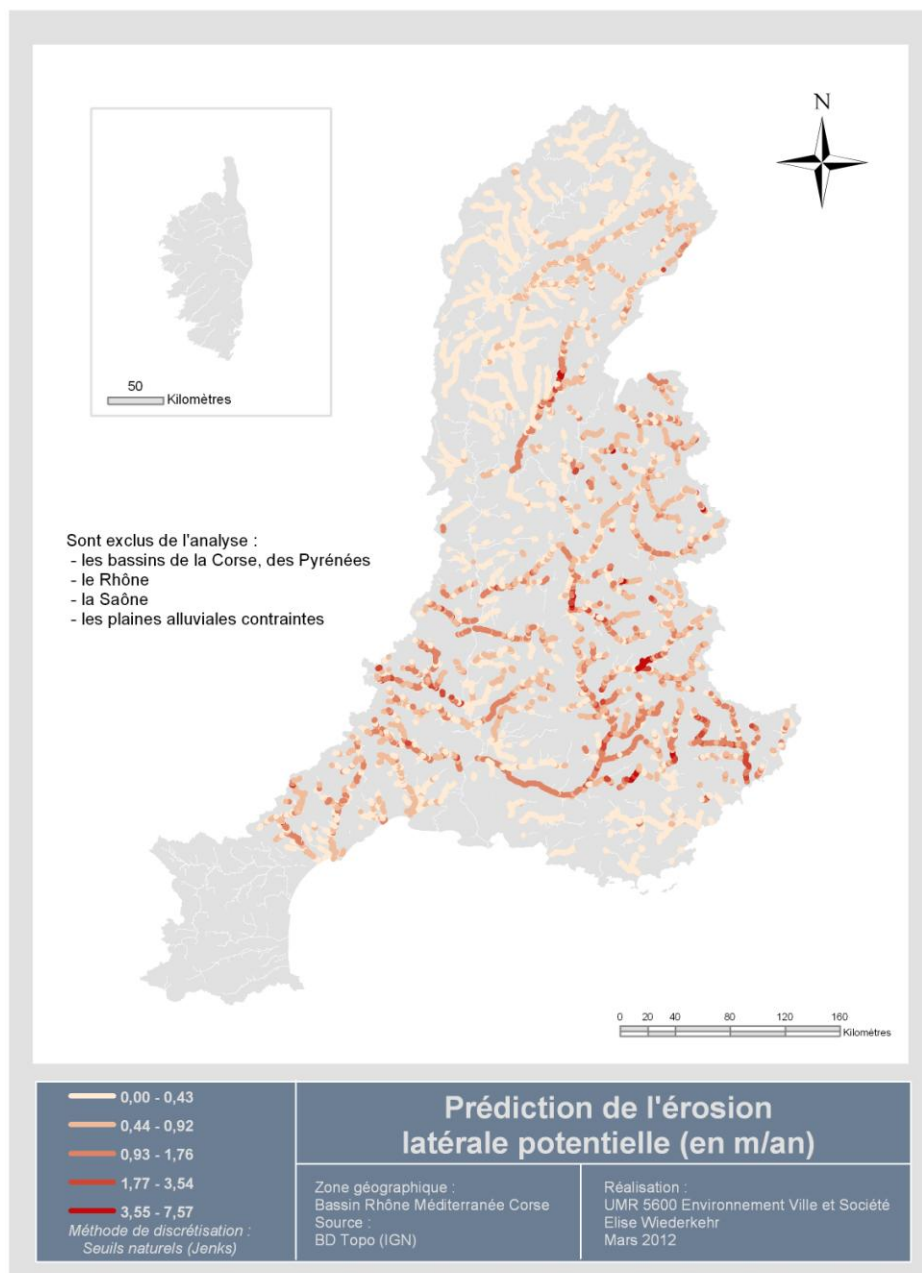


Figure 34 : Taux potentiel d'érosion latérale par TGH prédit (en m/an) à partir de la puissance brute biennale et de la sur largeur de bande active.

DISCUSSION ET PERSPECTIVES

PARTIE 1. UN TRAVAIL METHODOLOGIQUE OFFRANT DES PERSPECTIVES INTERESSANTES

L'objectif principal de ce rapport était la mise en place d'une méthode permettant la caractérisation physique à large échelle du bassin RMC via des outils géomatiques. Ce travail s'est voulu essentiellement axé sur des questions méthodologiques pour montrer les potentialités des données vectorielles. Bien qu'ayant rencontré de nombreuses difficultés en termes de traitement et de stockage de l'information, nous avons acquis des résultats qui laissent entrevoir des perspectives d'application de cette méthode à d'autres questions scientifiques ou à d'autres secteurs géographiques.

A. Élaboration d'indicateurs homogènes et continus sur un réseau hydrographique

Nous avons réussi à extraire des métriques de manière continue sur un vaste réseau hydrographique. Jusqu'à présent l'essentiel des travaux réalisés à une telle échelle étaient appliqués à des données stationnelles, qui étaient par la suite extrapolées (Schmitt et al. 2007). L'emploi de ces métriques combinées ou non à des métriques issues d'autres bases de données (RHT, par exemple) permet de créer des indicateurs d'état physique. Ces indicateurs sont établis selon la même méthode et par le même opérateur, ce qui permet d'obtenir des résultats homogènes sur l'ensemble du réseau RMC et par conséquent de réaliser une étude plus cohérente à large échelle qu'avec des données ponctuelles. Cela permet notamment de localiser les discontinuités sur le continuum, de les caractériser, ce qui n'était pas possible auparavant, et de fait de déterminer des tronçons.

1) Mise en place d'une « boîte » à outils (la Base de Données RMC – Physique)

Depuis plusieurs années, les travaux géomatiques permettant de réaliser un état des lieux à l'échelle d'un réseau hydrographique se multiplient (Valette et al. 2008, Tormos 2010). L'approche semi-automatique proposée ici est reproductible et ébauche un système d'information du réseau. En effet, nous avons conçu une boîte à outils qui peut être alimentée par d'autres données vectorielles ou attributaires. Le canevas créé peut s'appliquer à d'autres réseaux hydrographiques et, également à différentes dates permettant ainsi les études diachroniques.

a. ... pouvant être alimentée par d'autres types de données

Pour des questions d'organisation et de temps, les données de la BD Topo de l'IGN ont été utilisées. Or, nous avons déjà montré l'intérêt des données rastérisées dans les précédents rapports. Il est donc facilement envisageable d'ajouter une étape permettant l'extraction de données vectorielles à partir de l'image. De plus, nous pouvons également choisir d'utiliser des données d'autres institutions que l'IGN comme l'IFEN ou des laboratoires de recherches. Les données vectorielles ou attributaires pourront servir à alimenter la base de données une fois qu'elles auront été extraites par TGH.

b. ... pouvant être appliquée à d'autres espaces et sur plusieurs dates

L'un des avantages de cette méthode (Figure 35) est de pouvoir s'appliquer à d'autres bassins hydrographiques. L'élaboration d'indicateurs en suivant la même démarche (création de TGH) permet de faire abstraction de la subjectivité d'un opérateur et ainsi, de donner la possibilité de comparer des résultats inter ou intra-bassins.

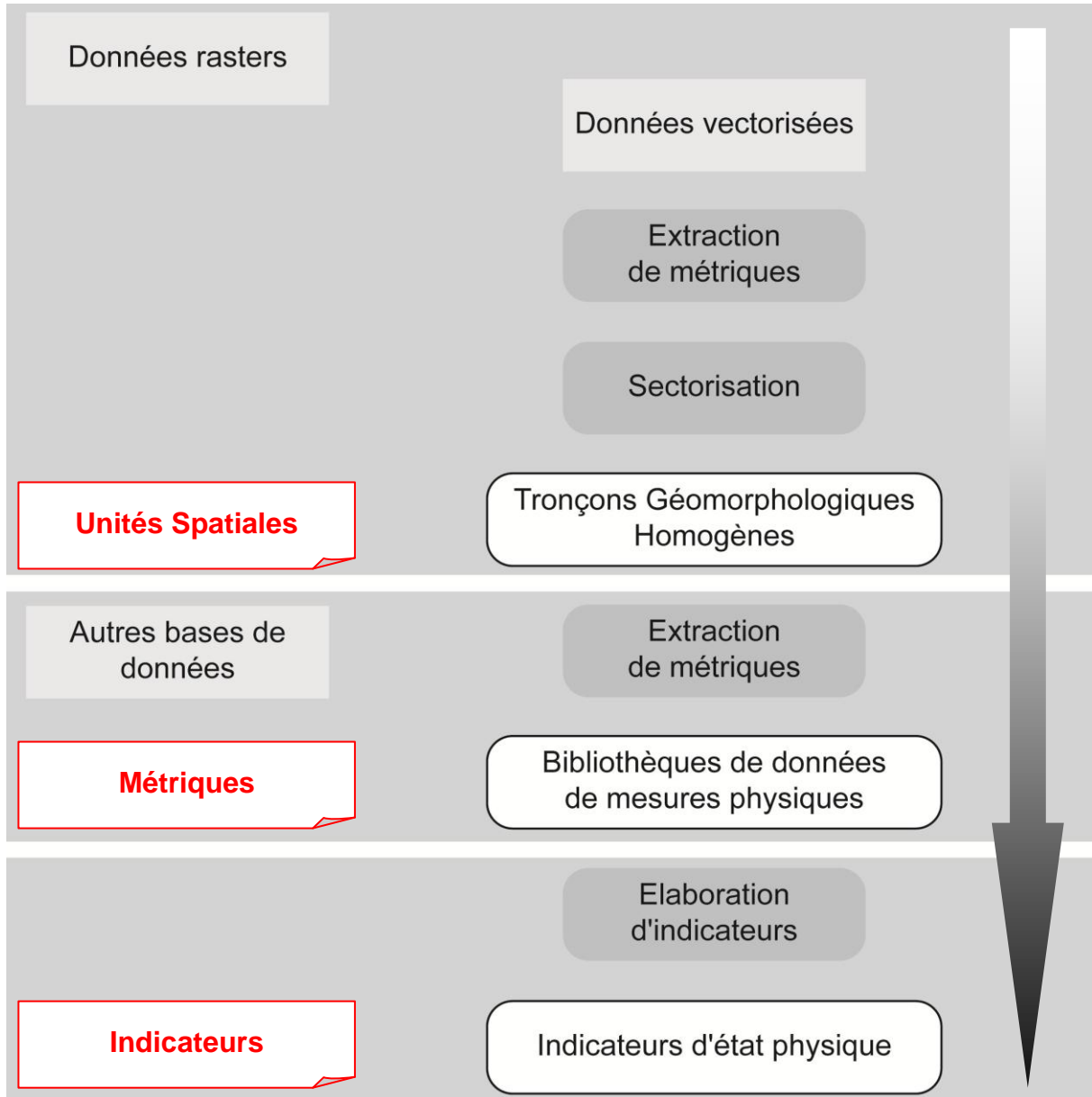


Figure 35. Schéma simplifié de la mise en place de la « boîte à outils ».

Cette méthode a été mise en place pour répondre à la question de caractériser l'état physique à un instant t . Pour réaliser une étude diachronique, il suffit de procéder de la même manière à partir de données extraites à un instant $t-x$ et ensuite de comparer les résultats. On peut envisager deux voies pour l'étude diachronique :

- Soit on reprend la démarche avant la création des TGH. Dans ce cas, on pourra comparer l'évolution de l'état physique, non pas à l'échelle du tronçon mais à une échelle plus large (sous-bassin hydrographique par exemple).
- Soit on utilise les TGH définis à l'instant t et dans ce cas une exploration des résultats inter-tronçons sera possible.

2) Comment éviter les obstacles ?

L'application de cette méthode a mis en évidence plusieurs problèmes (Tableau 9). Il ne s'agit pas de limites liées à la méthode elle-même mais plutôt au nombre de métriques disponibles qui est encore limité.

Les principales pistes à suivre pour améliorer cette démarche sont l'utilisation :

- de données vectorielles plus précises que les données de la BD Topo, pour distinguer les objets eau et bancs de sédiments correctement. Des apports dans ce domaine sont à attendre des travaux conduits par la MTD sur la Saône. Une combinaison des données produites ici sur le chenal et des données riveraines de la MTD devrait fournir de nouvelles métriques.
- du même référentiel pour l'extraction de l'ensemble des métriques sur l'ensemble du bassin afin d'éviter les problèmes rencontrés avec l'utilisation de la base de données RHT par exemple. Là, une réflexion collective s'impose pour arrêter un référentiel hydrographique commun et cela dépend évidemment des choix qui seront faits quant à la prise en compte du petit chevelu hydrographique.

L'utilisation d'autres jeux de données comme la base de données RHT ou la base SYRAH est intéressante aujourd'hui mais la principale difficulté repose sur le fait que le référentiel de départ est chaque fois différent. Le Cemagref a extrait ses données par rapport au réseau hydrographique issues de la BD Carthage. Celle-ci présentant quelques incohérences a été modifiée par (Pella et al.). Dans notre étude, nous avons créé un nouvel axe qui correspond à un mixte entre la BD Carthage et la BD Topo. Un tel choix a été fait car les polygones issus de la BD Topo ne se superposaient pas toujours au linéaire de la BD Carthage. Ces problèmes résultent de la mise à disposition progressive de nouvelles données qui impose une adaptation pragmatique.

L'une des pistes permettant une simplification pour combiner plusieurs bases de données seraient de réfléchir ensemble à un référentiel commun en termes de linéaires de cours d'eau mais aussi en termes d'unités spatiales de référence. L'équipe du SYRAH a également utilisé comme unités de base pour extraire des informations les tronçons fonctionnels sur l'ensemble du territoire national. Les résultats obtenus par leur méthode manuelle de sectorisation ne distinguent pas les tronçons en fonction du tracé en plan mais en fonction de la morphologie de la vallée. De fait, un même tronçon géomorphologique peut abriter des sections endiguées ou libres ce qui est différent en terme d'état physique. L'analyse géomorphologique devrait ainsi être considérée non pas à l'échelle du tronçon

(au sens de SYRAH) mais à l'échelle d'une section (homogène en terme de tracé en plan) pour déterminer des indicateurs physiques. De fait, le présent travail fourni, pour le bassin du Rhône, ce découpage inédit qui peut être introduit dans le calcul des indices fournis par SYRAH.

Tableau 9. Liste des problèmes rencontrés lors de l'application de la méthode et améliorations possibles.

Etapes présentant des difficultés	Problèmes rencontrés	Conséquences sur les résultats	Améliorations envisagées
Utilisation de la BD Topo	Données brutes issues d'une digitalisation	Problèmes de continuités (exemple si largeur de bande active inférieure à 7,5 m pas de données surfaciques)	En utilisant les photographies aériennes : pas de limites arbitraie mais une limite liée à la résolution spatiale
	Classe "zone intermédiaire"	Obligés de créer une couche "eau et bancs de galets" imprécises : linéaire en eau et à galets	Sur les orthophotographies, on peut dans la plupart des secteurs intermédiaires, distinguer l'eau et les bancs de sédiments. A un temps t, on peut donc avoir une "image réelle" de la bande active
	Issues des scan 25 et non pas de la BD Ortho	Les données vectorielles (exemple chenal en eau) ne peuvent pas être utilisées comme masque d'extraction des valeurs radiométriques car ne se superposent pas.	Utilisées les orthophotographies pour extraire les polygones eau et bancs de sédiments
	Capte également les lacs	Fausse les modèles (exemple largeur de bande active / surface de bassin versant)	Utilisation de la classe "B12" de la typologie pour repérer les lacs naturels et artificiels.
Construction d'un nouveau référentiel à partir de la BD Topo et de la BD Carthage	Ne se superpose ni au référentiel de la BD Carthage, ni à celui de la BD Topo	Risque d'erreurs (ne capte pas les "bons" tronçons) on utilise des données issues d'un autre référentiel (exemple données RHT)	Création d'un référentiel correspondant à l'axe médian de la bande active extraite des données vectorielles utilisées (mise en place d'une méthode automatisée gérant les confluences)
Création des TGH	Utilisation d'une étape "identifiant rivière" qui crée un TGH à chaque confluence	De nombreux TGH de petites tailles qui n'ont pas nécessairement une réalité géomorphologique pour les grands cours d'eau	Réussir à faire cette étape sans identifiant rivière
Utilisation du RHT	N'a pas le même référentiel	Risque d'attribuer des métriques au mauvais TGH	Extraire les données (pente, surface de bassin versant amont, distance de la source, ordre de Strahler) à partir de son "propre" référentiel.
Sélection des tronçons exploitables	Sélection des TGH d'ordre de Strahler supérieurs à 2 à partir du RHT	Parfois sélection de TGH d'ordre inférieur à 2	Ordination de Strahler sur notre propre jeu de données
Sélection des tronçons exploitables		L'intersection n'est pas toujours excellente : certains TGH sont oubliés	Soit vérification manuelle, soit ordination de Strahler sur notre propre jeu de données
Extraction de l'indice de sinuosité	Le référentiel créé ne correspond pas toujours à l'axe médian du fond de vallée	La valeur donnée à l'indice de sinuosité peut parfois être faussée	Création d'un axe médian correspondant à celui de la bande active.

B. Vers de nouvelles perspectives d'applications

Comme il a déjà été indiqué, cette méthode peut s'appliquer à d'autres réseaux hydrographiques sur le territoire national ou à l'étranger. Ainsi des études synchroniques inter-bassins peuvent être réalisées. Les études diachroniques sont également envisageables.

L'enjeu est maintenant d'extraire de nouvelles métriques. Dans ce rapport, les métriques extraites ou utilisées sont de type géométriques (surface, largeur, pente). Il est possible de la compléter par

l'extraction de données radiométriques comme cela était présenté dans notre précédent rapport sur les habitats piscicoles (Wiederkehr, Dufour & Piégay 2010) ou de faire de même sur la végétation riveraine. Combiner ces informations avec les informations SYRAH ou les informations issues de la caractérisation du corridor riverain est aussi une nouvelle étape à franchir.

Cette base de données pourrait être facilement alimentée par d'autres données vectorielles ou rasters qui serviront à créer d'autres indicateurs permettant d'aborder la structure paysagère des corridors fluviaux ou la caractérisation des habitats piscicoles, voire leur évolution temporelle.

Par ailleurs, plusieurs travaux sont encore en cours dans le cadre de l'UMR 5600 et devraient fournir dans les prochains mois de nouveaux résultats géomorphologiques, notamment en matière de modélisation.

Les travaux conduits dans le présent rapport ouvrent la voie à la régionalisation de la surlargeur du lit. Cette surlargeur est un indicateur des apports sédimentaires, eux-mêmes associés à des sources sédimentaires. La régionalisation des excès et des déficits sédimentaires devient ainsi possible. La thèse de M. Bertrand devrait permettre de commencer à aborder cette question en liant cette surlargeur du lit et les sources sédimentaires, au moins dans les départements alpins du sud. Par ailleurs, l'analyse de la variabilité intra-tronçon de la surlargeur doit pouvoir permettre de détecter également les secteurs rectifiés ou endigués si le chenal est linéaire. C'est aussi une voie à explorer pour mieux caractériser la pression des aménagements. Cette approche est importante notamment pour la question de l'érosion latérale car elle devrait permettre de distinguer les secteurs encore naturels où la libre divagation potentielle est prédite et de promouvoir ainsi des priorités de préservation de l'espace de liberté à l'échelle du bassin. Par ailleurs, les secteurs potentiellement mobiles mais aujourd'hui fixés peuvent aussi être détectés et des priorités, cette fois en matière de restauration de la mobilité, proposées. Cette approche nécessite par ailleurs de pouvoir disposer d'une caractérisation des milieux riverains ou d'un indicateur de l'espace potentiellement disponible pour le rétablissement de ces processus. Ces travaux qui reposent sur les résultats d'A. Alber ouvrent aussi la voie à une détermination de la largeur du fuseau de mobilité sur des rivières mobiles qu'elles soient à méandres ou en tresses (Figure 36). Un modèle logistique fondé sur la puissance brute biennale permet d'identifier par ailleurs parmi les rivières à méandres celles qui sont effectivement mobiles. Le seuil est établi à 914 Watt/m dans le bassin du Rhône.

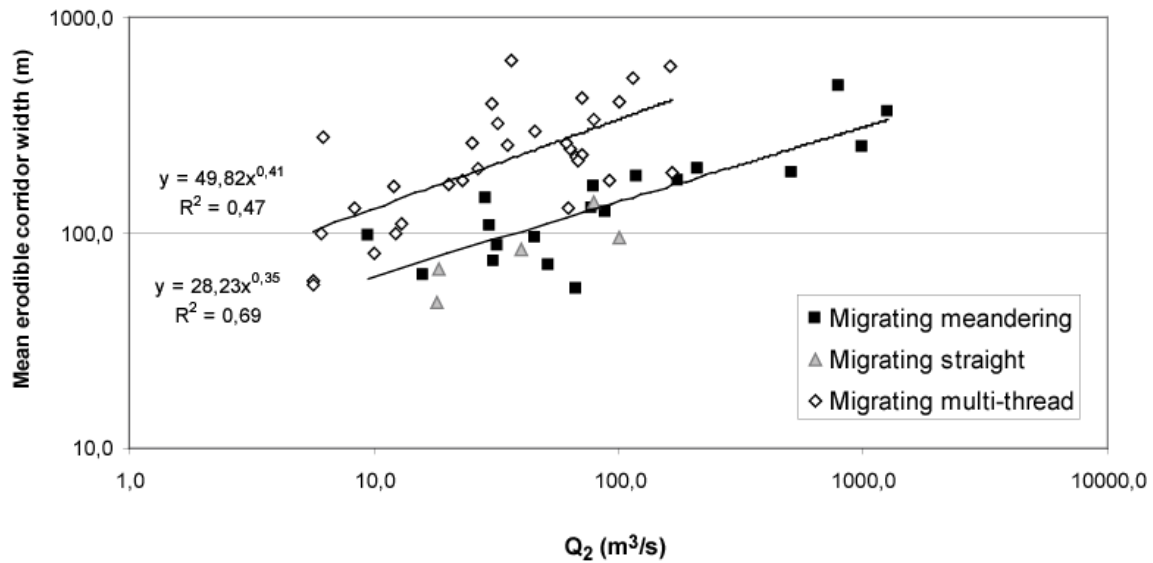
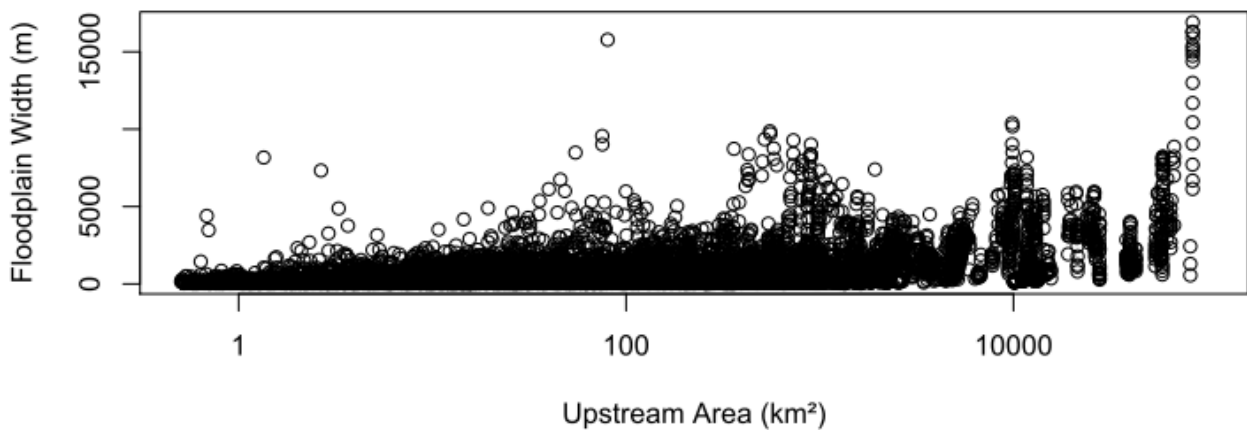


Figure 36. Régression liant la largeur du fuseau de mobilité et le débit biennal pour les cours d'eau à méandres mobiles et les chenaux multiples (A. Alber, non publié).

Les travaux de B. Notebaert également en cours sont centrés sur l'étude de la largeur des plaines alluviales. Il montre ainsi que les plaines alluviales du bassin du Rhône ont une géométrie complexe ; celle-ci n'augmente pas vers l'aval selon un modèle simple (Figure 37). Plusieurs continus ont fait l'objet d'une étude approfondie (Rhône, Saône, Ardèche, Ain, Isère, Durance). Dans le cas du Rhône, il est possible de voir l'effet de la lithologie sur l'organisation longitudinale de la plaine ainsi que des paléoenvironnements quaternaires (zone anciennement englacée amont, zone aval affectée par le relèvement du niveau marin) ou encore des apports sédimentaires de l'Ain. Ces travaux constituent également des éléments importants permettant de distinguer les contrôles structuraux des processus actifs, ce qui est important pour détecter les zones à risques en termes d'accumulation de sédiments mais aussi les zones présentant un potentiel en matière d'auto-restauration.

A) Floodplain width in function of upstream area



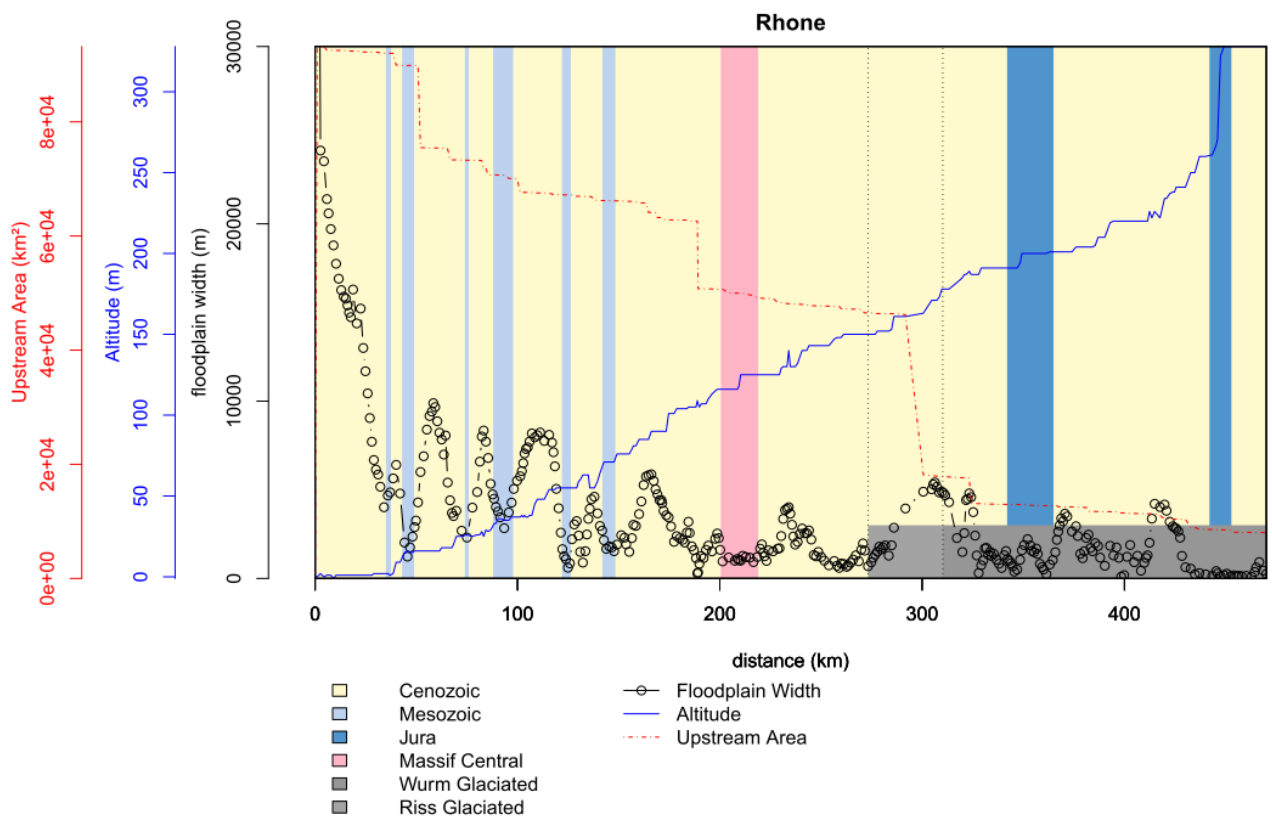


Figure 37 : Floodplain width in function of upstream area.

C. Vers une typologie des cours d'eau à l'échelle nationale

La base de données (BD RMC – Physique) qui a été mise en place en utilisant des données vectorielles (Base de données RHT ou BD Topo[®]) de l'IGN peut être réalisée à l'échelle nationale. Elle peut permettre d'extraire des métriques sur les tronçons SYRAH ou sur d'autres tronçons considérés comme homogènes en fonction de métriques données.

Les outils d'extraction automatique de mesures physiques utilisés pour le bassin RMC ont fait l'objet de la création de modèles à l'aide du module « Model Builder » d'ArcGis 10 (Figure 38). Ces modèles permettent de lancer plusieurs « outils » à la fois, ce qui permet de simplifier des opérations complexes. Ils peuvent être utilisés quasiment tels quels à l'échelle nationale même si une optimisation des traitements peut s'avérer utile.

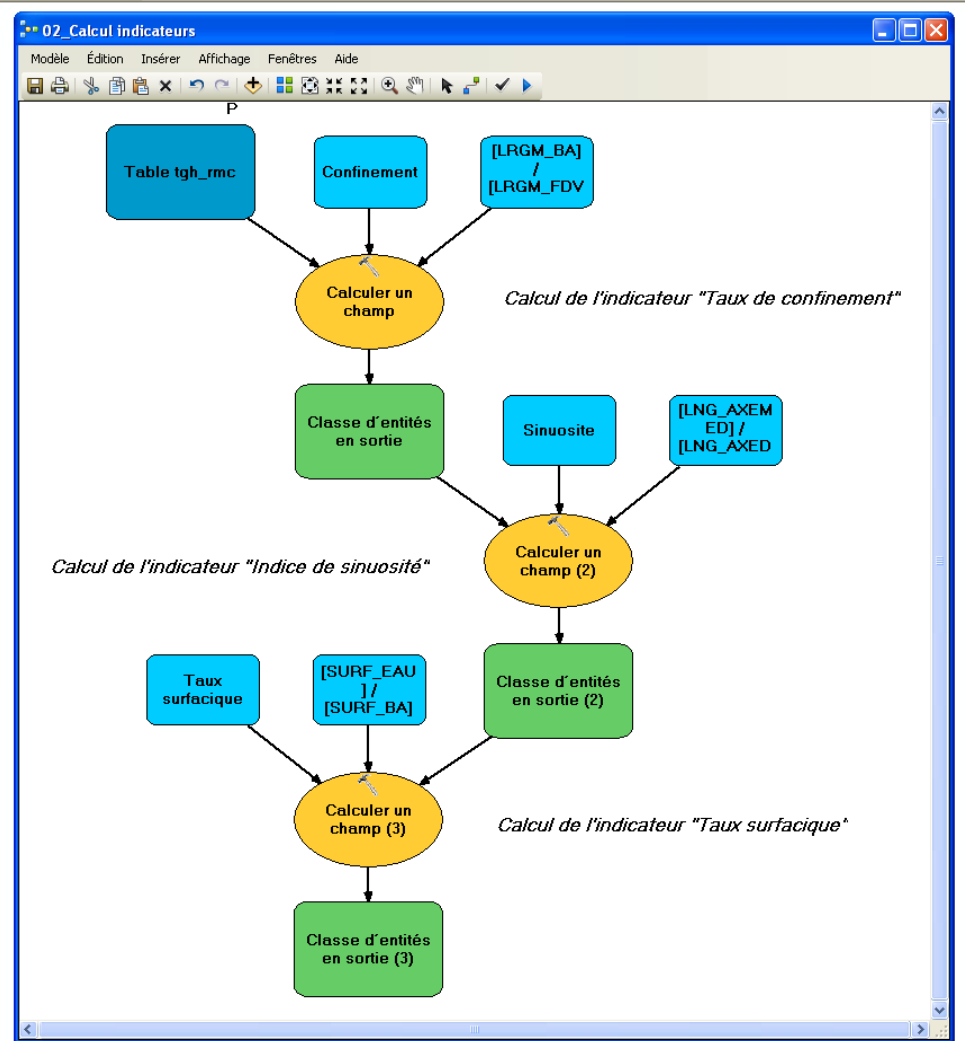


Figure 38 : Illustration d'un modèle sous Model Builder

PARTIE 1. LA GEOMATIQUE, UN OUTIL CLE POUR ENVISAGER UNE CARACTERISATION PHYSIQUE DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE.

A. Les principaux enseignements à retenir de ces quatre années de recherche

L'une des idées premières était de montrer l'intérêt de la géomatique pour réaliser des études hydrogéomorphologiques à large échelle. L'étude réalisée fin 2007 – début 2008 (Wiederkehr, Dufour & Piégay 2008) a montré que la BD Ortho de l'IGN était sans doute le support le plus pertinent en termes de coût, de résolution spatiale, spectrale, et temporelle pour évaluer la qualité physique du réseau hydrographique du bassin rhodanien.

Dans un premier temps, il a été mis en place une méthode automatique (orientée-objet) d'extraction des objets eau, bancs de galets et végétation sur l'ensemble du corridor fluvial de la Drôme. Bien que les résultats aient été très satisfaisants, les seuils définis et les paramètres utilisés pour la classification n'ont pas pu être appliqués en l'état sur l'ensemble du bassin RMC. Ceci s'explique par la qualité hétérogène des images d'un secteur à l'autre du bassin (illustrations). Maintenant, qu'il est possible de disposer du canal infra-rouge dans la BD Ortho (à la place du canal ...), cela ouvre la possibilité d'améliorer la qualité d'extraction de l'objet végétation. De plus, l'utilisation de l'image ne permet pas toujours de distinguer le chenal en eau, principalement dans les zones amont où le chenal est très étroit, ou lorsque le chenal est recouvert par la végétation ou par des zones d'ombres. Ensuite, cette étude a été complétée par la création d'une méthode semi-automatique de construction de tronçons fonctionnels, les Tronçons Géomorphologiques Homogènes. Les résultats obtenus, à partir de données vectorielles, ont été très satisfaisants (Wiederkehr, Dufour & Piégay 2010).

Dans la troisième étude, l'objectif était de voir les potentialités de l'image, et par conséquent des données radiométriques pour, dans un premier temps, identifier les faciès géomorphologiques et ensuite en extraire des indicateurs. Ce travail n'a pas été pour l'instant développé à une plus large échelle pour diverses raisons : temps de traitement relativement, qualité d'images non homogènes sur l'ensemble du réseau hydrographique rhodanien. Toutefois, (Raso 2011) a testé l'utilisation de la radiométrie pour mener une étude diachronique sur ce thème.

L'objectif de la dernière étude reposait sur l'utilisation des techniques acquises précédemment et de les tester non plus sur une partie du bassin mais sur l'ensemble du bassin. Comme il a été expliqué ci-dessus, la méthode donne des résultats pertinents malgré les difficultés liées au traitement et stockage de données sur un territoire aussi vaste.

Tableau 10. Bilan des quatre études réalisées depuis 2007.

Titre de l'étude	Date de rendu		Principaux résultats	A l'heure actuelle
<p>Apport des techniques d'imagerie pour la caractérisation physique des corridors fluviaux. Synthèse des connaissances et extraction d'indicateurs. (Wiederkehr, Dufour & Piégay 2008)</p>	avr-08	BD Ortho	La BD Ortho ressort comme le meilleur compromis en termes d'images pour une caractérisation physique à large échelle d'un réseau hydrographique : données continues et homogènes, très haute résolution spatiale, données dans le visible.	De nouveaux capteurs sont disponibles. L'IGN fournit le canal infra-rouge de la BD Ortho.
		BD Topo	Avantage : interprétation des données déjà faite, données vectorisées et uniformes sur l'ensemble du territoire. Inconvénients : non maîtrise de l'interprétation (végétation, galets, surface des chenaux inférieur à 7,5 m indisponible).	Données pas toujours précises : zones intermédiaires (eau + bancs). Donnée végétation n'est pas disponible sur l'ensemble du bassin.
		Indicateurs	Elaboration d'indicateurs : état des possibilités de l'image pour l'extraction de métriques et la construction d'indicateurs. Mise en place d'une démarche de création d'indicateurs.	Démarche d'élaboration d'indicateurs conservée et améliorée.
<p>Caractérisation du corridor naturel alluvial du réseau hydrographique du bassin du Rhône à partir des orthophotographies de l'IGN. Premiers retours d'expérience pour l'élaboration de modèles hydrogéomorphologiques prédictifs. (Wiederkehr, Dufour & Piégay 2009)</p>	mai-09	Méthode	Extraction du fond de vallée à partir des orthophotographies de l'IGN sur le bassin de la Drôme	A l'échelle du bassin RMC, l'extraction automatique du fond de vallée a été réalisée et la couche est disponible
			Extraction des classes d'objets (eau, bancs et végétation) sur le bassin de la Drôme par une méthode orientée-objet : résultats satisfaisants. Difficultés sur les secteurs amont (trop étroits ou végétation recouvrant le chenal) + ombres portées faussent les résultats.	Le passage de la classification semi-automatique (eau / bancs de galets / végétation) du bassin de la Drôme à celui du bassin RMC a présenté de grandes difficultés : qualité d'image hétérogène sur l'ensemble du bassin + paysages très contrastés donc la classification automatique ne peut pas s'appliquer avec les mêmes seuils sur l'ensemble du bassin.
			Création d'unités spatiales : DGO. Segmentation du chenal en eau tous les 10 m. Méthode acquise.	A l'échelle du bassin RMC, la segmentation est faite tous les 100 m, sinon trop long. A l'échelle du bassin RMC, cette sursegmentation est largement suffisante.
		Indicateurs	Extraction de métriques radiométriques et géométriques sur le bassin de la Drôme.	Les métriques géométriques (à partir de données vectorielles) sont envisageables sur le bassin RMC. L'extraction des métriques radiométriques peut également être envisagée mais prévoir un temps d'exécution très long.
Indicateurs	Nombreux champs thématiques peuvent être abordés à partir des orthophotographies : étude des styles fluviaux, mosaïque paysagère, habitats piscicoles.	Styles fluviaux : fait sur l'ensemble du bassin RMC avec des données vectorielles / Mosaïque paysagère : ne peut pas être réalisée à l'échelle du bassin RMC (pas de données raster ou vecteur de la végétation) / Habitats piscicoles : Essai réalisé seulement sur un tronçon de la Drôme.		

Titre de l'étude	Date de rendu		Principaux résultats	A l'heure actuelle
Intégration de données extraites des ortho-photos de l'IGN pour la caractérisation et la modélisation de l'habitat aquatique. (Wiederkehr, Dufour & Piégay 2010)	juin-10	Métriques	Extraction de métriques radiométriques sur des unités spatiales construites (1) à partir de l'étape de segmentation d'une méthode orientée-objet ou (2) à partir de la segmentation du chenal tous les 10 m.	Limites spatiales : en amont pas possible
		Détermination des faciès géomorphologiques	Détermination des faciès géomorphologiques (bancs de galets, seuils, mouilles, plats) sur 25 km de cours d'eau de la Drôme	Impossibilité d'utiliser les mêmes paramètres de définition des habitats sur d'autres secteurs géographiques
		Production de paramètres synthétiques	Mise en place d'une clé de détermination par analyse du signal et de la texture sur quelques stations RHP pour extraire des informations sur la rugosité du cours d'eau et la répétitivité de la structure spatiale.	Résultats encourageants sur certains secteurs mais encore beaucoup trop dépendants de la qualité de l'image et de la nature du cours d'eau : zones profondes, reflets, turbulence.
		Approches multi-dates	Premiers résultats montrent que la détermination de l'habitabilité du cours d'eau en fonction du débit étalonnée à partir de photographies aériennes à différents débits est possible. Il est également envisagé d'élaborer un modèle de prédiction des hauteurs d'eaux au niveau de chaque station à partir de la largeur extraire des images.	Pour l'instant les tests n'ont été réalisés que sur un tronçon de l'Ain.
Indicateurs de caractérisation physique des milieux aquatiques. Premiers rendus cartographiques et premières analyses à l'échelle du réseau hydrographique.	fev-12	Tronçons Géomorphologiques Homogènes	Identification de TGH sur l'ensemble du bassin RMC : obligation de faire intervenir la donnée « confluence » pour lancer le traitement de manière automatique.	Possibilité d'utiliser une procédure automatisée pour déterminer la sectorisation d'un réseau
		Extraction des métriques et élaboration d'indicateurs	Extraction de métriques à partir des données vectorielles de la BD Topo qui sont insuffisantes en termes de précision (obligation d'avoir une donnée « eau + bancs ») et utilisation des données RHT qui ne sont pas sur le même référentiel que le nôtre.	Peut-être améliorée si utilisation d'une couche vectorielle plus précise que celle de la BD Topo. Exemple utilisation des données vectorielles extraites de l'image.
		Typologie des cours d'eau	Détermination des styles fluviaux à l'échelle du bassin RMC.	
		Détermination des secteurs en tresses à forte potentialité de diversité d'habitats	Identification des secteurs en tresses du bassin RMC dont la diversité potentielle d'habitats est forte	

Pour résumer succinctement ces quatre années de recherche (Tableau 10) :

La géomatique est devenue un outil indispensable au géomorphologue d'aujourd'hui. Les progrès fait au niveau des logiciels de traitement et de stockage, ou la plus grande disponibilité des données ou leur meilleure résolution permettent de réaliser des études à large échelle s'appuyant sur des données continues et homogènes sur des milliers de kilomètres. L'accès à ces données est rendu plus facile, car l'offre est plus vaste et l'IGN met maintenant à disposition des laboratoires de recherche une grande partie de ses bases de données. Le développement de ces travaux va offrir dans les années à venir à l'utilisateur de nouvelles possibilités de traitement sans doute plus rapide et à des coûts de plus en plus faibles. C'est pourquoi les limites rencontrées durant ces quatre années sont pour la plupart conjoncturelles ce qui laisse présager à court voire moyen termes de nouvelles solutions.

B. Et les études de terrain ?

Les avancées technologiques de ces dernières années ont permis de développer et d'améliorer les études portant sur la caractérisation physique à large échelle. L'utilisation des outils géomatiques n'est cependant pas la « réponse à tout ». En effet, ces différentes études ont montré leurs limites notamment sur les parties amont du bassin : les résolutions spatiales des images ne permettent pas toujours de travailler sur des bandes actives étroites. Dans ce cas, l'image est donc insuffisante, quelle que soit sa résolution si l'on souhaite compléter les informations, il semble donc indispensable de faire des mesures in-situ.

ILLUSTRATIONS ET REFERENCES

Tables des illustrations

Figures

Figure 1. Démarche de création d'indicateurs	6
Figure 2. Exemple des polygones extraits à partir de données de la BD Topo®.....	13
Figure 3. Répartition de la surface de bande active identifiée à partir de la BD Topo®.....	13
Figure 4. Présentation du nouveau référentiel en fonction de la couche « Hydro » de la BD Carthage et de la couche « Tronçon » de la BD Topo.	14
Figure 5. Illustration du linéaire (A) et des polygones (B) à intersecter (C). Présentation du linéaire avec les secteurs intitulés « non visible » en rouge (D).	15
Figure 6. Répartition du type de linéaire sur le bassin RMC.	16
Figure 7. Exemple d'une série de valeurs (largeur du fond de vallée) mesurées tous les 100 m et agrégées ensuite à l'aide d'un test de Pettitt.	18
Figure 8. Illustration des « identifiants » de rivière (A) ; du fond de vallée (B) et de la bande active segmentée en fonction de sa largeur (C).	18
Figure 9. Illustration de la démarche d'élaboration des tronçons géomorphologiques homogènes de l'étape 2 à 5.	20
Figure 10. Histogramme représentant la longueur des tronçons géomorphologiques homogènes.	21
Figure 11. Illustration des polygones eau et bancs de galets (A) permettant la construction de la bande active (B). Identification des îles végétalisées (C) et construction de la bande fluviale (D).	23
Figure 12. Calcul des métriques : à partir d'un polygone, calcul de la surface (A) ; à partir d'une polyligne, calcul de la longueur du tronçon (B) et de la longueur à vol d'oiseau (C).	24
Figure 13. Représentation des linéaires en eau et à galets sur le bassin Rhône Méditerranée Corse.....	30
Figure 14. Répartition du linéaire de chaque type de polygones par bassin hydrographique.	31
Figure 15. Répartition de la surface de chaque type de polygones par bassin hydrographique (A) et dendrogramme réalisé à partir des données surfaciques sur les différents types de polygones par bassin hydrographique (obtenu par classification ascendante hiérarchique) (B).	32
Figure 16. Dendrogramme réalisé à partir des données représentant la répartition en pourcentage de chaque type de polygones par hydro-écorégion.	34
Figure 17. Présentation de la démarche conduisant à la mise en place d'une typologie des styles fluviaux à l'échelle du bassin Rhône Méditerranée Corse.	37
Figure 18. Résultat de la classification ascendante hiérarchique pour les TGH sans bande active caractérisés par 3 indicateurs géomorphologiques.	40
Figure 19. Résultats de la classification ascendante hiérarchique pour les TGH avec bande active.	42
Figure 20. Caractérisation des styles fluviaux par 7 indicateurs géomorphologiques.....	43
Figure 21. Valeurs médianes et moyennes par TGH des indicateurs par classes.....	44
Figure 22. Schéma de la typologie des styles fluviaux du bassin Rhône Méditerranée Corse.	47
Figure 23 : Localisation des rivières en tresses par une méthode semi-automatique (A) et par analyse experte (Piégay et al. 2009) (B).....	48
Figure 24. Répartition spatiale des 180 TGH retenus (en rouge) pour la validation de la typologie des cours d'eau du bassin RMC.	49
Figure 25 : Indices de confiance par indicateur et par type.	50
Figure 26 : Indices de confiance par indicateur en fonction du type.	51
Figure 27 : Illustration d'un TGH de type B8 : à partir de l'orthophotographie (Géoportail) et représenté de manière vectorielle.	52
Figure 28 : Taille du bassin versant par types fluviaux.	54
Figure 29 : Répartition (en % du linéaire) des styles fluviaux par hydro-écorégion.	55
Figure 30. Caractérisation des zones d'études basées sur les facteurs de contrôle : a) Distribution spatiale des 6 types hydro-géographiques, b) Caractéristiques de chaque type hydro-géographique en fonction des facteurs de contrôle, c) Relation entre l'indice de diversité de Shannon et la fréquence de dépassement de débit (les types hydro-géographiques sont affichés). Est présenté la loi au-dessus de laquelle pour un $F(Q)$, H' n'augmente pas (Le type 2 n'est pas inclus) (Belletti, Dufour & Piégay).	56
Figure 31 : Localisation des secteurs en tresses présentant un potentiel de diversité des habitats aquatiques fort	57

Figure 32. Réseau hydrographique où l'érosion latérale potentielle peut être prédite par SIG.....	58
Figure 33 : Un modèle de prédiction est défini par sous-bassin (en bleu)	59
Figure 34 : Taux potentiel d'érosion latérale par TGH prédit (en m/an) à partir de la puissance brute biennale et de la surlargeur de bande active.	60
Figure 35. Schéma simplifié de la mise en place de la « boîte à outils ».....	63
Figure 36. Régression liant la largeur du fuseau de mobilité et le débit biennal pour les cours d'eau à méandres mobiles et les chenaux multiples (A. Alber, non publié).	67
Figure 37 : Floodplain width in fonction of upstream area.	68
Figure 38 : Illustration d'un modèle sous Model Builder	69

Tableaux

Tableau 1. Règles de fusion des polygones « bancs », « eau » et « eau + bancs » pour créer les polygones « Chenal à galets » et « Chenal en eau ». (1 : présence / 0 : absence).....	14
Tableau 2. Présentation des couches vectorielles nécessaires à la construction des tronçons géomorphologiques homogènes (TGH).....	19
Tableau 3. Récapitulatif des métriques extraites par tronçon géomorphologique homogène	25
Tableau 4. Liste des erreurs dans l'extraction des métriques.	27
Tableau 5. Répartition de chaque type d'unité par hydro-écorégion.	34
Tableau 6. Présentation des indicateurs utilisés pour la détermination des styles fluviaux.	36
Tableau 7. Caractérisation géomorphologique des classes.	46
Tableau 8 : Présentation des segments (après fusion des TGH adjacents de même type) par types.....	53
Tableau 9. Liste des problèmes rencontrés lors de l'application de la méthode et améliorations possibles.	65
Tableau 10. Bilan des quatre études réalisées depuis 2007.	71

Références bibliographiques

- Alber, A. & Piégay, H. 2011, "Spatial disaggregation and aggregation procedures for characterizing fluvial features at the network-scale: Application to the Rhône basin (France).", *Geomorphology*, vol. 125, no. 3, pp. 343-360.
- Alber, A. & Piégay, H. 2008, *Développements méthodologiques pour une analyse des discontinuités longitudinales structurant un réseau hydrographique*.
- Belletti, B., Dufour, S. & Piégay, H. "Regional variability of aquatic pattern in braided reaches (example of the french Rhône basin)", .
- Bertrand, M., Piégay, H., Pont, D., Liébault, F. & Sauquet, E. "Sensitivity analysis of environmental changes associated with riverscape evolutions following sediment reintroduction: Application to the Drôme River network, France", .
- Clément, P. & Piégay, H. 2003, "Statistics and Fluvial Geomorphology." in *Tools in Fluvial Geomorphology.*, eds. M.G. Kondolf & H. Piégay, J. Wiley and Sons, Chichester, pp. 597-630.
- Husson, F., Lê, S. & Pagès, J. 2009, *Analyse de données avec R*. Presses Universitaires de Rennes edn, .
- Kaufman, L. & Rousseeuw, P.J. 1990, *Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis*. Wiley-Interscience, New York.", .
- Maire, G. & Wilms, P. 1984, *Etude hydro-géomorphologique du Giessen. Détermination de secteurs homogènes.*, Région d'Alsace, Université Louis Pasteur, Centre de Géographie Appliquée, UA 95 du CNRS, Strasbourg.
- Malavoi, J.R. & Bravard, J.P. 2010, *Elements d'hydromorphologie fluviale.*, Onema.
- Pella, H., Lejot, J., Lamouroux, N. & Snelder, T. "Un réseau hydrographique théorique français détaillé et ses attributs environnementaux : le RHT", .
- Pella, H., Snelder, T., Lamouroux, N., Vanderbecq, A., Shankar, U. & Rogers, C. 2008, "Réseau hydrographique naturel étendu (RHE) construit à partir de la BD Carthage.", *Ingénieries - E A T*, vol. 55-56, pp. 15-28.
- Pettitt, A.N. 1979, "A non-parametric approach to the Change-point Problem.", *Applied Statistics*, vol. 28, pp. 126-135.
- Piégay, H., Alber, A., Slater, L. & Bourdin, L. 2009, "Census and typology of braided rivers in the French Alps", *Aquatic Sciences*, vol. 71, no. 3, pp. 371-388.
- Raso, T. 2011, *Mise en place d'une méthodologie d'étude diachronique des méso-habitats piscicoles à partir de photographies aériennes et d'images satellitales*.
- Schmitt, L. 2001, *Typologie hydro-géomorphologique fonctionnelle de cours d'eau. Recherche méthodologique appliquée aux systèmes fluviaux d'Alsace*, Université Louis Pasteur (Strasbourg I).
- Schmitt, L., Maire, G., Nobelis, P. & Humbert, J. 2007, "Quantitative morphodynamic typology of rivers. A methodological study based on the French Upper Rhine basin.", *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 32-11, pp. 1726-1746.
- Tormos, T. 2010, *Analyse à l'échelle régionale de l'impact de l'occupation du sol dans les corridors rivulaires sur l'état écologique des cours d'eau.*, Agro Paris Tech.
- Valette, L., Chandesris, A., Mengin, N., Malavoi, J.R., Souchon, Y. & Wasson, J.G. 2008, *SYstème Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau SYRAH CE Principes et méthodes de la sectorisation hydromorphologique*, Cemagref, Onema.
- Wiederkehr, E., Dufour, S. & Piégay, H. 2009, *Caractérisation du corridor naturel alluvial du réseau hydrographique du bassin du Rhône à partir des orthophotographies de l'IGN. Premiers retours d'expérience pour l'élaboration de modèles hydrogéomorphologiques prédictifs*.
- Wiederkehr, E., Dufour, S. & Piégay, H. 2010, "Localisation et caractérisation semi-automatique des géomorphosites fluviaux potentiels. Exemples d'applications à partir d'outils géomatiques dans le bassin de la Drôme.", *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. 2, pp. 175-188.
- Wiederkehr, E., Dufour, S. & Piégay, H. 2008, *Apport des techniques d'imagerie pour l'étude des réseaux hydrographiques. Synthèse des connaissances et évaluation d'indicateurs de caractérisation*.
- Wiederkehr, E., Dufour, S. & Piégay, H. 2010, *Intégration de données extraites des ortho-photos de l'IGN pour la caractérisation et la modélisation de l'habitat aquatique.*, ZABR-AERMC.