



HAL
open science

Modélisation statistique de la géométrie hydraulique des tronçons de cours d'eau et applications dans la gestion écologique des bassins versants

Maxime Morel

► To cite this version:

Maxime Morel. Modélisation statistique de la géométrie hydraulique des tronçons de cours d'eau et applications dans la gestion écologique des bassins versants. Hydrologie. Université de Lyon, 2020. Français. NNT : 2020LYSE1083 . tel-03306715

HAL Id: tel-03306715

<https://theses.hal.science/tel-03306715>

Submitted on 29 Jul 2021

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.



N°d'ordre NNT :

THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON
opérée au sein de
l'Université Claude Bernard Lyon 1

Ecole Doctorale N° 341
Evolution, Ecosystème, Microbiologie, Modélisation (E2M2)

Soutenue publiquement le 14/05/2020, par :
Maxime Morel

**Modélisation intercontinentale de la géométrie
hydraulique des tronçons de cours d'eau et applications à
la gestion écologique des bassins versants**

Devant le jury composé de :

MARMONIER, Pierre, Professeur, Université Lyon 1

Président

FERREIRA, Maria Teresa, Professeure, Université de Lisbonne

Rapporteuse

LANE, Stuart, Professeur, Université de Lausanne

Rapporteur

TAL, Michal, Maitre de Conférence, CEREGE

Examinatrice

VIVIER, Anne, Chargée de mission, OFB

Examinatrice

LAMOUREUX, Nicolas, Directeur de recherche, INRAE

Directeur de thèse

GOB, Frédéric, Maitre de Conférence, Université Paris 1

Co-directeur de thèse

Université Claude Bernard–LYON 1

Président de l'Université	M. Frédéric FLEURY
Président du Conseil Académique	M. Hamda BEN HADID
Vice-Président du Conseil d'Administration	M. Didier REVEL
Vice-Président du Conseil des Etudes et de la Vie Universitaire	M. Philippe CHEVALLIER
Vice-Président de la Commission de Recherche	M. Jean-François MORNEX
Directeur Général des Services	M. Damien VERHAEGHE

COMPOSANTES SANTE

Faculté de Médecine Lyon-Est –Claude Bernard	Doyen: M. Gilles RODE
Faculté de Médecine et Maïeutique Lyon Sud Charles. Mérieux	Doyenne: Mme Carole BURILLON
UFR d'Odontologie	Doyenne: Mme Dominique SEUX
Institut des Sciences Pharmaceutiques et Biologiques	Directrice: Mme Christine VINCIGUERRA
Institut des Sciences et Techniques de la Réadaptation	Directeur: M. Xavier PERROT
Département de Formation et Centre de Recherche en Biologie Humaine	Directrice: Mme Anne-Marie SCHOTT

COMPOSANTES & DEPARTEMENTS DES SCIENCES & TECHNOLOGIE

UFR Biosciences	Directrice: Mme Kathrin GIESELER
Département Génie Electrique et des Procédés (GEP)	Directrice: Mme Rosaria FERRIGNO
Département Informatique	Directeur: M. Behzad SHARIAT
Département Mécanique	Directeur M. Marc BUFFAT
UFR -Faculté des Sciences	Administrateur provisoire: M. Bruno ANDRIOLETTI
UFR (STAPS)	Directeur: M. Yannick VANPOULLE
Observatoire de Lyon	Directrice: Mme Isabelle DANIEL
Ecole Polytechnique Universitaire Lyon 1	Directeur: Emmanuel PERRIN
Ecole Supérieure de Chimie, Physique, Electronique(CPE Lyon)	Directeur: Gérard PIGNAULT
Institut Universitaire de Technologie de Lyon 1	Directeur: M. Christophe VITON
Institut de Science Financière et d'Assurances ESPE	Directeur: M. Nicolas LEBOISNE Administrateur provisoire: M. Pierre CHAREYRON

Remerciements

Dans un premier temps, je souhaite remercier mes deux directeurs de thèse, Nicolas Lamouroux et Frédéric Gob. Merci pour la confiance et la liberté qu'ils m'ont accordé dès le début de la thèse. Par la diversité de leurs compétences, ils m'ont permis d'aborder cette thèse avec des regards différents et complémentaires.

J'adresse également mes remerciements à Maria Teresa Ferreira, Stuart Lane, Pierre Marmonier, Michal Tal et Anne Vivier pour avoir accepté d'être membres du jury et merci particulièrement à Maria Teresa et Stuart pour avoir accepté d'examiner ce travail en tant que rapporteurs.

Je tiens à remercier Jérôme Belliard, Doug Booker, Sylvain Dolédec, Oldrich Navratil, Hervé Piégay, Mike Stewardson, Vincent Tamisier et Anne Vivier qui ont été membres de mon comité de suivi de thèse et m'ont fait part de commentaires constructifs tout au long de ma thèse.

Ce travail a été financé par l'Office français de la biodiversité (OFB, ex-AFB, ex-Onema) que je tiens donc à remercier.

Mes travaux n'auraient jamais vu le jour sans cet immense jeu de données de mesures hydrauliques qui a été rassemblé à travers le monde. Merci à ces innombrables (dizaines ?, centaines ?) inconnus qui ont participé à la collecte de ces > 1000 données de géométrie hydraulique de tronçon. Je suis donc très reconnaissant envers les agents de l'OFB, d'INRAE (ex-Irstea), de NIWA, de divers bureaux d'études (données généreusement fournies par l'agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse), etc. qui ont contribué à cet énorme travail.

Merci à Raph qui m'a tout appris du terrain, avec qui j'ai passé des moments inoubliables dans les cours d'eau (et les campings !) des Alpes et en Haute-Loire. Dani, Laura, Julie, Maxence, Alexis, Guillaume, Peder, Mehdi, Sophie et Hervé C. m'ont également aidé dans mon travail de terrain et je leur en suis très reconnaissant.

L'INRAE m'a donné l'opportunité de séjourner quatre mois au NIWA (National Institute of Water and Atmospheric Research) de Christchurch en Nouvelle Zélande et je remercie Doug Booker pour m'avoir accueilli, pour avoir mis à disposition ses données et partagé ses connaissances en matière de modélisations statistiques. Je n'oublie pas Laurence et Pusp qui ont égayé mon quotidien là-bas.

J'adresse un grand merci à toute l'équipe Dynam, pour cette atmosphère conviviale. Cela a été un réel plaisir de travailler dans cette équipe. Merci à Guillaume, Maxence, Bertrand, Thibault, Hervé², Maria, Sophie, Dominique, Nuria et Dani pour toutes ces discussions enrichissantes (techniques ou non). Notamment, un grand merci à Hervé P. pour avoir trouvé une solution à tous mes problèmes sur SIG ! Merci à la team thésards, Maïlys (la super co-bureau), Laura, Julie, Clarisse avec qui j'ai passé de super moments, à Irstea comme en dehors, merci pour leur soutien.

Enfin, merci à mes proches, à Pierre Opa qui a suivi avec intérêt tout le déroulement de ma thèse (c'est grâce à toi si j'en suis là), à Valou pour les parties de belote après le travail et surtout à toi Hind que je remercie tendrement pour ton soutien moral durant toute la durée de ma thèse et pour ton aide dans toutes les situations.

RÉSUMÉ

Modélisation intercontinentale de la géométrie hydraulique des tronçons de cours d'eau et applications à la gestion écologique des bassins versants.

Les variations temporelles et spatiales des caractéristiques hydrauliques des cours d'eau (c.-à-d. largeur mouillée, hauteur d'eau, vitesse du courant) à travers les réseaux hydrographiques influencent les habitats physiques et la biodiversité, la température de l'eau, les flux de nutriments et de polluants, le transport des sédiments et les services écosystémiques associés. Par conséquent, de meilleures descriptions hydrauliques des bassins versants sont essentielles pour de nombreuses applications écologiques, y compris la définition des débits écologiques, la bonne gestion des pollutions et la restauration des habitats. Les relations de géométrie hydraulique « stationnelle » décrivent les changements temporels de la hauteur d'eau, de la largeur mouillée et de la vitesse avec le débit dans un tronçon de cours d'eau donné. Les relations de géométrie hydraulique « longitudinale » décrivent les changements spatiaux des caractéristiques hydrauliques le long d'un cours d'eau ou entre des tronçons, à un débit de référence donné (par exemple, le débit médian ou le débit moyen annuel de crue). Bien que les variations des deux relations aient été largement documentées, elles sont encore peu comprises. Ces travaux de thèse visent à améliorer les connaissances sur les relations de la géométrie hydraulique et à développer des modèles qui prédisent les caractéristiques hydrauliques à travers les réseaux hydrographiques en utilisant un important jeu de données intercontinentales de mesures hydrauliques à l'échelle du tronçon. Pour prédire les paramètres de la géométrie hydraulique, de nombreuses variables mesurées sur le terrain, cartographiées ou issues de la télédétection ont été analysées dans cette étude. Ces travaux montrent que la géométrie hydraulique est bien expliquée par des modèles intercontinentaux, suggérant une grande généralité de nos modèles. Les modèles de géométrie hydraulique qui en résultent présentent un potentiel considérable pour améliorer les outils de gestion à l'échelle nationale et/ou du bassin versant. À titre d'exemple d'application écohydraulique, les modèles sont utilisés pour estimer les impacts du changement climatique sur les habitats hydrauliques des poissons dans un grand bassin versant.

Mots clés : géométrie hydraulique ; habitats aquatiques ; hydromorphologie ; gestion des bassins versants ; modélisation des rivières

ABSTRACT

Intercontinental modeling of the hydraulic geometry of stream reaches and applications for the ecological management of catchments.

Temporal and spatial variations of river hydraulic characteristics (i.e. wetted width, water depth, flow velocity) across stream networks influence physical habitats and biodiversity, water temperature, nutrient and pollutants fluxes, sediment transport and associated ecosystem services. Therefore, improved hydraulic descriptions of catchments are essential for many ecological applications including the definition of ecological flows, the sound management of pollutions and the restoration of habitats. "At-a-station hydraulic geometry" relationships describe temporal changes in water depth, wetted width and velocity with the discharge at a given river reach. "Downstream hydraulic geometry" relationships describe spatial changes in hydraulics along a river or between reaches, at a given reference flow discharge (e.g., the median flow or mean annual flood flow). Although variations of both relationships have been widely documented, they are still largely unexplained. This work aims to improve knowledge about hydraulic geometry relationships and to develop models that predict hydraulic characteristics across river networks using an important intercontinental dataset of hydraulic measurements at reach scale. To predict hydraulic geometry parameters, many field-based, map-based or remotely sensed variables were analyzed in this study. This work show that hydraulic geometry is well explained by an intercontinental model, suggesting high generality of our models. The resulting hydraulic geometry models present considerable potential for improving national and/or catchment scale management tools. As an example of ecohydraulic application, we use our models to estimate the impacts of climate change on hydraulic habitats for fish in a large catchment.

Key words: reach hydraulic geometry; physical habitat; hydromorphology; catchment management; river modelling

Avant-propos

Afin de faciliter la lecture du présent manuscrit, je présente ici son organisation accompagnée de quelques éléments de contexte sur la réalisation de ce travail de thèse de doctorat.

Cette thèse s'intègre dans l'étude et la modélisation des changements des caractéristiques hydrauliques moyennes (hauteurs d'eau, largeurs mouillées et vitesses) des cours d'eau dans l'espace (relations de géométrie hydraulique longitudinale) et dans le temps (relations de géométrie stationnelle) à travers les réseaux hydrographiques. Pour ce faire, mes travaux reposent sur de multiples données de mesures hydrauliques de tronçons de cours d'eau collectés à l'échelle internationale (France, Nouvelle-Zélande et Royaume-Uni). Cette thèse vise à répondre à des questions posées par la communauté scientifique mais également à proposer des outils pour les gestionnaires des bassins versants.

Ma thèse a été financée par l'Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (Irstea) et par l'Agence Française pour la Biodiversité (AFB). Un des principaux jeux de données exploités dans ces travaux (données CARHYCE) a été financé par l'AFB. Ma visite en Nouvelle-Zélande au « National Institute of Water & Atmospheric Research (NIWA) » a été financée par Irstea.

Le manuscrit s'articule selon six chapitres. Le chapitre 1 présente le cadre conceptuel, la problématique et les objectifs de la thèse. Le chapitre 2 présente les données rassemblées durant la thèse, les bases de données fournissant la majorité des variables explicatives utilisées ainsi que les principales méthodes statistiques mises en œuvre dans mes travaux. Les chapitres 3, 4 et 5 correspondent chacun à un objectif de recherche et sont rédigés sous forme de quatre articles scientifiques en anglais avec une synthèse en français en début de chaque chapitre. Le troisième chapitre porte principalement sur l'étude de la géométrie hydraulique stationnelle. Premièrement, ce chapitre s'intéresse à la compréhension et à la modélisation de géométrie hydraulique stationnelle sur des données françaises en utilisant de multiples variables environnementales (Article 1) ; deuxièmement, ce chapitre étudie la généralité des relations de géométrie hydraulique à partir de données internationales et étudie la cohérence entre les différentes approches d'estimations de la géométrie hydraulique stationnelle, c'est-à-dire, les approches empiriques et théoriques (Article 2). Le quatrième chapitre décrit des modèles intercontinentaux de géométrie hydraulique, combinant les approches stationnelle et longitudinale, en utilisant des données françaises et néo-zélandaises (Article 3). Le cinquième

chapitre présente un cas d'application des modèles de géométrie hydraulique dans un contexte d'évaluation de l'impact du changement climatique sur l'habitat aquatique dans le bassin versant du Rhône (Article 4). Enfin, le chapitre 6 est une conclusion des travaux de thèse. Ce chapitre résume les résultats des chapitres précédents et présente des perspectives de recherches qui s'inscrivent dans la continuité de cette thèse.

Ce travail a également été valorisé à travers des présentations orales (poster et communications) à des conférences scientifiques. La liste des articles et présentations relatifs aux travaux de thèse sont présentés ci-dessous. Durant ma thèse, j'ai également eu l'opportunité d'évaluer un article soumis dans la revue « *Hydrological Processes* » en 2019.

Publications

Publiés

Article 1. Morel, M., Tamisier, V., Pella, H., Booker, D.J., Navratil, O., Piégay, H., Gob, F., Lamouroux, N., 2019. Revisiting the drivers of at-a-station hydraulic geometry in stream reaches. *Geomorphology* 328, 44–56. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.12.007>

Article 3. Morel, M., Booker, D.J., Gob, F., Lamouroux, N., 2019. Intercontinental predictions of river hydraulic geometry from catchment physical characteristics. *Journal of Hydrology* 124292. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124292>

Soumis

Article 2. Morel, M., Booker, D.J., Gob, F., Lamouroux, N., (in review, submitted to *Water Resources Research*). Consistent theoretical and empirical approaches of at-a-station hydraulic geometry exponents in stream reaches.

En cours de finalisation

Article 4. Morel, M., Pella, H., Branger, F., Sauquet, E., Grenouillet, G., Côte, J., Braud, I., Lamouroux, N., (in prep. for submission to *Global Change Biology*). Catchment-scale applications of hydraulic habitat models: climate change effects on fish.

Communications

Morel M., Booker D., Stewardson M., Vivier A., Piégay H., Gob F., Tamisier V., Lamouroux N. (2018), Modélisation statistique de la géométrie hydraulique des tronçons à travers le réseau hydrographique et applications à la gestion des bassins versants / Modelling the hydraulics of river networks and management applications, I.S.RIVERS (2018), June 2018, Lyon, France.

Morel M., Lamouroux N., Gob F. (2017), Revisiting the drivers of hydraulic geometry at reach scale in the hydrographic network, 9th International Conference of Geomorphology (ICG), November 2017, New Delhi, India.

Booker D., Morel M., Lamouroux N., Stecca G. (2018) Sustainable Water Allocation Programme (SWAP). New Zealand Hydrological Society Conference, December 6, Christchurch, New Zealand.

Lamouroux N., Pella H., Miguel C., Morel M., Flipo M. (2018) Catchment-scale habitat modeling: rationale, objectives and methods. 12th International Symposium on Ecohydraulics, August 19-24, Tokyo, Japan.

Table des matières

Remerciements	1
RÉSUMÉ	3
ABSTRACT	4
Avant-propos	5
Chapitre 1 : Cadre conceptuel et objectifs de la thèse	15
1.1 Introduction	15
1.2 Prédire les variations des caractéristiques hydrauliques avec le débit : les relations de géométrie hydraulique.	16
1.2.1 Variations de la géométrie hydraulique longitudinale	20
1.2.2 Variations de la géométrie hydraulique stationnelle	21
1.3 Limites de validité des relations de géométrie hydraulique	24
1.4 Objectifs de la thèse	27
Chapitre 2 : Matériels et méthodes	31
2.1 Les données de géométrie hydraulique au tronçon	31
2.1.1 ESTIMHAB	33
2.1.2 CARHYCE	35
2.1.3 RHYHABSIM	36
2.1.4 EVHA	37
2.1.5 PHABSIM	37
2.1.6 Navratil (2005)	38
2.1.7 Synthèse et critique des données	38
2.2 Variables explicatives disponibles et bases de données	40
2.2.1 Le Réseau Hydrographique Théorique (RHT)	40
2.2.2 Le Réseau Rhône Méditerranée Corse (RMC)	41
2.2.3 River Environment Classification (REC)	41

2.2.4	La base de données CARHYCE	41
2.2.5	Analyses d'images aériennes	42
2.2.6	Rattachement des stations aux bases de données SIG	43
2.3	Estimations des paramètres de géométrie hydraulique	43
2.4	Les principales analyses statistiques utilisées	45
2.4.1	Les régressions linéaires simples et multiples	46
2.4.2	L'analyse factorielle discriminante	47
2.4.3	Les forêts aléatoires « Random Forests »	48
Chapitre 3	: Compréhension et généralisation de la géométrie hydraulique stationnelle	52
3.1	Synthèse Article 1	52
3.2	Synthèse Article 2	53
Article 1	Revisiting the drivers of at-a-station hydraulic geometry in stream reaches	56
Article 2	Consistent theoretical and empirical approaches of at-a-station hydraulic geometry exponents in stream reaches	87
Chapitre 4	: Modélisation intercontinentale de la géométrie hydraulique longitudinale et stationnelle	109
4.1	Synthèse	109
Article 3	Intercontinental predictions of river hydraulic geometry from catchment physical characteristics	112
Chapitre 5	: Application écologique des modèles de géométrie hydraulique : cas du bassin versant du Rhône	147
5.1	Synthèse	147
Article 4	Catchment-scale applications of hydraulic habitat models: climate change effects on fish.	150
Chapitre 6	: Conclusion et perspectives des travaux de thèse	174
6.1	Conclusion générale	174
6.2	Limites des travaux et perspectives d'améliorations	178
6.3	Perspectives générales	179

Références bibliographiques	183
Annexes	206
Annexe 1 : Localisation des données de géométrie hydraulique au tronçon en Nouvelle-Zélande.	206
Annexe 2 : Localisation des données de géométrie hydraulique au tronçon au Royaume-Uni.	207

Liste des figures

- Figure 1.1 : Représentation schématique des relations de géométrie hydraulique stationnelle et longitudinale. La géométrie hydraulique stationnelle est déterminée à l'échelle du tronçon par le changement des caractéristiques hydrauliques moyennes W et H avec le débit Q (a). La régression des points de données représentants W , H et Q dans un repère logarithmique permet de déterminer les paramètres de géométrie hydraulique stationnelle (a , b , c , d) (b). La géométrie hydraulique longitudinale est déterminée à l'échelle du tronçon par le changement des caractéristiques hydrauliques moyennes W et H avec le débit de référence Q (c). La régression des points de données représentants W , H et Q sont données dans un repère logarithmique permet de déterminer les paramètres de géométrie hydraulique stationnelle (a_d , b_d , c_d , f_d) (d). 19
- Figure 2.1 : Localisation des données de géométrie hydraulique au tronçon en France. Les différents points et couleurs représentent les différentes sources de données françaises. Le tracé du réseau hydrographique théorique (RHT) national est représenté en bleu en arrière-plan. 32
- Figure 2.2 : Exemple de tronçons du jeu de données: le Bès (a), le Réal-Martin (b), le Drac Noir (c), la Souloise (d), la Varaude (e), la Langougnole (f). 33
- Figure 2.3 : Schéma conceptuel des protocoles de mesures hydraulique à l'échelle du tronçon. (a) Vue en plan du tronçon. Le tronçon est composé de plusieurs sections en travers dont l'espacement varie suivant le protocole (par exemple, l'espacement est régulier pour les protocoles ESTIMHAB et CARHYCE). (b) vue en travers d'une section. Pour chaque campagne de mesures, la largeur mouillée est mesurée ainsi que des points de hauteurs d'eau et de granulométrie. L'espacement des points de mesures le long de la section en travers est variable selon le protocole de mesure (par exemple, l'espacement est régulier pour les protocoles ESTIMHAB et CARHYCE). La granulométrie est généralement mesurée lors d'une seule campagne de mesures. 35
- Figure 2.4 : Exemple de variable de terrain issue de la base de données CARHYCE : le profil longitudinal du thalweg. 42
- Figure 2.5 : Exemple de tronçons : La Gère aux basses eaux (a) et aux hautes eaux (c) ; l'Asse aux basses eaux (b) et aux hautes eaux (d). Les largeurs et hauteurs moyennes aux deux débits de mesure permettent d'estimer les exposants de géométrie hydraulique stationnelle b et f pour chacun de ces tronçons (e). 45
- Figure 5.1 : a) Chabot; b) Truite commune; c) Barbeaux fluviatile (photographies fournies par N. Lamouroux). 149
- Figure 6.1 : Comparaisons des valeurs observées de hauteurs d'eau (H) et largeurs mouillées (W) moyennes au débit de mesure en France avec les prédictions des modèles Estimkart et les nouveaux modèles conçus en utilisant les approches statistiques de type « forêts aléatoires » (*Random Forests*). 177
- Figure 6.2 : Comparaison des largeurs mouillées (W) et hauteurs d'eau (H) moyennes au module interannuel prédites par les nouveaux modèles français (axe des y) avec les estimations basiques disponibles dans le réseau RHT actuel provenant des modèles Estimkart (axe des x). Notons que les prévisions sont cohérentes jusqu'à des largeurs de l'ordre de 40 m ; au-delà les forêts aléatoires prédisent une largeur constante et sont moins fiables. Ceci est dû à la gamme de calibration des

modèles présentés dans (c) et (d). (c) et (d) présentent les distributions des largeurs et hauteurs d'eau observées au débit de mesure au sein des données utilisées pour les modèles français. Les prédictions en dehors de la gamme de calibration ne doivent pas être pris en considération, dans ce cas précis, les anciennes estimations des modèles Estimkart ont été conservées..... 178

Figure 6.3: Variations de la hauteur d'eau moyenne (Depth) des tronçons de cours d'eau de rang de Strahler 5 dans le bassin versant de la Loire (chaque couleur représente un tronçon) pour l'année hydrologique 2009-2010. Un modèle hydrologique fournit des chroniques de débits sur l'ensemble du réseau hydrographique du bassin versant de la Loire. Ces débits sont ensuite traduits en caractéristiques hydrauliques en utilisant les nouveaux modèles « new » ou les anciens modèles Estimkart « old » (figure fournie par Hanieh Seyedhashemi). Les variations de hauteurs d'eau semblent mieux représentées avec les nouvelles prédictions permettant potentiellement une meilleure modélisation de la température..... 182

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Exemples observés dans la littérature de valeurs moyennes de b et f estimés à partir de mesures à plusieurs débits à l'échelle du tronçon et de la section en travers.....	24
Tableau 2.1 : Tableau récapitulatif des sources de données et de leur protocole de mesure respectif..	38
Tableau 2.2 : Principales sources de variables explicatives.	43

Chapitre 1 : Cadre conceptuel et objectifs de la thèse

Ce premier chapitre est composé de quatre parties. J'introduis tout d'abord le contexte de la thèse en présentant les intérêts de connaître les caractéristiques hydrauliques des cours d'eau et leur changement avec le débit à travers le réseau hydrographique. Ensuite, dans la deuxième partie, je présente les relations de géométrie hydraulique stationnelle et longitudinale, je décris l'état de l'art à propos de ces relations et leur utilisation à l'échelle du tronçon de cours d'eau. Dans la troisième partie, je présente les limites de ces relations. Enfin, la quatrième partie énonce les objectifs de la thèse.

1.1 Introduction

Les caractéristiques hydrauliques des rivières (c'est-à-dire largeur mouillée, hauteur d'eau, vitesse du courant) ont une influence primordiale sur la plupart des processus physiques, biologiques et biochimiques dans les cours d'eau. Cela comprend les habitats aquatiques, les services écosystémiques, les flux de polluants, la température de l'eau ou bien le transport solide (Statzner et al., 1988). Par exemple, les conditions hydrauliques au sein des cours d'eau sont une composante majeure de l'habitat structurant la répartition des espèces piscicoles (Lamouroux et Capra, 2002 ; Malcom et al. 2012), des espèces invertébrés (Dolédec et al., 2007 ; Méricoux et al., 2009), des macrophytes (Riis et Biggs, 2003) ainsi que du périphyton (Hoyle et al., 2017). A l'échelle du tronçon de cours d'eau, les caractéristiques hydrauliques moyennes contrôlent la distribution des variables hydrauliques ponctuelles (vitesse, contrainte de cisaillement, hauteur...) dans le tronçon (Lamouroux, 1998) qui elles même sont liées à la diversité des conditions de micro-habitats. Les changements des caractéristiques hydrauliques des tronçons avec le débit affectent directement les populations aquatiques selon les « préférences » des espèces. Les caractéristiques hydrauliques ont également une influence primordiale dans la propagation ou la rétention des flux de polluants, d'agents pathogènes ou de température (Whelan et al., 1999).

Par conséquent, la connaissance des variations temporelle (avec le débit) et spatiale des caractéristiques hydrauliques est un élément majeur pour la gestion des bassins versants

(Maddock, 1999). De nombreuses études ont utilisé des estimations des caractéristiques hydrauliques à l'échelle de grands bassins versants pour, par exemple, modéliser :

- L'altération de l'habitat aquatique provoquée par l'altération du débit en Nouvelle-Zélande (Snelder et al., 2011) ou dans le bassin de la Seine (Miguel et al., 2016).
- L'impact du cycle de vie des prélèvements de débit sur les écosystèmes aquatiques (Damiani et al., 2019).
- La température de l'eau dans le bassin de la Loire (Beaufort et al., 2016).
- Les flux de polluants tels que l'azote à travers le réseau hydrographique français (Dupas et al., 2013) ou le sulfonate d'alkylbenzène linéaire dans un bassin versant de l'Italie (Whelan et al., 1999).
- Le transport de sédiments dans les bassins versants (Russell et al., 2018, Vaughan et al., 2017).
- La conductivité hydraulique du lit des cours d'eau sur l'ensemble de la France (Stewardson et al., 2016).
- Les flux d'éléments pathogènes à l'échelle globale (Vermeulen et al., 2019).

1.2 Prédire les variations des caractéristiques hydrauliques avec le débit : les relations de géométrie hydraulique.

Les modèles hydrauliques numériques déterministes, qui résolvent les équations de conservation de masse et de quantité de mouvement, sont fréquemment utilisés pour prédire les conditions hydrauliques à l'échelle d'un tronçon de cours d'eau ainsi que leurs variations avec le débit. Cependant, ces modèles, difficilement applicables dans les cours d'eau aux écoulements complexes (par exemple les rivières en tresses, les cours d'eau de type « step/pool », etc.), requièrent généralement beaucoup de données et ces modèles ne peuvent pas être appliqués au-delà des cours d'eau sur lesquels ils ont été calés (Eaton, 2013). Par ailleurs, il est techniquement et économiquement irréalisable d'utiliser ce type de modèles à l'échelle de bassins versants. Ainsi, l'approche statistique, telle que les relations de géométrie hydraulique développées par Leopold et Maddock (1953), apparaît être un outil simple et approprié pour estimer les caractéristiques hydrauliques à large échelle et dans les situations où un grand degré de précision des modèles numériques n'est pas nécessaire.

Les relations de géométrie hydraulique (Leopold et Maddock 1953) existent sous deux formes : la géométrie hydraulique dite « stationnelle » (« *at-a-station hydraulic geometry* ») et la

géométrie hydraulique dite « longitudinale » (« *downstream hydraulic geometry* »). Les relations de géométrie hydraulique stationnelle permettent de décrire les variations des paramètres hydrauliques (hauteur d'eau, largeur mouillée, vitesse du courant) dans une section en travers par rapport à l'évolution du débit dans le temps (Figure 1.1.a). La géométrie hydraulique longitudinale fait quant à elle référence à l'évolution des caractéristiques hydrauliques d'un chenal le long d'un cours d'eau ou entre plusieurs cours d'eau pour un débit caractéristique similaire (par exemple le module interannuel ou le débit de plein bord (Figure 1.1.b). Globalement, la géométrie hydraulique stationnelle implique une notion temporelle (c.-à-d. variation de débit sur une même section en travers) alors que la géométrie hydraulique longitudinale fait référence à une notion spatiale. Ces termes ont été introduits par Leopold et Maddock (1953) qui ont également proposé trois relations de géométrie hydraulique pour décrire les variations de la largeur, de la hauteur d'eau et de la vitesse par rapport à un débit. Pour la géométrie hydraulique stationnelle, ces relations sont exprimées par les lois de puissances suivantes :

$$W = aQ^b \quad (1.1)$$

$$H = cQ^f \quad (1.2)$$

$$V = kQ^m \quad (1.3)$$

où W est la largeur mouillée, H la hauteur d'eau moyenne, V la vitesse moyenne et Q le débit instantané d'une section en travers. Pour la géométrie hydraulique longitudinale, on aura par exemple (avec un débit moyen \bar{Q} comme référence) :

$$\bar{W} = a_d \bar{Q}^{b_d} \quad (1.4)$$

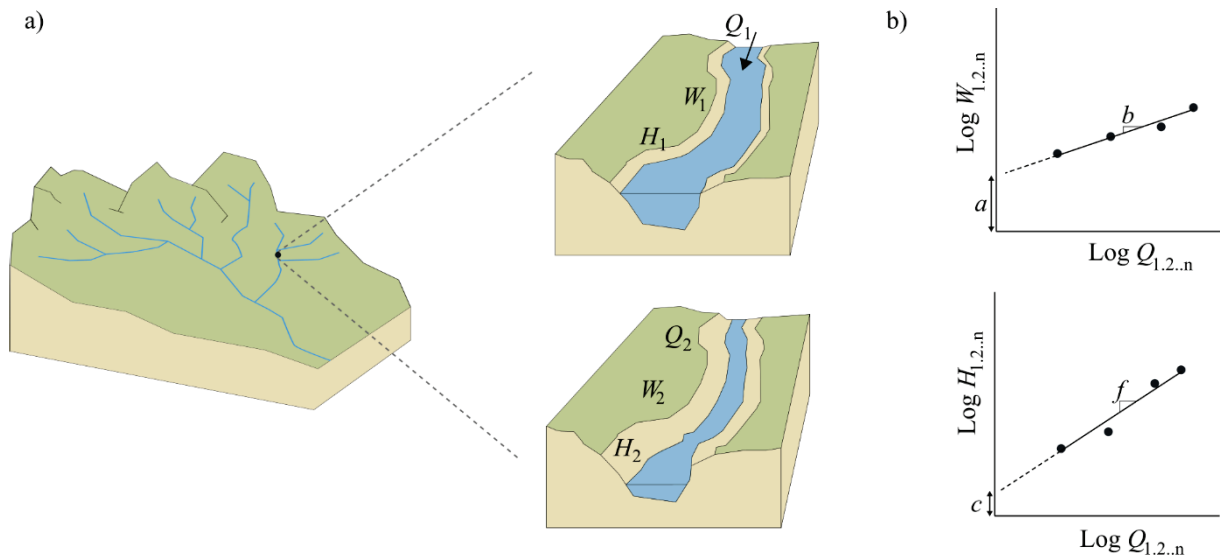
$$\bar{H} = c_d \bar{Q}^{f_d} \quad (1.5)$$

$$\bar{V} = k_d \bar{Q}^{m_d} \quad (1.6)$$

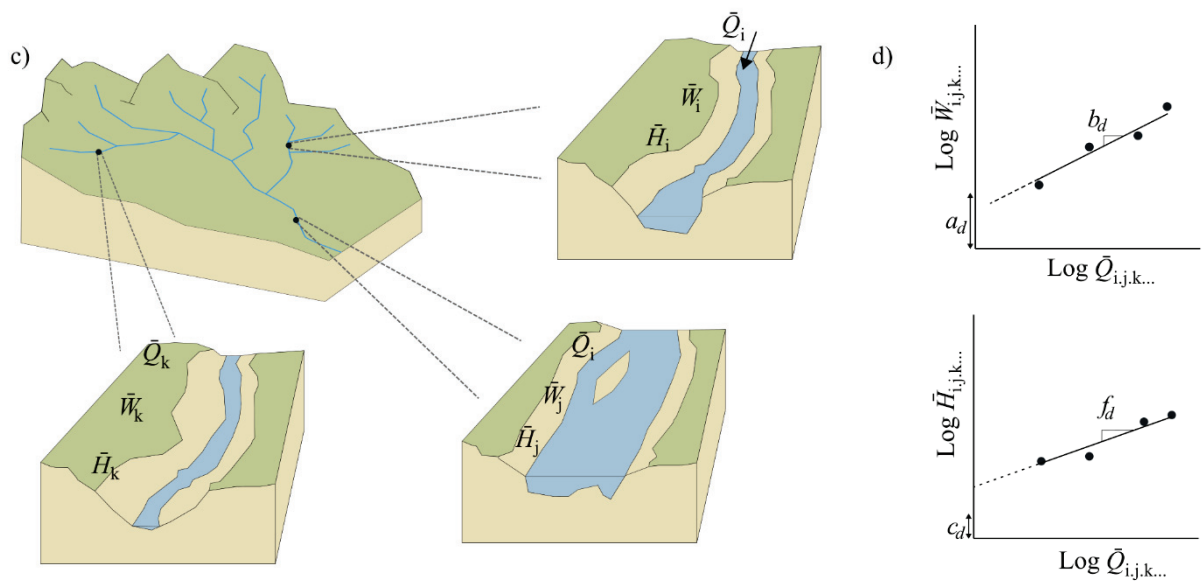
où \bar{W} , \bar{H} et \bar{V} sont la largeur, la hauteur et la vitesse moyennes au débit moyen \bar{Q} . Les symboles b, f, m, a, c, k et $b_d, f_d, m_d, a_d, c_d, k_d$ sont les exposants et coefficients de géométrie hydraulique. Ces six paramètres sont généralement estimés par régression, dans un repère logarithmique en utilisant des conditions hydrauliques mesurées à deux débits ou plus. Ces relations sont liées à l'équation de continuité ($Q = WHV$), de ce fait, les coefficients a, c et k ont un produit égal à 1 et les exposants b, f et m ont une somme de 1. L'équation de vitesse peut donc être omise car

elle se déduit des deux autres. En effet, la division du débit par le produit de la largeur et la hauteur d'eau fournit une bonne approximation de la vitesse.

Jusqu'à présent, la majorité des études et modèles de géométrie hydraulique ont été développées à l'échelle de la section en travers (Knighton, 1998). Toutefois, la connaissance des caractéristiques hydraulique à cette échelle présente peu d'intérêt d'un point de vue biologique car cela ne permet pas de décrire l'habitat aquatique (Hogan et Church, 1989). Récemment, la notion de géométrie hydraulique au tronçon (« *at-a-reach hydraulic geometry* ») a été développée (Lamouroux, 1995 ; Jowett, 1998 ; Navratil, 2005 ; Stewardson, 2005 ; Lamouroux, 2008). Cette approche permet de faire le lien avec les modèles d'habitat aquatique, le cycle de vie de la plupart des poissons ayant lieu à l'échelle du tronçon (Wolter et al., 2016). De plus, la géométrie hydraulique moyenne du tronçon permet de prédire la diversité de micro-habitats hydrauliques (profondeurs, forces tractrices, vitesses) du tronçon qui conditionnent directement les organismes aquatiques (Lamouroux et al., 1992, 1995 ; Stewardson and McMahon, 2002 ; Girard et al., 2014). Cette approche cherche à déterminer les variables géométriques moyennes à l'échelle d'un tronçon en se basant sur des mesures de géométrie hydraulique de plusieurs sections successives dans un cours d'eau et sur un linéaire représentatif (c.-à-d. environ dix à vingt fois la largeur de plein bord) qui intègre les variabilités de morphologie du chenal liées aux alternances de faciès d'écoulement. L'approche à l'échelle du tronçon utilise les mêmes expressions des équations (1.1) – (1.6) où H , W , V , \bar{W} , \bar{H} et \bar{V} sont alors des moyennes du tronçon. Cette approche permet d'avoir une description de la morphologie du chenal plus pertinente qu'à l'échelle de la section, dont les caractéristiques peuvent dépendre de singularités (changement de végétation et instabilité des berges par exemple). Par conséquent, la géométrie hydraulique à l'échelle du tronçon devrait être plus facile à comprendre et prédire qu'à l'échelle de la section en travers.



Les relations de géométrie hydraulique stationnelle



Les relations de géométrie hydraulique longitudinale

Figure 1.1 : Représentation schématique des relations de géométrie hydraulique stationnelle et longitudinale. La géométrie hydraulique stationnelle est déterminée à l'échelle du tronçon par le changement des caractéristiques hydrauliques moyennes W et H avec le débit Q (a). La régression des points de données représentant W , H et Q dans un repère logarithmique permet de déterminer les paramètres de géométrie hydraulique stationnelle (a , b , c , d) (b). La géométrie hydraulique longitudinale

est déterminée à l'échelle du tronçon par le changement des caractéristiques hydrauliques moyennes \bar{W} et \bar{H} avec le débit de référence \bar{Q} (c). La régression des points de données représentants \bar{W} , \bar{H} et \bar{Q} sont données dans un repère logarithmique permet de déterminer les paramètres de géométrie hydraulique stationnelle (a_d, b_d, c_d, f_d) (d).

1.2.1 Variations de la géométrie hydraulique longitudinale

De nombreuses études ont analysé la géométrie hydraulique longitudinale, majoritairement à l'échelle de la section en travers et au niveau de stations de jaugeage, afin de développer des modèles régionaux par exemple aux États-Unis (par ex., Castro et Jackson, 2001 ; Doll et al., 2002 ; Mohamoud et Parmar, 2006, Faustini et al., 2009 ; He et Wilkerson, 2011 ; Wilkerson et al., 2014 ; Bieger et al., 2015) ou en Australie (De Rose et al., 2008).

La géométrie hydraulique longitudinale a été principalement analysée aux conditions de plein bord, le débit de plein bord étant reconnu comme ayant un contrôle particulier sur la morphologie du cours d'eau et le transport solide par rapport à des débits de référence tels que le module (De Rose et al., 2008). Par ailleurs, aux conditions de plein bord, la géométrie hydraulique longitudinale peut être analysée sans avoir recours à une observation du débit de plein bord sur le terrain car les caractéristiques hydrauliques peuvent être déterminées à partir de la géométrie du chenal (sommet de la berge). Toutefois, l'estimation du niveau de plein bord peut parfois être incertaine à cause d'une transition peu marquée entre la berge et la plaine alluviale (Navratil et al., 2006).

D'autre part, pour des raisons liées à la difficulté d'estimation du débit et aux larges incertitudes associées, plusieurs auteurs ont préconisé le développement et l'utilisation de relations régionales de géométrie hydraulique longitudinale mettant en relation la géométrie avec la taille du bassin versant plutôt qu'avec le débit (Leopold et al., 1964). Cette approche suppose que, dans des régions limitées avec un climat et une géologie homogène, le débit est principalement contrôlé par la taille du bassin versant. La taille du bassin versant peut être plus facile à connaître que le débit. Cependant ces relations « modifiées » de la géométrie hydraulique longitudinale présentent généralement plus d'erreur que les relations basées sur le débit (Castro et Jackson, 2001; Soar et Thorne, 2001).

Les relations de géométrie hydraulique longitudinale ont été testées dans des contextes particuliers comme en milieux montagneux (Wohl et al., 2004 ; Wohl et Wilcox, 2005), dans des cours d'eau avec des berges très cohésives (Vachtman et Laronne, 2013) ou dans des cours d'eau à lit rocheux (Wohl et David, 2008). En moyenne, pour les relations de géométrie

hydraulique traditionnelles, on trouve $b_d = 0.5$ et $f_d = 0.4$ mais des variations sont observées entre différentes régions (Knighton, 1998). Les coefficients dépendent du débit de référence utilisé et présentent des valeurs très variables selon les régions et climats (Rhoads, 1991). Ces variations existent également pour les relations de géométrie hydraulique modifiées. Plusieurs études ont cherché à expliquer les variations des exposants et coefficients en les reliant à des facteurs environnementaux dans des contextes variés. La pente du cours d'eau et la granulométrie des sédiments du lit ont été identifiées comme ayant un effet important sur les relations de géométrie hydraulique longitudinale (Huang et Warner, 1995 ; Lee et Julien, 2006, Thayer, 2017). De même, des facteurs tels que les caractéristiques hydrologiques, notamment l'importance des crues et la variabilité du débit (Yu et Wolman, 1987 ; Wilkerson et al., 2014), la cohésion et la composition des berges, la granulométrie du lit du cours d'eau, la végétation rivulaire (Hey et Thorne, 1986 ; Huang et Nanson, 1997 ; Copeland et al., 2005, Dong et al., 2019) ou encore le transport solide, impactent les relations de géométrie hydraulique longitudinale.

Globalement, ces observations sont cohérentes avec les études analytiques au sujet de la géométrie hydraulique longitudinale (Ferguson, 1986 ; Griffiths, 2003 ; Singh et al., 2003). En effet, l'ajustement de la géométrie du chenal des cours d'eau, en plus du débit, est principalement lié à des processus de transport solide et de pente de cours d'eau. Ces facteurs sont à prendre en considération pour des améliorations des modèles de géométrie hydraulique.

1.2.2 Variations de la géométrie hydraulique stationnelle

La géométrie hydraulique stationnelle a été généralement moins étudiée que la géométrie hydraulique longitudinale du fait qu'elle nécessite des mesures à plusieurs débits. Dans ce travail, on s'intéressera particulièrement aux exposants b et f , paramètres représentant respectivement la variation de largeur et de hauteur au sein du tronçon avec le débit. En effet, les coefficients de géométrie hydraulique stationnelle a et c font référence à la géométrie longitudinale (Lamouroux, 2008), car les équations de géométrie hydraulique stationnelle (équations 1.1 et 1.2) peuvent également s'écrire sous la forme :

$$W = \bar{W} \left[\frac{Q}{\bar{Q}} \right]^b \quad (1.7)$$

$$H = \bar{H} \left[\frac{Q}{\bar{Q}} \right]^f \quad (1.8)$$

Lors de son introduction par Leopold et Maddock (1953), la géométrie hydraulique stationnelle est essentiellement étudiée à l'échelle de la section en travers, généralement au niveau des stations de jaugeage. Les valeurs moyennes des exposants b et f à l'échelle de la section sont généralement comparables entre les études (avec en moyenne $b = 0.23$ et $f = 0.42$, Park, 1977, Tableau 1.1) mais des variations plus ou moins importantes sont observées entre les stations. Plusieurs études ont cherché à déterminer quels facteurs pourraient expliquer les variations de ces exposants de géométrie hydraulique stationnelle (Park, 1977 ; Rhodes, 1977 ; Ridenour et Giardino, 1995). Rhodes (1977) introduit l'utilisation du diagramme triangulaire b - f - m (« *b-f-m ternary diagram* ») qui permet une comparaison visuelle et une interprétation de la dispersion des exposants b , f et m entre les sections. Cette représentation est possible du fait que la somme des exposants est égale à l'unité (équation de continuité) et pour une gamme de débit similaire pour les sections comparées.

En introduisant la géométrie hydraulique à l'échelle du tronçon, plusieurs auteurs ont observé que cette approche présente généralement des valeurs des exposants b - f plus faibles que dans les références de géométrie hydraulique stationnelle à la section (avec en moyenne $b = 0.15$, $f = 0.4$, Knighton 1998, Tableau 1.1). Cela peut être expliqué par le fait que la procédure de prélèvement au tronçon, caractérisée par un nombre de sections en travers élevé tend à diminuer les effets d'erreurs de mesures et de localisation de section. Une autre explication est que la géométrie hydraulique à l'échelle de la section est généralement réalisée au niveau de stations de jaugeage. Les paramètres de géométrie hydraulique à l'échelle du tronçon seraient ainsi plus reliés aux variables à l'échelle du bassin versant et du tronçon que les relations à l'échelle de la section en travers. Toutefois, des variations des valeurs des exposants entre différentes stations sont également observés à l'échelle du tronçon (Stewardson, 2005).

Les différences des exposants entre les régions géographiques et la variabilité au sein de cours d'eau de la même région Park (1977) souligne le fait que la géométrie d'un chenal est plutôt interprétée comme une relation multivariée plutôt que bivariée. La forme générale de la géométrie hydraulique n'est donc pas uniquement contrôlée par le débit mais aussi par d'autres facteurs (Knighton, 1998). Cependant l'identification précise de ces relations multivariées demande de nombreuses données. Plusieurs études ont tenté de relier les exposants de géométrie hydraulique stationnelle avec des facteurs environnementaux, généralement à l'échelle de la

section en travers. Par exemple, Park (1977), à travers l'étude de 139 sections en travers dans des régions climatiques différentes, a observé que la variabilité des exposants ne peut pas être expliquée que par l'environnement climatique mais plutôt par des facteurs de contrôle locaux tels que la végétation, la granulométrie des berges ou la variation de la pente. La stabilité des berges (Ridenour et Giardino, 1994) et les facteurs de rugosité telles que la forme du lit, les embâcles ou la végétation des berges (Ridenour et Giardino, 1995) joueraient aussi un rôle sur la variation des exposants. Par exemple, Nanson et al. (2010) ont observé des valeurs moyennes de 0.35 et 0.06 pour les exposants f et b , respectivement, dans 19 sections en travers de cours d'eau à berges cohésives suggérant que les hauteurs d'eau augmentent beaucoup plus rapidement que les largeurs mouillées avec le débit dans ce type de cours d'eau. À l'échelle de la séquence radier-mouille, la variation de la valeur des exposants peut être importante particulièrement pour l'exposant de hauteur avec $f_{\text{radier}} > f_{\text{mouille}}$ (Knighton, 1998). D'autres facteurs de contrôle ont été identifiés, incluant le style fluvial et le changement de pente (Ferguson, 1986). Ashmore et Sauks (2006) observent des valeurs de b supérieure à 1 dans un tronçon de cours d'eau en tresses en Alaska. Cela va dans le sens des observations de Smith et al. (1996) qui ont également révélé des valeurs importantes de b (0.51 et 0.65) et des faibles valeurs de f (0.20 et 0.16) dans deux tronçons en tresses indiquant que la largeur mouillée augmente plus rapidement que la hauteur d'eau dans les rivières en tresses.

Théoriquement la variation de largeur est principalement liée à la forme du lit et la variation de hauteur est liée à la fois à la forme du lit et aux formes de résistances à l'écoulement (Ferguson, 1986). Ferguson en conclut que la grande dispersion des valeurs des exposants de géométrie hydraulique stationnelle est due à la grande diversité des formes du lit et de résistances observée dans les cours d'eau. En s'appuyant sur Ferguson (1986), Dingman (2007) développe une expression physique dans laquelle les exposants de géométrie hydraulique stationnelle sont liés à des paramètres de forme et de rugosité un sein d'une section en travers idéalisée. L'ajustement de la forme d'un cours d'eau est contrôlé par plusieurs facteurs tels que la végétation rivulaire (Huang et Nanson, 1997; Millar, 2000; Polvi et al., 2014), la composition granulométrique des berges (Schumm, 1963), du fond du lit (Hey et Thorne, 1986; Kolberg et Howard, 1995) et la variation de charge sédimentaire (Leopold et Maddock, 1953). La taille du cours d'eau et les phénomènes de crues par les effets d'érosion/dépôt ont également une influence. Cet effet de cycle de crue est particulièrement important pour les cours d'eau à fortes pentes (Church et Zimmermann, 2007). La résistance à l'écoulement quant à elle, prend plusieurs formes : la

résistance de grain (*grain resistance*), la résistance de forme (*form resistance*) et la résistance liée aux chutes d'eau (*spill resistance*). La résistance de grain est la résistance qu'exerce la granulométrie sur l'écoulement. La résistance de forme est due aux irrégularités du lit, aux berges et aux obstacles tels les blocs ou les embâcles. La résistance liée aux chutes d'eau représente les pertes de charges dans de chutes et de cascades par exemple (Girard et al., 2014). Ces différents types de résistance interagissent ensemble et leur contribution est variable selon le type de cours d'eau (David et al., 2010).

L'ensemble de ces paramètres sont des variables candidates pour expliquer les variations des exposants de géométrie hydraulique stationnelle b et f .

Tableau 1.1 : Exemples observés dans la littérature de valeurs moyennes de b et f estimés à partir de mesures à plusieurs débits à l'échelle du tronçon et de la section en travers.

Echelle	b	f	Source
Tronçon	0.18	0.31	73 tronçons en Nouvelle-Zélande (Jowett, 1998)
	0.13	-	58 tronçons en France (Lamouroux et Capra, 2002)
	0.11	0.28	17 tronçons en Australie (Stewardson, 2005)
	1.05	-	1 tronçon en tresse en Alaska (Ashmore et Sauks, 2006)
	0.16	0.39	15 tronçons pentus en tête de bassin versant dans le Colorado (David et al., 2010)
Section en travers	0.06	0.35	19 sections dans des rivières à berges cohésives en Australie (Nanson et al., 2010)
	0.26	0.40	20 sections aux États-Unis (Leopold et Maddock, 1953)

1.3 Limites de validité des relations de géométrie hydraulique

Une limite fondamentale des relations de géométrie hydraulique, comme toute approche statistique, est que ces relations sont construites à partir des données disponibles utilisées et sont, par conséquent, très dépendantes de celles-ci.

L'application de la géométrie hydraulique stationnelle est limitée pour des gammes de débits inférieurs au débit de plein bord, contrairement aux modèles hydrauliques numériques déterministes qui peuvent s'appliquer à des gammes de débits beaucoup plus large. Par ailleurs, plusieurs études ont observé une non-linéarité des relations dans le repère logarithmique pour les débits faibles et élevés s'approchant du débit de plein bord mais également à des changements de rugosité des berges au niveau de la station (Figure 1.2). Ces études proposent l'utilisation d'une relation log-quadratique (Richards, 1973) ou, plus récemment, une relation log-linéaire par morceaux (Bates, 1990; Navratil, 2005 ; Navratil et Albert, 2010). L'utilisation

de telles relations peut en revanche compliquer la modélisation des relations de géométrie hydraulique car elles nécessitent plus de paramètres.

Les relations peuvent être instables dans le temps à cause des ajustements naturels du cours d'eau face aux perturbations telles que les crues (Phillips, 1990, 1991). Par exemple, Reid et al. (2010) ont étudié la géométrie hydraulique stationnelle d'une trentaine de tronçons et ont observé des changements des valeurs des exposants suites à une crue importante. Toutefois, la géométrie hydraulique à l'échelle du tronçon devrait être moins sensible à ces instabilités qu'à l'échelle de la section en travers pour une rivière à l'équilibre, c'est-à-dire présentant un bilan équilibré entre les entrées et sorties en eau et en sédiment. En effet, à l'échelle de la crue, on peut observer une variabilité importante de la morphologie sur quelques mètres (migrations des radiers et mouilles vers l'aval, changement brusque de la forme de la section en travers) ; toutefois, sur un linéaire plus long (c'est-à-dire à l'échelle du tronçon) les caractéristiques morphologiques sont relativement stables (longueur des séquences radiers-mouilles, pente moyenne du cours d'eau, etc.).

D'autre part, l'influence des pressions anthropiques peut aussi modifier ces relations par des aménagements du chenal (calibration, curage, endiguement, etc.) ou par des modifications des débits liquides et solides (prélèvements de débits, présence de barrages, etc.). Par exemple, Doll et al. (2002) et Faustini et al. (2009) ont étudié les relations dans des régions avec des pressions anthropiques variables. Les deux études montrent que les cours d'eau dans des contextes urbanisés présentent des relations différentes avec des largeurs généralement plus importantes. Ce processus d'élargissement en milieu urbain peut être expliqué par l'imperméabilisation des sols du bassin versant et la mise en place de systèmes de drainage qui provoquent une augmentation de la magnitude et la fréquence des crues (Roberts, 1989 ; Hammer, 1972 ; Doll et al., 2002).

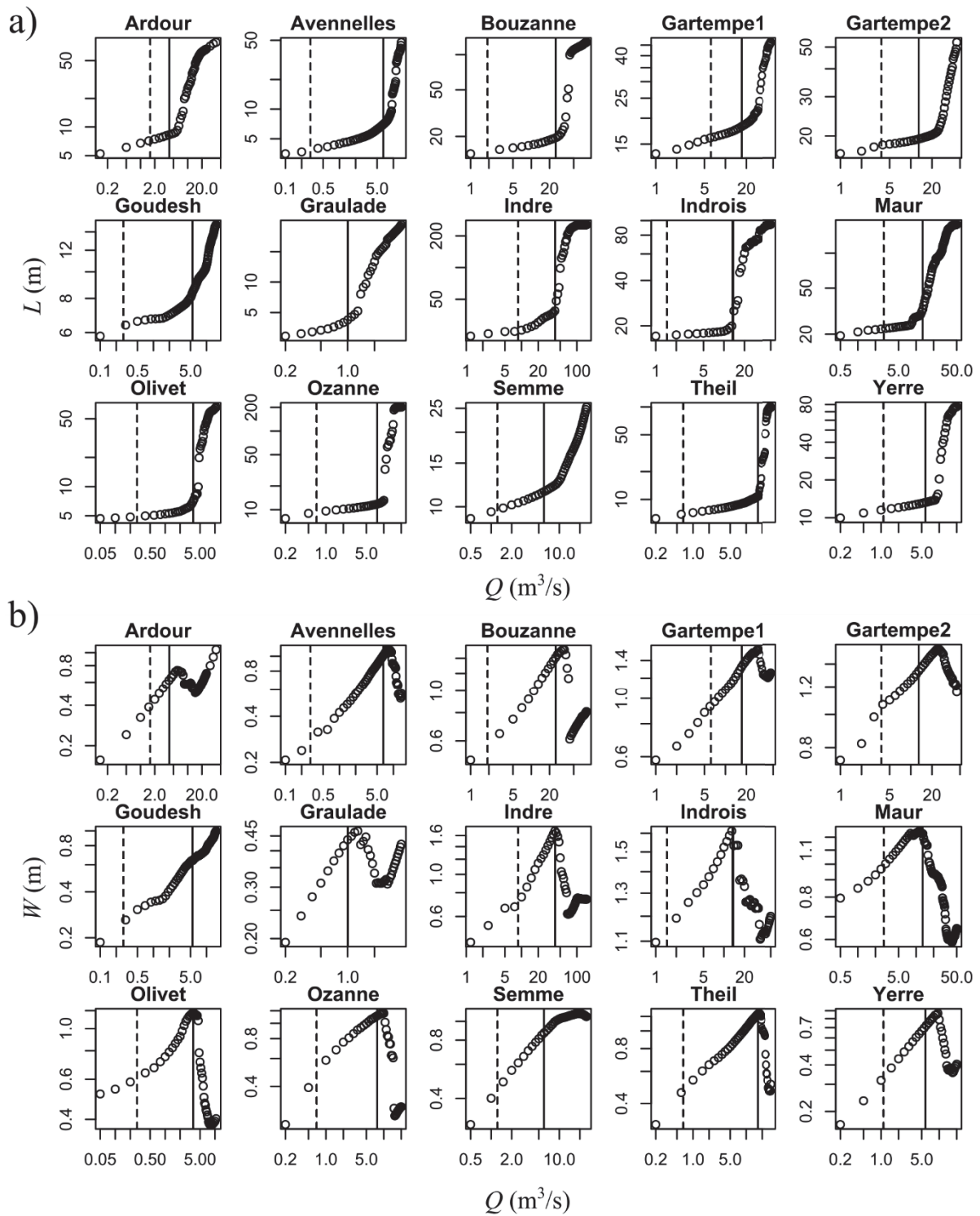


Figure 1.2 : Relations largeur-débit (a) et hauteur-débit (b) dans un repère logarithmique pour 15 tronçons collectés par Navratil (2005). Les points correspondent à des hauteurs et largeurs estimées pour des débits simulés à partir d'un modèle hydraulique numérique monodimensionnel calibré à plusieurs débits pour chaque tronçon. La ligne verticale en pointillé indique le débit médian estimé (Q_{50}) au tronçon. La ligne verticale continue indique le débit observé au niveau de plein bord.

1.4 Objectifs de la thèse

Malgré la faible compréhension de la variation des exposants de géométrie hydraulique stationnelle entre les cours d'eau, les récentes études ont montré l'intérêt de développer les relations de géométrie hydraulique à l'échelle du tronçon en couplant des jeux de données importants avec des variables qui apparaissent avoir une influence sur la géométrie hydraulique. Par exemple, Booker (2010) analyse les relations de géométrie hydraulique longitudinales et stationnelles de plus de 100 sections en travers et s'intéresse aux prédictions de la largeur des cours d'eau sur l'ensemble du territoire néo-zélandais. Il observe une forte influence de la surface du bassin versant et préconise de développer la compréhension des relations entre les variables telles que la pente du cours d'eau, l'occupation du sol avec les paramètres de géométrie hydraulique. Navratil (2005) a étudié 17 tronçons en France et a observé une variabilité importante des exposants de géométrie hydraulique stationnelle. Il identifie la cohésion des berges, la lithologie du bassin versant, la granulométrie des sédiments du lit ou bien la végétation rivulaire comme des variables à prendre en compte dans de futurs travaux de géométrie hydraulique stationnelle. De même, David et al. (2010) s'intéressent à la géométrie hydraulique stationnelle de 14 tronçons de type « cascade » ou « step-pool » aux États-Unis et identifient des variables d'énergie (pente) et de résistance à l'écoulement (surface de rugosité) comme influentes sur la variation de largeur et de hauteur avec le débit. Navratil (2005) et David et al. (2010) indiquent toutefois qu'un nombre de données suffisamment important et variées doit être étudié pour développer la compréhension des relations de géométrie hydraulique stationnelle.

Malgré leurs limites, les relations de géométrie hydraulique sont un outil très utilisé pour des modèles environnementaux à large échelle comme ceux présentés en début de chapitre (par exemple pour la modélisation de la température de l'eau ou les flux de polluants à l'échelle de grands bassins versants). Ces types de modèles tendent à être indispensables pour guider les actions de gestion de bassins versants étant donné les modifications des régimes hydrologiques attendues dues aux changements climatiques et aux besoins humains (Milly et al., 2005; Marx et al., 2018). Des modèles nationaux de géométrie hydraulique existent mais ce sont des modèles « moyens » par défaut où les analyses ont été faites sur des données limitées (peu de stations, à l'échelle de la section en travers...) et/ou seulement sur la géométrie hydraulique longitudinale. Par conséquent, ces modèles présentent potentiellement une large gamme d'incertitudes qui peut compromettre leur utilisation. Par exemple les modèles nationaux

français de géométrie hydraulique, issues de la plateforme de données et de modèles cartographié « Estimkart » (Lamouroux et al., 2010), ont été développés seulement à partir d'une centaine de tronçons en France (Lamouroux et Capra, 2002 ; Lamouroux et Souchon, 2002). Une amélioration de ce type de modèles, permettant une prédiction plus fine des variations spatiales et temporelles des caractéristiques hydrauliques, apporterait un bénéfice conséquent pour les études environnementales à large échelle. Pour ce faire, il est nécessaire de prendre en compte des données de géométrie hydraulique mesurées dans des cours d'eau et des contextes hydromorphologiques variés.

Récemment, de nombreuses mesures de géométrie hydraulique de tronçon ont été réalisées à l'échelle nationale dans le contexte de l'enrichissement de la base de données CARHYCE (Gob et al., 2014) et par la suite d'études d'évaluation d'impact sur l'habitat avec le modèle ESTIMHAB (Lamouroux, 2002). Des mesures similaires ont été réalisées à l'étranger, particulièrement en Nouvelle-Zélande (Booker, 2016). Ces mesures, réalisées à plusieurs débits et dans des contextes géomorphologiques différents, représentent un jeu de données unique de géométrie hydraulique stationnelle et longitudinale à l'échelle du tronçon, pouvant enrichir les connaissances et améliorer les modèles de géométrie hydraulique.

L'objectif de ces travaux de thèses sont :

1) Approfondir les connaissances dans les relations de géométrie hydraulique et plus particulièrement les relations dites stationnelles dont un jeu de données unique à l'échelle de tronçon a été collecté en France et à l'étranger ; 2) Construire des modèles de géométrie hydraulique combinant les relations stationnelles et longitudinales afin d'avoir des prédictions nationales des variations spatiales et temporelles des caractéristiques hydrauliques avec le débit au sein des réseaux hydrographiques ; 3) Présenter l'applicabilité des modèles construits pour les études environnementales à l'échelle de grands bassins versants. Dans le cadre de ces travaux de thèse, je proposerai un cas d'application des modèles pour étudier les impacts sur l'habitat aquatique des altérations de débits à large échelle, ainsi qu'aux réponses biologiques observées en lien avec ces altérations.

Pour les deux premiers points des approches statistiques seront utilisées pour modéliser la géométrie hydraulique des cours d'eau en fonction de variables explicatives environnementales (par exemple la pente, la géologie, le climat et autres caractéristiques du bassin). La géométrie hydraulique sera essentiellement étudiée à l'échelle du tronçon de cours d'eau. Cette approche

étant jugée plus pertinente car plus robuste aux éventuelles erreurs de mesures ou singularités des sections en travers, mais également car elle est plus intéressante en terme d'applications (par exemple pour l'étude des habitats aquatiques).

Chapitre 2 : Matériels et méthodes

Ce chapitre se présente en quatre parties. Dans une première partie, je présente les différentes données de géométrie hydraulique au tronçon qui ont été collectées pour ces travaux. Dans une deuxième partie, je présente les différentes sources de données explicatives. La troisième partie explicite les estimations des paramètres de géométrie hydraulique stationnelle et longitudinale. Enfin, la quatrième partie présente les principales méthodes statistiques qui ont été utilisées dans les travaux de thèse.

2.1 Les données de géométrie hydraulique au tronçon

Pour mes travaux de thèse, j'ai pu rassembler des données de géométrie hydraulique de plus de 1000 stations. Ces observations proviennent de plusieurs sources, ce qui a compliqué le travail d'inventaire et d'organisation des données. De manière générale, la majorité des stations sont localisées sur l'ensemble de la France métropolitaine (Figure 2.1, Tableau 2.1), toutefois une partie des données ont également été collectées en Nouvelle-Zélande ainsi qu'au Royaume-Uni. L'ensemble de ces observations ont été réalisées dans des contextes climatiques, topographiques et géologiques contrastés produisant ainsi des grandes variations dans les caractéristiques morphologiques des cours d'eau (Figure 2.2).

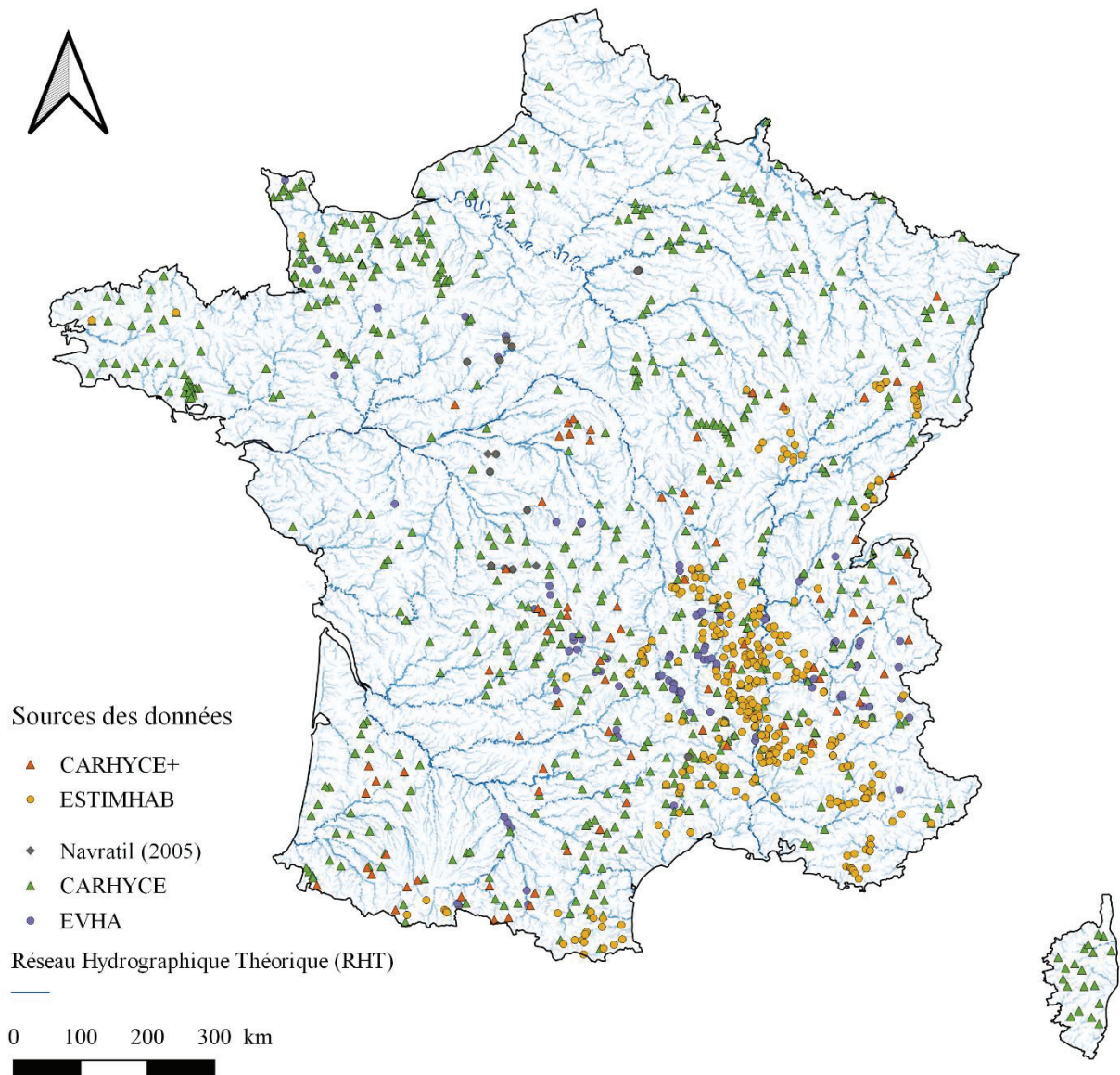


Figure 2.1 : Localisation des données de géométrie hydraulique au tronçon en France. Les différents points et couleurs représentent les différentes sources de données françaises. Le tracé du réseau hydrographique théorique (RHT) national est représenté en bleu en arrière-plan.



Figure 2.2 : Exemple de tronçons du jeu de données: le Bès (a), le Réal-Martin (b), le Drac Noir (c), la Souloise (d), la Varaude (e), la Langougnole (f).

2.1.1 ESTIMHAB

Une partie des stations collectées (plus de 400 stations) provient des applications du modèle ESTIMHAB (Lamouroux, 2002). ESTIMHAB est un modèle d'habitat statistique largement utilisé par les bureaux d'études notamment pour déterminer les débits minimums biologiques à conserver à l'aval des barrages. Ce modèle prédit des « valeurs d'habitat » de différentes

espèces aquatiques sur un tronçon de cours d'eau à partir de caractéristiques hydrauliques du tronçon (hauteurs d'eau et largeurs mouillées moyennes, taille moyenne du substrat) estimées à deux débits aussi différents que possible (généralement inférieurs au débit journalier médian Q_{50}). Ces caractéristiques sont relativement simples à collecter sur le terrain. Ce modèle a été conçu comme une alternative simplifiée aux modèles d'habitats conventionnels à base de modélisation hydraulique numérique dont la mise en œuvre est assez contraignante du fait des données et des connaissances en modélisation hydraulique nécessaires à leur utilisation.

Les mesures de terrain nécessaires à l'application d'ESTIMHAB comprennent une centaine de hauteur d'eau et une quinzaine de largeurs mouillées régulièrement réparties sur le cours d'eau (Figure 2.3), ce qui a été jugé suffisant pour établir les relations robustes de géométrie hydraulique à l'échelle du tronçon (Stewardson, 2005). Les largeurs mouillées sont mesurées sur un minimum de 15 sections en travers régulièrement espacées, les hauteurs d'eau sont mesurées et les tailles de substrat (mesure de l'axe b) sont visuellement estimées sur un minimum de 100 points régulièrement espacés le long des sections en travers. Les débits lors des mesures sont jaugés, et une estimation du débit médian naturel (Q_{50}) est nécessaire à l'application du modèle.

Une partie des applications d'ESTIMHAB provient des études d'évaluation des volumes prélevables du bassin Rhône-Méditerranée et Corse (Miguel *et al.*, 2016). Ces études permettent un ajustement des autorisations de prélèvement d'eau dans les rivières ou les nappes concernées, afin d'équilibrer les ressources disponibles et le fonctionnement des milieux naturels. Les applications d'ESTIMHAB de type « volumes prélevables » ont généralement été faites par des bureaux d'études. De manière générale, les stations ESTIMHAB ont été réalisées sur des tronçons présentant une altération morphologique limitée.

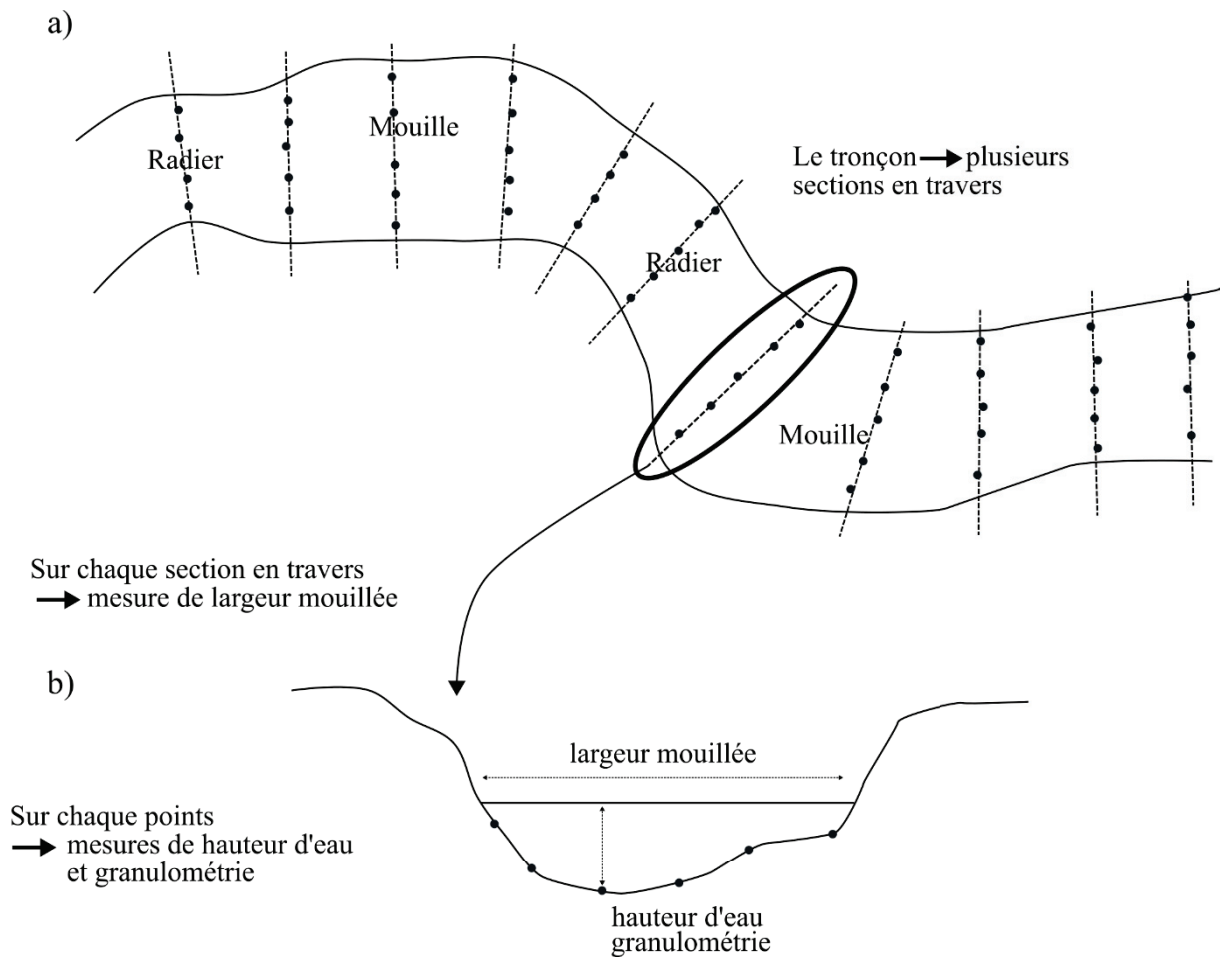


Figure 2.3 : Schéma conceptuel des protocoles de mesures hydraulique à l'échelle du tronçon. (a) Vue en plan du tronçon. Le tronçon est composé de plusieurs sections en travers dont l'espacement varie suivant le protocole (par exemple, l'espacement est régulier pour les protocoles ESTIMHAB et CARHYCE). (b) vue en travers d'une section. Pour chaque campagne de mesures, la largeur mouillée est mesurée ainsi que des points de hauteurs d'eau et de granulométrie. L'espacement des points de mesures le long de la section en travers est variable selon le protocole de mesure (par exemple, l'espacement est régulier pour les protocoles ESTIMHAB et CARHYCE). La granulométrie est généralement mesurée lors d'une seule campagne de mesures.

2.1.2 CARHYCE

Une majeure partie des données (plus de 800 stations) collectées provient des applications de l'outil de caractérisation hydromorphologique des cours d'eau CARHYCE (Gob et al., 2014). CARHYCE est développé dans un contexte d'application de la Directive Cadre Européenne en France concernant le bon état écologique des cours d'eau et plus particulièrement sur l'aspect hydromorphologique. L'outil CARHYCE repose sur un protocole d'acquisition de données hydromorphologiques mesurées sur un grand nombre de stations à l'échelle du territoire national. L'outil est associé à une base de données et à un ensemble de méthodes d'analyse

statistique permettant la caractérisation hydromorphologique d'un tronçon et de construire des modèles de référence. À terme, il contribuera à l'évaluation de l'altération des cours d'eau.

Le protocole de mesure terrain de CARHYCE s'est sensiblement inspiré de celui d'ESTIMHAB pour la partie en eau (c.-à-d. largeurs mouillées et hauteurs d'eau). Chaque tronçon comporte 15 sections en travers espacées à un intervalle régulier égal à la largeur de plein bord moyenne estimée. Pour chaque section en travers, plus de 8 points de hauteur d'eau sont mesurés à espacement régulier basé sur la largeur mouillée moyenne estimée du tronçon (Figure 2.3). De plus, la géométrie de plein bord, les faciès d'écoulement, la nature des berges et de la ripisylve sur les deux berges sont informés. Deux types de granulométrie sont mesurés : la granulométrie des radiers (protocole de Wolman, 1954) et la granulométrie visuellement estimée à chaque point de mesure de hauteur d'eau.

Le protocole CARHYCE a été majoritairement appliqué à un débit. Cependant une centaine de stations ont récemment fait l'objet d'une deuxième campagne de mesures (stations « CARHYCE + ») à un second débit et présentant donc des données de géométrie hydraulique similaires à celles d'ESTIMHAB. Les stations « CARHYCE+ » sont localisées sur le réseau de référence pérenne présentant *a priori* une altération morphologique limitée. En revanche, la localisation des stations CARHYCE a été choisie afin de recouvrir de manière homogène le réseau hydrographique français et ces stations présentent ainsi des degrés d'altérations morphologiques et hydrologiques variés. Une estimation visuelle du degré d'altération morphologique et hydrologique est généralement renseignée pour chaque station. Les mesures du protocole CARHYCE et CARHYCE+ sont essentiellement réalisées par les agents de l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques (ONEMA, désormais Office Français de la Biodiversité).

2.1.3 RHYHABSIM

Près de 200 stations collectées proviennent des applications du modèle d'habitat RHYHABSIM (Jowett, 1989 ; Jowett et al., 2008). RHYHABSIM est un modèle d'habitat numérique, basé sur une modélisation hydraulique numérique à une dimension, qui est principalement utilisé pour évaluer l'habitat aquatique d'un tronçon et quantifier les réponses des écosystèmes à un changement de débit. L'utilisation de RHYHABSIM, à l'instar d'ESTIMHAB, est principalement utilisé pour déterminer les débits minimums biologiques dans les cours d'eau néo-zélandais.

RHYHABSIM, comme tout modèle d'habitat conventionnel, requiert des mesures de terrain assez importantes pour mettre en œuvre le modèle hydraulique numérique. En particulier, sur chaque section en travers les mesures de terrain comprennent des mesures de profondeurs, de vitesses et d'une estimation de la granulométrie en plusieurs points à un intervalle qui n'est pas nécessairement régulier afin d'avoir une description assez fine de la topographie du lit du cours d'eau. Les mesures sont faites sur plusieurs sections en travers (entre 4 et 42 sections en travers selon les tronçons étudiés) et l'espacement n'est pas nécessairement régulier mais cherche à représenter au mieux la morphologie du tronçon en terme de modélisation hydraulique. Pour calibrer le modèle numérique, des mesures additionnelles sont réalisées à des débits différents (entre 1 à 8 débits additionnels). Ces mesures additionnelles consistent généralement à une mesure du niveau de l'eau aux sections en travers ainsi qu'à une mesure du débit.

Les applications de RHYHABSIM ont été essentiellement faites en Nouvelle-Zélande pour des agents de NIWA (National Institute of Water and Atmospheric Research) ou des agents des conseils régionaux néo-zélandais et les stations présentent de manière générale une altération morphologique limitée.

2.1.4 EVHA

Plus d'une centaine de stations proviennent de l'application du modèle d'habitat EVHA (Ginot, 1998). Ces stations sont issues de plusieurs études d'habitats (Lamouroux et Capra, 2002). A l'instar de RHYHABSIM, EVHA est un modèle d'habitat numérique conventionnel basé sur un modélisation hydraulique numérique à une dimension pour la caractérisation de l'habitat aquatique. Le modèle EVHA requiert des mesures de largeur et hauteur d'eau sur plusieurs sections en travers. La localisation des mesures de hauteurs d'eau et des sections en travers ne suit pas nécessairement un espacement régulier mais cherche à représenter au mieux la morphologie du tronçon. Lors de son utilisation, le modèle hydraulique numérique a généralement été calé à un seul débit.

2.1.5 PHABSIM

Une soixantaine de données proviennent de l'application du modèle d'habitat PHABSIM (Bovee, 1982) collectées au Royaume-Uni dans le cadre d'études d'habitats (Booker et Acreman, 2007). PHABSIM fait partie des premiers modèles d'habitat numérique conventionnels. Le protocole d'acquisition des données terrain se rapproche sensiblement de

ces homologues EVHA et RHYHABSIM. PHABSIM a été largement utilisé à travers le monde pour des études d'habitat (Parasiewicz et Dunbar, 2001).

2.1.6 Navratil (2005)

Enfin, dans le cadre de la thèse d'Oldrich Navratil (Navratil, 2005), 15 tronçons de cours d'eau ont fait l'objet de mesure afin de réaliser des modèles hydrauliques numériques monodimensionnels. Le protocole a consisté en la mesure de la topographie du chenal jusqu'au niveau de plein bord ainsi que de la plaine d'inondation sur plusieurs sections en travers (entre 14 et 116 sections en travers) du tronçon. Des mesures répétées du niveau de l'eau à plusieurs débits ont été faites pour calibrer les modèles. En complément, les mesures hydrauliques ont été associées à des stations hydrologiques à proximité des tronçons étudiés. Les caractéristiques hydrauliques ont été simulées pour des gammes de débits très larges allant de débits faibles à des débits supérieurs au débit de plein bord. Par ailleurs, ces tronçons présentent une altération morphologique et hydrologique limitée (Navratil, 2005).

Tableau 2.1 : Tableau récapitulatif des sources de données et de leur protocole de mesure respectif

Sources	Nombre de tronçons	Nombre de section en travers	Espacement des tronçons	Espacement des points de hauteurs	Nombre de campagne de mesures	Localisation
ESTIMHAB	> 400 tronçons	9-26	Espacement régulier (largeur mouillée moyenne estimée)	Espacement régulier (largeur mouillée moyenne estimée/7)	Mesures à 2 débits	France métropolitaine
CARHYCE	> 800 tronçons	11-25	Espacement régulier (largeur de plein bord moyenne estimée)	Espacement régulier (largeur mouillée moyenne estimée/7)	Mesures à un débit unique, excepté pour les tronçons CARHYCE+ (mesures à 2 débits)	France métropolitaine
RHYHABSIM	125	4-42	Espacement irrégulier	Espacement irrégulier	Mesures > 1 débit	Nouvelle-Zélande
EVHA	138		Espacement irrégulier	Espacement irrégulier	Mesures à un débit unique	France métropolitaine
PHABSIM	60	4-13	Espacement irrégulier	Espacement irrégulier	Mesures > 1 débit	Royaume-Uni
Navratil (2005)	15	14-116	Espacement irrégulier	Espacement irrégulier	Mesures à > 1 débit	France métropolitaine

2.1.7 Synthèse et critique des données

Ces données présentent des similitudes quant à leurs protocoles de mesures de terrain. En effet, ces protocoles sont tous basés sur une approche à l'échelle du tronçon fournissant en moyenne

120 hauteurs d'eau et 15 largeurs mouillées par mesure et ces mesures ont généralement été faites à des débits inférieurs ou avoisinant le débit médian (Q_{50}).

Les altérations morphologiques et hydrologiques des cours d'eau peuvent fortement affecter la géométrie hydraulique des tronçons. La précision quant à ces altérations a été informée de manière variable selon les sources de données. Par exemple, des degrés d'altération hydrologique et morphologique ont été informés par les opérateurs pour chaque station CARHYCE alors qu'aucune documentation n'existe pour les stations ESTIMHAB, EVHA, RHYHABSIM ou PHABSIM. Ces stations ont pour la plupart été réalisées dans le cadre d'études d'habitat dans des cours d'eau ne présentant peu ou pas d'altérations morphologiques directes provenant d'aménagements (par exemple : recalibration, rectification, curage, etc.). Toutefois, ces stations sont souvent situées en aval de barrages hydroélectriques et peuvent présenter des altérations hydrologiques importantes. La modification du débit liquide et solide peut potentiellement affecter la morphologie du tronçon à long terme (réajustement du cours d'eau avec les nouvelles caractéristiques hydro-sédimentaires). A titre d'exemple, il a été observé sur plusieurs cours d'eau alpins que la rétention du débit solide par les barrages provoquerait une incision du lit des cours d'eau en aval (Bakker et al., 2018).

Par ailleurs, un tel jeu de données est possiblement entaché d'erreurs liées aux mesures lors des campagnes de terrain provenant de sources diverses autant humaines (positionnement des sections en travers, choix de la méthode de jaugeage, etc.) que dues aux instruments de mesures (Navratil et Albert, 2010 ; Gonzalez et Pasternack, 2015). Les relations de géométrie hydraulique stationnelle établies à partir des données hauteur - débit et largeur - débit à deux campagnes seulement sont sensibles à la qualité de la mesure et à l'écart entre les débits associés (Stewardson 2005 ; Navratil et Albert, 2010).

Ainsi, une première sélection des données a été faite afin d'écartier des biais liés aux altérations morphologiques et aux erreurs de mesures : 1) pour les stations CARHYCE ont été retenus que les stations présentant des degrés d'altération morphologique faibles ou nuls et des degrés d'altération hydrologique modérés à nuls. Les stations des autres sources de données (ESTIMHAB, EVHA, RHYHABSIM...) présentant des informations détaillées sur des altérations morphologiques ou la présence d'aménagements (par exemple, endiguements, rectification) ont été écartées du jeu de données. La majorité des stations n'ayant pas d'informations suffisantes sur ces altérations, il est important de prendre en considération le potentiel biais lié à ces altérations et les conséquences que peuvent engendrer ces altérations

sur les résultats des travaux de la thèse ; 2) pour les stations à plusieurs débits de mesures, celles-ci ont été écartées si les débits ne sont pas suffisamment éloignés (moins de 50% de différence entre le débit le plus élevé et le débit le plus bas).

2.2 Variables explicatives disponibles et bases de données

Comme il a été vu dans le premier chapitre, les facteurs influençant les relations de géométrie hydraulique longitudinale et stationnelle sont multiples et interagissent à différentes échelles. Un point important des travaux de thèse a été d'identifier les variables de contrôles disponibles et pouvant être rattachées à chacune des stations étudiées.

Le choix s'est porté sur les bases de données SIG (Système d'Information Géographique) du RHT (Réseau Hydrographique Théorique) et du REC (River Environment Classification) qui sont les principales bases de données portant des informations sur le réseau hydrographique à l'échelle nationale en France et en Nouvelle-Zélande respectivement. La base de données RMC (Rhône Méditerranée Corse) a également été prise en compte malgré sa couverture régionale essentiellement (bassin du Rhône uniquement). Des variables à la disponibilité plus limitée provenant de la base de données CARHYCE et d'analyse d'image aérienne ont également été étudiées dans ces travaux.

2.2.1 Le Réseau Hydrographique Théorique (RHT)

Le RHT (Réseau Hydrographique Théorique, Pella *et al.*, 2012) est un référentiel du réseau hydrographique français à l'échelle nationale développé à partir du référentiel hydrographique national BD Carthage® et du modèle numérique de terrain à 50 m BD Alti® de l'Institut Géographique National (IGN). Cet outil comprend un réseau d'écoulement composé d'arcs auxquels sont associés plusieurs attributs environnementaux via une plateforme de modèles « Estimkart » (Lamouroux *et al.*, 2010). Ces arcs représentent des portions de cours d'eau entre deux confluences. Chaque arc du RHT contient des attributs morphologiques de l'arc (pente moyenne, altitude moyenne, ordination hydrographique de Strahler, distance à la source...), des attributs du bassin versant associé à l'arc (surface drainée, occupation des sols du bassin versant à partir de la base de donnée géographique Corine Land Cover®, indices géologiques calculés par Snelder *et al.*, 2008). Des estimations à l'échelle nationale du débit moyen et des débits classés (Sauquet et Catalogne, 2011), des estimations nationales de la taille moyenne des sédiments du lit de cours d'eau (Snelder *et al.*, 2011), ainsi que des probabilités de présence d'espèces piscicoles ont également été associées à chaque arc du RHT. Le RHT s'étend sur la

totalité du territoire français, il cumule 283 639 kilomètres de linéaire et totalise 114 603 arcs. La longueur moyenne des arcs est de 2 500 m, la médiane est de 1 900 m.

2.2.2 *Le Réseau Rhône Méditerranée Corse (RMC)*

Afin de caractériser la qualité physique des cours d'eau de la région Rhône-Méditerranée-Corse, des estimations d'indicateurs de qualité hydromorphologique ont été faites sur un référentiel du réseau hydrographique composé de tronçons géomorphologiques homogènes (Wiederkehr, 2012). Cette base de données a été construite à partir de la BD Cartage®, du modèle numérique de terrain à 25 m BD Topo® ainsi que du RHT. Cette base de données comprend 14 475 tronçons auxquels sont associés des indicateurs tels que l'indice de sinuosité, l'indice de confinement, la largeur moyenne normalisée de la bande active ou bien le style fluvial du tronçon.

2.2.3 *River Environment Classification (REC)*

Le réseau hydrographique néo-zélandais a été digitalisé dans la base de données national, le REC (River Environment Classification; Snelder and Biggs, 2002). Le REC est comparable au RHT dans sa construction. En effet, celui-ci a été développé à partir d'un modèle numérique de terrain à 30 m et comprend un réseau d'écoulement composé 560 000 arcs. De la même manière, chaque arc possède des attributs environnementaux (géologie et occupation du sol du bassin versant, surface drainée, pente moyenne du tronçon et du bassin versant ...), des estimations d'indices hydrologiques (débits classés, Booker and Woods, 2014) et des estimations de la granulométrie du cours d'eau (Haddadchi et al., 2017).

2.2.4 *La base de données CARHYCE*

La base de données CARHYCE se présente comme un catalogue national de données hydromorphologiques, construite à partir des mesures de terrain du protocole CARHYCE sur l'ensemble du territoire national de façon homogène. Ces données de terrain, couplées avec des données géographiques et d'altérations hydromorphologiques, permettent d'établir des modèles de références régionaux de la qualité hydromorphologique des cours d'eau (Gob et al., 2014). Cette base de données est un outil particulièrement utile pour les gestionnaires de bassins pour évaluer l'état hydromorphologique d'un tronçon de cours d'eau vis-à-vis des modèles de références CARHYCE.

La base de données CARHYCE fournit des informations supplémentaires relativement précises à l'échelle du tronçon. Cette base de données comprend l'ensemble des variables mesurées sur

le terrain telles que des données granulométriques, des descripteurs de la ripisylve, la proportion de faciès d'écoulement au sein du tronçon, la pente moyenne du tronçon, des mesures du profil longitudinal du tronçon ainsi que la géométrie de plein bord (largeur, hauteur, Figure 2.4). Cette base de données comprend également des estimations du débit de plein bord et de variables hydrauliques (puissance spécifique, rapport largeur/profondeur, nombre de Froude, force tractrice, profondeur des mouilles) à partir des mesures de terrain.

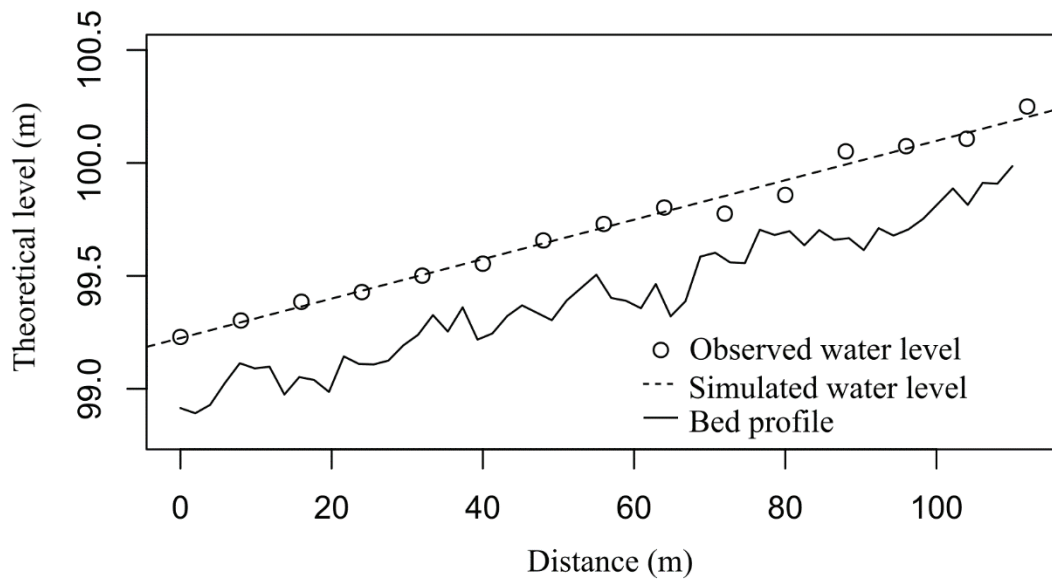


Figure 2.4 : Exemple de variable de terrain issue de la base de données CARHYCE : le profil longitudinal du fond du lit.

2.2.5 Analyses d'images aériennes

En plus de ces sources de variables, des analyses d'images aériennes ont également été réalisées dans le cadre de ce projet, l'objectif de cette approche étant d'évaluer l'intérêt de l'utilisation d'images aériennes dans le domaine de la géométrie hydraulique. Pour cela, une centaine de sites (ESTIMHAB et CARHYCE confondus) ont fait l'objet d'analyses par inspection visuelle des photographies aériennes de la BD Ortho® (IGN). La largeur de plein bord moyenne au tronçon ainsi que le style fluvial ont été renseignés pour les tronçons sélectionnés. La largeur de plein bord moyenne a été informée en mesurant 15 largeurs de plein bord avec un espacement régulier (espacement égal à largeur de plein bord moyenne estimée). Cette méthodologie a été appliquée sur les tronçons « ESTIMHAB » et sur 20 tronçons « CARHYCE+ » afin de vérifier la cohérence de nos estimations avec celles de CARHYCE (mesurées sur le terrain). Le style fluvial a été informé à partir d'une classification simplifiée, c'est-à-dire rectiligne ou en tresse.

2.2.6 Rattachement des stations aux bases de données SIG

Un travail de localisation des stations a été réalisé pour les tronçons non-géoréférencés (essentiellement les stations ESTIMHAB). Cela a été fait notamment par l'étude bibliographique des rapports d'études de volumes prélevables. Chaque station étudiée a été rattachée par géoréférencement aux tronçons du RHT et du REC afin d'associer les paramètres de géométrie hydraulique des tronçons aux attributs de ces bases de données, notamment les débits classés (Q_{50} par exemple). Une seconde sélection des données a été faite en écartant les stations ne possédant pas d'information sur la localisation ou n'ayant pas de tronçon SIG correspondant.

Tableau 2.2 : Principales sources de variables explicatives.

Source	Couverture géographique	Variables explicatives fournies
RHT	Nationale (France métropolitaine)	Géomorphologie du bassin versant amont et de l'arc (pente moyenne de l'arc, surface du bassin versant, densité de drainage, etc.), géologie du bassin versant, occupation du sol, hydrologie estimée (débits classés), granulométrie estimée.
REC	Nationale (Nouvelle-Zélande)	Géomorphologie du bassin versant amont et de l'arc (pente moyenne de l'arc, surface du bassin versant, densité de drainage, etc...), géologie du bassin versant, occupation du sol, hydrologie estimée (débits classés), granulométrie estimée.
RMC	Régionale (bassin du Rhône)	Descripteurs hydromorphologiques (largeurs de la bande active, style fluvial).
CARHYCE	A l'échelle des stations CARHYCE	Mesures hydromorphologiques (largeurs et hauteurs de plein bord, description de la ripisylve, profil longitudinal, etc.).
Analyses d'images aériennes	A l'échelle des stations étudiées	Largeurs de plein bord moyenne, style fluvial.

2.3 Estimations des paramètres de géométrie hydraulique

Les exposants de géométrie hydraulique stationnelle ont pu être calculés pour les stations où des mesures ont été faites à plusieurs débits (Tableau 2.1). À partir des valeurs moyennes de hauteurs d'eau et de largeurs mouillées et de débits, les exposants de géométrie hydraulique b et f ont été estimés en régressant respectivement la largeur mouillée moyenne et la hauteur d'eau mouillée avec le débit (équations 1.1 et 1.2, Figure 2.5).

Les paramètres liés à la géométrie hydraulique longitudinale ont pu être calculés à partir des estimations des exposants de géométrie hydraulique stationnelle b et f et en se basant sur les équations 1.7 et 1.8. Pour ces travaux, le choix du débit de référence s'est porté sur le débit médian interannuel Q_{50} qui est généralement le plus proche des débits de mesures sur le terrain

lors de l'acquisition des données. Par ailleurs, les caractéristiques hydrauliques au débit médian représentent des caractéristiques hydrauliques survenant la majeure partie du temps dans les cours d'eau et présentent de ce fait de nombreux intérêts pour des applications environnementales qui s'intéressent aux débits faibles à moyens dans les cours d'eau (par exemple Snelder et al., 2011 ; Miguel et al., 2016). Les valeurs de Q_{50} proviennent de modèles d'extrapolation de débits à l'échelle nationales (Sauquet et Catalogne, 2011 pour la France, Booker et Woods, 2014 pour la Nouvelle-Zélande) à partir d'observations provenant de multiples stations de jaugeages. Ces modèles permettent ainsi d'avoir des estimations des débits classés sur l'ensemble des réseaux hydrographiques. Toutefois, il est important de considérer les erreurs liées à ces modèles (Lamouroux et al., 2014).

Ainsi, la géométrie hydraulique au débit médian a été estimée pour chaque tronçon en utilisant :

$$W_{50} = W_{\text{mesure}} \times (Q_{50}/Q_{\text{mesure}})^b \quad (2.1)$$

$$H_{50} = H_{\text{mesure}} \times (Q_{50}/Q_{\text{mesure}})^f \quad (2.2)$$

Où W_{mesure} et H_{mesure} sont la largeur mouillée et la hauteur d'eau moyenne mesurées au débit Q_{mesure} . Les exposants b et f sont les valeurs estimées pour les stations avec des mesures à plusieurs débits ou des valeurs moyennes de l'ensemble des jeux de données pour les stations comptant une mesure à un débit unique.

Une dernière sélection sur l'ensemble du jeu de données a été faite afin d'écarter les stations présentant des données aberrantes. Ces stations présentent soit des valeurs de b et f sortant de la gamme « normale » (entre 0 et 1), soit des valeurs de débits de mesure inférieures au Q_{90} (débit dépassé 90% du temps) ou supérieures au Q_{10} (débit dépassé 10% du temps). Ces dernières valeurs aberrantes peuvent être dues à des erreurs de mesures sur le terrain ou aussi à des estimations erronées des débits classés ou à un mauvais rattachement au réseau hydrographique.

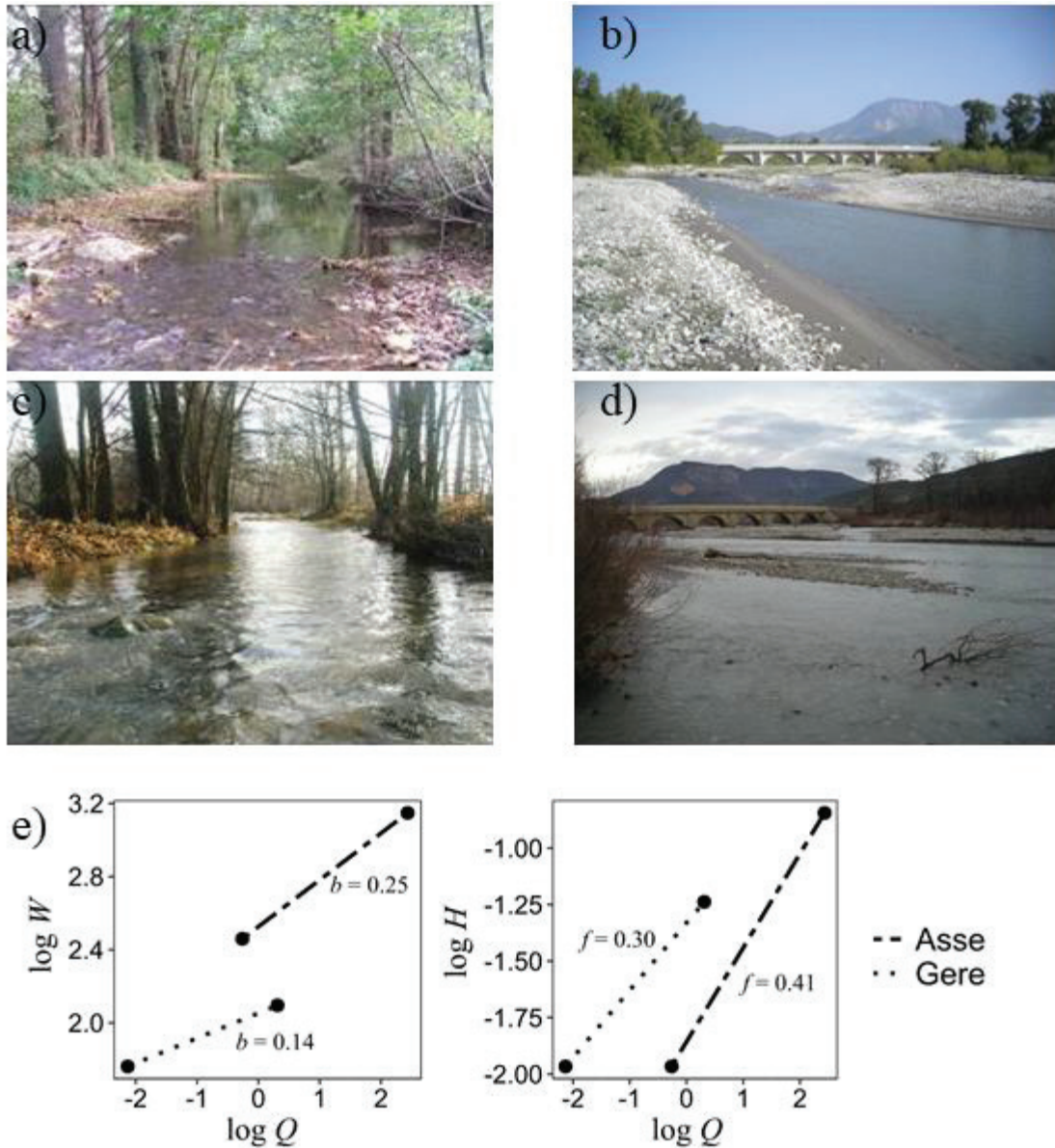


Figure 2.5 : Exemple de tronçons : La Gère aux basses eaux (a) et aux hautes eaux (c) ; l'Asse aux basses eaux (b) et aux hautes eaux (d). Les largeurs et hauteurs moyennes aux deux débits de mesure permettent d'estimer les exposants de géométrie hydraulique stationnelle b et f pour chacun de ces tronçons (e).

2.4 Les principales analyses statistiques utilisées

Comprendre les variations des exposants de géométrie hydraulique stationnelle et prévoir les valeurs des paramètres de géométrie hydraulique sur l'ensemble du réseau hydrographique national sont des problématiques où l'objectif est de minimiser une erreur de prévision par la recherche d'un modèle.

Toutefois, le choix de méthodes et de modèles appropriés est complexe à opérer et se décline selon si l'objectif est seulement prédictif ou si une compréhension du modèle (et donc de l'influence des variables) est recherchée. Jusqu'à présent, les études hydromorphologiques utilisent des modèles basés sur des régressions statistiques tels que les modèles de régressions linéaires ou les modèles multiniveaux par exemple (Piégay et Vaudor, 2016). Ces modèles sont généralement facilement interprétables et extrapolables mais présentent des limites notamment lorsqu'il s'agit de modéliser des relations présentant des formes non linéaires. De plus, ces modèles sont sensibles aux valeurs aberrantes et sont basés sur des hypothèses quant à la distribution des données qui ne sont pas toujours vérifiées. Récemment, l'apparition des approches d'apprentissage automatique (« *machine learning* ») tels que les réseaux de neurones artificiels (Hornik et al., 1989), les machines à vecteurs supports (Vapnik, 1998) ou les forêts aléatoires (« *random forests* », Breiman, 2001) a montré que ce sont des outils présentant de bonnes performances prédictives. Ces méthodes sont considérées comme non-paramétriques, c'est-à-dire qu'elles nécessitent pas d'hypothèse de départ particulière quant à la nature, la forme ou le type de variables explicatives et le nombre de paramètres du modèle n'est pas fixé et varie avec le nombre d'observations. Ainsi ces méthodes construisent des modèles performants mais généralement complexes et difficilement interprétables.

Dans ces travaux de thèse, les objectifs de compréhension et de prédiction sont séparément recherchés. Afin de répondre à ces objectifs, les approches traditionnelles et non paramétriques ont été utilisées. Plus spécifiquement, l'identification des principales causes des variations des exposants de géométrie hydraulique stationnelle (chapitre 3) a été réalisée en utilisant des modèles de régressions linéaires et des analyses factorielles discriminantes; la prédiction des paramètres de géométrie hydraulique longitudinale et stationnelle sur l'ensemble du réseau hydrographique français et néo-zélandais (chapitre 4) a été faite à l'aide de modèles basés sur la méthode des forêts aléatoires. L'ensemble des analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel R (R Core Team, 2017).

2.4.1 Les régressions linéaires simples et multiples

Les modèles de régressions linéaires sont les modèles les plus habituellement utilisés pour les analyses multivariées. Une variable quantitative à expliquer est mise en relation avec une ou plusieurs variables explicatives.

Lorsque le nombre de variables explicatives est grand, il est raisonnable de sélectionner les variables afin d'avoir des modèles parcimonieux. La sélection des variables peut se faire sur

différents critères tels le critère d'information d'Akaike (AIC) ou le critère d'information bayésien (BIC). Il existe aussi plusieurs algorithmes de sélection des variables selon les critères choisis.

L'utilisation de la régression linéaire demande plusieurs hypothèses de départ. Spécifiquement, la relation entre la variable à expliquer et les variables explicatives doivent avoir une forme linéaire, les résidus de la régression linéaire doivent être indépendants et distribués de façon homogène. La multicollinéarité prononcée des variables explicatives s'avère problématique pour l'interprétation des régressions linéaires.

La méthodologie adoptée pour la régression linéaire multiple est la régression pas à pas ou itérative (« *stepwise regression* »). L'intérêt étant de trouver parmi les variables explicatives le plus petit nombre d'entre elles qui expliquerait au mieux la variabilité de variables à expliquer. Le principe de la régression itérative est d'inclure dans le modèle les variables explicatives une par une et d'étudier l'amélioration du coefficient de détermination. Alternativement, les variables explicatives sont entrées et exclues du modèle afin d'identifier celles qui contribuent le plus au modèle. Les régressions linéaires multiples ont été réalisées à l'aide de la fonction « *step ()* » du logiciel R utilisant le critère AIC comme critère de sélection des meilleures variables explicatives.

Les variables colinéaires ont été rejetées par analyse des facteurs d'inflation de la variance (VIF). Les valeurs de VIF ont été calculées pour l'ensemble des variables explicatives et les variables à forte valeur ont été éliminées de l'analyse, la valeur seuil étant généralement dans la gamme 3-10 (Zuur et al., 2010).

Un diagnostic des régressions a été fait par analyses des résidus. Ce diagnostic réalisé de manière graphique a pour but de vérifier la linéarité de la relation, l'homoscédasticité de la variance, la normalité des résidus et d'identifier les points aberrants.

2.4.2 L'analyse factorielle discriminante

L'analyse factorielle discriminante (appelée également analyse discriminante linéaire ou simplement analyse discriminante) est une analyse statistique utilisée afin de déterminer quelles sont les variables qui discriminent le plus entre plusieurs groupes (ou *cluster*) définis d'observations.

L'analyse discriminante recherche une combinaison des variables explicatives permettant de séparer au mieux les groupes. Pour se faire, l'analyse discriminante produit un plan factoriel maximisant le rapport de variance intergroupe sur la variance intragroupe. L'analyse discriminante est complémentaire à l'analyse de régression linéaire multiple car elle permet d'avoir une représentation graphique du pouvoir discriminant et du poids des variables. L'analyse discriminante permet aussi d'identifier d'éventuelles relations non linéaires entre variables explicatives et les variables responsables des valeurs extrêmes des variables à expliquer.

L'utilisation de l'analyse discriminante demande plusieurs hypothèses de départ telles qu'une distribution normale des variables, une taille des groupes la plus homogène possible mais surtout un nombre d'observation plus important que le nombre de variables indépendantes. La violation des deux premières hypothèses n'est toutefois pas trop grave, l'analyse discriminante est cependant plus sensible à l'hétérogénéité des matrices variance-covariance, des valeurs aberrantes et de la colinéarité entre variables.

L'analyse discriminante a été utilisée, par exemple, pour estimer l'âge des eaux souterraines à partir de variables hydrogéochimiques (Daughney et al., 2010), pour étudier l'état d'oxydo-réduction des eaux souterraines (Close et al., 2016) ou bien pour évaluer l'impact des perturbations anthropogéniques dans le bassin versant sur des variables géomorphologiques de plusieurs tronçons (Woodsmith et Buffington, 1996).

Les analyses discriminantes ont été réalisées avec la fonction « *discrimin* » du *package* *ade4*. Aux vues des unités et échelles très différentes entre les variables étudiées, un centrage et une réduction de chacune des variables a été réalisé. Au préalable, la distribution des variables (distribution se rapprochant d'une gaussienne) doit être vérifiées. Enfin, la matrice des corrélations linéaires apporte une information sur le lien entre chaque variable et permet de vérifier si les variables sont suffisamment corrélées ou qu'il n'y a pas de corrélation partielle trop importante, auquel cas il convient de supprimer les variables de l'analyse.

2.4.3 Les forêts aléatoires « *Random Forests* »

La méthode des forêts aléatoires (« *random forests* ») est une technique introduite récemment par Breiman (2001). Cette méthode se base sur l'agrégation d'un ensemble d'arbres de classification et de régression obtenus par la méthode CART (« *Classification And Regression Trees* »). Chaque arbre est construit avec un sous-échantillon du jeu de donnée originel tiré au

hasard (« *bootstrap sample* »). La taille du sous-échantillon est d'environ deux tiers des observations du jeu de donnée originel et les observations restantes sont appelées les observations « *out-of-bag* ». De l'aléa est également ajouté au niveau des variables explicatives qui interviennent dans la construction des arbres, un petit nombre d'entre elles est sélectionné successivement durant les étapes de construction des arbres. Une fois construit chaque arbre va chercher à prédire les observations *out-of-bag*. La prédiction finale est basée sur la moyenne des prédictions de tous les arbres (c'est à dire de plusieurs modèles). L'erreur de prédiction « *out-of-bag error* » des forêts aléatoires est ensuite mesurée pour avoir une estimation de la performance prédictive du modèle global. Cette mesure est l'erreur moyenne calculée, à chaque arbre, sur les observations *out-of-bag*.

La méthode des forêts aléatoires peut être utilisée sur des variables à prédire de type qualitative ou quantitative. Dans le cas d'une variable qualitative, il ne s'agit pas de d'arbres de régression mais d'arbres de classification et les prédictions ne sont pas une moyenne de tous les arbres mais la majorité de vote pour une classe donnée. Par ailleurs, la méthode des forêts aléatoires ne requiert pas d'hypothèse particulière quant à la distribution des variables explicatives, ni le type de celles-ci (quantitative ou qualitative) et traite automatiquement des interactions fortement non linéaires entre les variables.

Par la complexité de sa construction, la méthode des forêts aléatoire ne permet pas une interprétation directe. Néanmoins, il est possible d'obtenir une représentation graphique et des calculs d'indices proportionnels à l'importance de chaque variable dans le modèle agrégé et donc de sa participation à la régression (ou la discrimination dans le cas d'une variable qualitative). Plusieurs indices sont proposés pour évaluer l'importance des variables. En particulier, l'indice « *Mean Decrease Accuracy* » évalue l'importance d'une variable explicative spécifique en permutant aléatoirement des valeurs de cette variable. Plus la qualité, estimée par l'erreur *out-of-bag*, de la prévision est dégradée par la permutation des valeurs de cette variable, plus celle-ci est importante. Les graphiques de dépendance partielle (« *partial dependence plots* ») permettent d'avoir une représentation graphique de l'influence d'une variable explicative. Ce graphique montre l'effet marginal de la variable explicative sur la prédiction de la variable à prédire. Il permet d'identifier à la fois le sens (positif ou négatif) et la forme (linéaire, non linéaire, etc.) de la relation. En d'autres termes, il traduit l'impact de la variable à différents stades des valeurs qu'elle peut prendre en moyennant l'influence de tous les autres variables explicatives.

Les forêts aléatoires ont été réalisées en utilisant la fonction « randomForest » du *package* du même nom. Dans un intérêt de parcimonie dans le nombre de variables explicatives des modèles, j'ai utilisé la méthode de sélection de variable VSURF du package VSURF (Genuer et al., 2015). Cette méthode utilise une approche itérative basée sur l'importance des variables explicatives qui sélectionne les variables selon l'objectif désiré : soit l'interprétation soit la prédiction. Le premier objectif cherche à sélectionner toutes les variables explicatives fortement reliées à la variable à expliquer (et potentiellement très corrélée entre elles). L'objectif de prédiction cherche à sélectionner un sous ensemble de variables explicatives suffisant pour bien prédire la variable à expliquer.

Par ces performances prédictives, les forêts aléatoires ont été récemment utilisées avec succès dans diverses études, par exemple, pour prédire à l'échelle nationale la granulométrie des sédiments du lit des cours d'eau en France (Snelder et al., 2011) et en Nouvelle-Zélande (Haddadchi et al., 2018) ou la qualité de l'habitat dans le réseau hydrographique pour des espèces aquatiques (Booker, 2016). Outre sa complexité d'interprétation des modèles construits, les forêts aléatoires présentent des limites quant à l'extrapolation. En effet, les forêts aléatoires « apprennent » dans l'environnement donné (celui du jeu de donnée originel) et ne sont pas capables de prédire en dehors du cadre imposé par le jeu de donnée originel, contrairement à des méthodes statistiques de type régressives.

Chapitre 3 : Compréhension et généralisation de la géométrie hydraulique stationnelle

Dans ce chapitre, mes travaux consistent à améliorer la compréhension des variations de géométrie hydraulique stationnelle. Ce chapitre comprend deux parties sous la forme de deux articles distincts. La première partie (Article 1) est consacrée à la modélisation de la géométrie hydraulique stationnelle en s'appuyant sur un grand jeu de données français de mesures de géométrie hydraulique à deux débits. La deuxième partie (Article 2) étudie la convergence des approches empiriques, numériques et théoriques pour prédire la géométrie hydraulique stationnelle et examine la généralité des relations de géométrie hydraulique en s'appuyant sur un jeu de données intercontinental.

L'article 1 a été publié dans la revue *Geomorphology*. L'article 2 a été soumis dans la revue *Water Resources Research* et a été accepté avec révision majeure. La version présentée dans ce manuscrit correspond à la version révisée prenant en compte les remarques des *reviewers*.

3.1 Synthèse Article 1

Comme évoqué dans le chapitre 1, les variations des relations de géométrie hydraulique stationnelle dépendent théoriquement de la forme du chenal et aux processus de frictions au sein du chenal qui sont eux même influencés par divers facteurs pouvant interagir à différentes échelles (par exemple, la granulométrie, la pente moyenne du cours d'eau, la ripisylve, etc.). Malgré plusieurs études analytiques (Ferguson, 1986 ; Dingman, 2007) et empiriques (par exemple, Jowett, 1998 ; Ridenour et Giardino, 1995, Nanson et al., 2010) les variations des relations de géométrie hydraulique stationnelle sont encore peu comprises. Afin d'améliorer la compréhension de ces relations, plusieurs auteurs préconisent l'étude de la géométrie hydraulique à l'échelle du tronçon et l'utilisation d'un nombre et d'une diversité de données importants (Navratil, 2005 ; Eaton, 2013).

Dans cet article, j'ai rassemblé un jeu de données unique de géométrie hydraulique stationnelle provenant de mesures hydrauliques à deux débits sur plus de 400 tronçons de cours d'eau en France (stations CARHYCE+ et ESTIMHAB). Ce jeu de données m'a donné l'opportunité d'analyser les exposants de géométrie hydraulique stationnelle b et f et à explorer les relations des exposants de géométrie hydraulique avec de nombreuses variables explicatives décrivant

les caractéristiques de bassin versant et/ou du tronçon. Les variables explicatives utilisées présentent des degrés de disponibilité variables (cf. chapitre 2 ; par exemple à l'échelle nationale, régionale, essentiellement à partir de mesures sur le terrain, etc.) et plusieurs modèles ont été réalisés selon des degrés d'extrapolation variables. Les analyses statistiques ont été faites en utilisant des régressions linéaires et des analyses discriminantes.

Les résultats des analyses montrent que l'exposant de largeur b est fortement lié à des variables décrivant la forme latérale et/ou la dynamique sédimentaire du tronçon telles que le ratio de largeur médiane estimée sur la largeur de plein bord, le style fluvial, la largeur de la bande active normalisée ou le nombre de Froude. Par exemple, les analyses montrent de fortes valeurs de l'exposant b pour des tronçons présentant des largeurs de la bande active normalisée élevées, cette variable étant un *proxy* de l'apport sédimentaire dans le tronçon (Piégay et al., 2009 ; Bertrand et Liébault, 2019). L'exposant de hauteur f est moins bien expliqué dans les analyses et présente des liens avec le nombre de Froude et des variables de rugosité.

Etonnamment, les variables SIG disponibles à l'échelle nationale et décrivant des attributs de bassins (par exemple la surface ou la géologie du bassin versant) présentent peu d'influence sur les exposants dans les analyses.

De manière générale, les résultats montrent qu'il est toutefois possible d'expliquer les variations des relations de géométrie hydraulique stationnelle des cours d'eau à partir de caractéristiques des cours d'eau que l'on peut estimer rapidement sur le terrain à partir de mesure à un seul débit ou par imagerie aérienne.

3.2 Synthèse Article 2

Conceptuellement, la géométrie hydraulique stationnelle dépend essentiellement de la forme latérale et la rugosité du chenal (Ferguson, 1986). En se basant sur Ferguson (1986), Dingman (2007) développa une expression physique pour les exposants de géométrie hydraulique stationnelle en utilisant les formules de relations hydrauliques générales (c'est-à-dire de Manning Strickler et de Chézy). L'expression de Dingman repose sur deux paramètres qui sont un paramètre de forme théorique (pour une section en travers idéalisée et jusqu'au niveau de plein bord) et un paramètre de rugosité théorique (provenant de la relation vitesse-hauteur d'eau). Récemment, Dingman et Ashfari (2017) ont testé avec succès la formulation de

Dingman (2007) sur des valeurs d'exposants de géométrie hydraulique stationnelle observées. Toutefois, cette validation a été essentiellement faite à l'échelle de la section en travers et la capacité de la formulation à prédire la valeur des exposants de géométrie hydraulique n'a pas été testée.

Précédemment, les analyses empiriques réalisées dans l'Article 1 ont montré que la géométrie hydraulique stationnelle peut être prédite en partie par des caractéristiques hydrauliques à l'échelle du tronçon provenant d'une campagne de mesures à un seul débit telles que le nombre de Froude ou le ratio de la largeur mouillée sur la largeur de plein bord.

La géométrie hydraulique stationnelle peut donc potentiellement être prédite 1) théoriquement, en utilisant la formulation de Dingman qui repose sur des paramètres estimables à partir de mesures topographiques du tronçon ; 2) empiriquement, en utilisant des variables provenant de mesures hydrauliques à un débit (nombre de Froude médian, rapport de largeur médiane sur la largeur de plein bord).

Cet article réunit les approches théorique et empirique en testant si elles expliquent de manière cohérente la géométrie hydraulique stationnelle. La cohérence des deux approches suggère un « pattern » très général de la géométrie hydraulique stationnelle. Cet article présente ainsi plusieurs objectifs : 1) identifier comment la géométrie hydraulique stationnelle est expliquée par des caractéristiques topographiques conformément à la théorie (cf. formulation de Dingman) et par des caractéristiques hydrauliques mesurés à un débit (cf. Article 1) ; 2) tester la généralité des relations entre la géométrie hydraulique stationnelle et les caractéristiques hydrauliques sur un jeu de données international.

Pour ce faire, j'ai utilisé plusieurs jeux de données indépendants provenant de France, de Nouvelle-Zélande et du Royaume-Uni (cf. chapitre 2). Ces jeux de données regroupent des données de géométrie hydraulique stationnelle à l'échelle du tronçon observées à deux débits (les stations ESTIMHAB et CARHYCE+), estimées à partir de modèles numériques calés à un seul débit (stations EVHA) ou à plusieurs débits (par exemple les stations RHYHABSIM).

Les résultats montrent que les approches théoriques et empiriques expliquent de manière cohérente les variations de exposants observés. Par exemple, b est principalement lié au descripteur de forme latérale du chenal (théorique et empirique) et au nombre de Froude médian, suggérant un effet à la fois de la forme du chenal et de la friction sur les relations largeurs-débit. L'exposant f est quant à lui moins bien expliqué mais est fortement lié au

variables empiriques et théoriques de résistance à l'écoulement. Par ailleurs, cette étude met en évidence une forte généralité des relations de géométrie hydraulique stationnelle. En effet, les relations entre les exposants, estimés numériquement ou observés sur le terrain, et le nombre de Froude montrent des similitudes entre les différents jeux de données.

Article 1

Revisiting the drivers of at-a-station hydraulic geometry in stream reaches

Revisiting the drivers of at-a-station hydraulic geometry in stream reaches

Maxime Morel^{a,*}, Vincent Tamisier^b, Hervé Pella^a, Doug J. Booker^c, Oldrich Navratil^d, Hervé Piégay^e, Frédéric Gob^b, Nicolas Lamouroux^a

^a Irstea, UR RiverLy, Centre de Lyon-Villeurbanne, Villeurbanne, France

^b Université Paris 1-Pantheon-Sorbonne, CNRS, Laboratoire de Géographie Physique, France

^c National Institute of Water and Atmospheric Research, P O Box 8602 Riccarton, Christchurch, New-Zealand

^d Université Lumière Lyon 2, Department of Geography, France

^e University of Lyon, UMR CNRS 5600 EVS Lyon, France

Abstract

Knowledge of temporal variations in river hydraulic characteristics (i.e., width, depth, velocity) across stream networks is a key element for catchment management because hydraulics influence physical habitats and biodiversity, water temperature, nutrient fluxes, sediment transport and associated ecosystem services. Reach scale at-a-station hydraulic geometry describes the variation of mean water depth and width with discharge within a stream reach. The ability to understand and predict the form of these hydraulic geometry relationships across river networks therefore represents a powerful tool for river managers. Although variations of these relationships between rivers have been widely documented, they are still largely unexplained. This study provides an analysis of a unique data set of hydraulic geometry collected in 492 stream reaches in France. Relationships between the hydraulic geometry parameters and many variables describing catchment- and reach-scale characteristics of reaches were analyzed using stepwise linear regression and discriminant analysis. Results show that width-discharge relationships across reaches are well predicted by longitudinal and lateral descriptors of reaches: the ratio of median to bankfull width, the median Froude number, the width to depth ratio, the active channel relative to the catchment area and the fluvial pattern (braided or not). Fluvial pattern, reach averaged active channel width and bankfull width can be accurately estimated using aerial imagery, making application of our models over river networks possible. Fewer relationships significantly explained depth-discharge relationships, despite a weak influence of reach Froude number, flow resistance (i.e., relative grain size,

relative bedform submergence) and width to depth ratio. Unavailable descriptors of channel resistance would probably improve these models (e.g., describing bank stability, spill and form resistance). Despite the uncertainties of hydraulic geometry relationships, this study shows that predictions of hydraulic geometry exponents across river networks are possible, offering a large range of potential applications.

Keywords: Reach hydraulic geometry; Channel form; Hydraulic variability; Catchment management

Highlights

We analyzed hydraulic geometry measured at two discharges in 492 reaches.

We predicted at-a-station hydraulic changes from aerial images, GIS and field data.

Width-discharge relationships strongly depend on longitudinal and lateral morphology.

Depth-discharge relationships are not well explained and influenced by roughness.

Our models may contribute to large scale hydrologic, habitat and sediment modeling.

1. Introduction

River hydraulics influence most patterns and processes in river networks including physical habitats, water temperature, nutrient and pollutant fluxes, sediment transport rates, biodiversity and ecosystem services (Statzner et al., 1988). Therefore, the knowledge of temporal variations in river hydraulic characteristics (e.g., wetted width, water depth, current velocity) across stream networks is a key element for catchment management. For example, estimation of hydraulic characteristics across hydrographic networks of large basins have been used for modelling river temperature (Beaufort et al., 2015), estimating habitat alteration due to water abstraction (Miguel et al., 2016), modeling nutrient fluxes (Dupas et al., 2013), modeling streambed hydraulic conductivity (Stewardson et al., 2016) or modelling sediment transport (Goodwin, 2004).

Large-scale variations in river hydraulics are often represented by hydraulic geometry relationships (Leopold and Maddock, 1953). "Downstream hydraulic geometry" describes the spatial variations of river hydraulics along river networks at a characteristic discharge (e.g.,

bankfull or mean discharge). “At-a-station hydraulic geometry” describes the temporal variations of hydraulic parameters with discharge at a given site.

Whereas most of the early works on hydraulic geometry concerned hydraulic properties of individual cross sections, several authors analyzed the hydraulic geometry of stream reaches, that is, river segments 10-20 channel widths in length and including several sequences of geomorphic units such as pools and riffles (Jowett, 1998; Lamouroux and Capra, 2002; Navratil, 2005; Stewardson, 2005; Lamouroux, 2008). For example, Booker (2010) created a method for predicting average reach width over a range of discharge across the entire New-Zealand river network using map-based information. David et al. (2010) investigated reach-scale relationships in high-gradient channels and studied relations between hydraulic geometry exponents and flow resistance descriptors on 14 channels. Reach-scale hydraulic geometry might be easier to understand and predict than cross-sectional descriptions because it smooths out complicated local, cross-sectional variations.

Reach- and cross-section-scale downstream hydraulic geometry has been studied by many authors (e.g., Eaton, 2013). However, landscape-scale patterns in at-a-station hydraulic geometry is poorly studied, likely because of large data requirements (hydraulic measurements at different discharge rates). In their simplest form, reach-scale at-a-station hydraulic geometry relationships can be fitted to power laws:

$$W = aQ^b \tag{1}$$

$$H = cQ^f \tag{2}$$

where W and H are, respectively, the reach-averaged wetted width and water depth at instantaneous discharge Q . Parameters a and c are the hydraulic geometry coefficients and b and f are the corresponding exponents. Log-transformation of variables is frequently used to linearize Eqs. (1) and (2). Average reach velocity is often included in hydraulic geometry characteristics, but is not considered here because velocity can be inferred from discharge, average depth and wetted width (Stewardson, 2005; Lamouroux, 2008). Coefficients of the at-a-station hydraulic geometry are related to reach hydraulics at a given discharge rate (i.e., they depend on the downstream hydraulic geometry of rivers), because Eqs. (1) and (2) can be rewritten as:

$$W = \bar{W} \left[\frac{Q}{\bar{Q}} \right]^b \quad (3)$$

$$H = \bar{H} \left[\frac{Q}{\bar{Q}} \right]^f \quad (4)$$

where \bar{W} and \bar{H} are, respectively, the reach-averaged wetted width and water depth at mean discharge \bar{Q} . Therefore, the exponents b and f are the key parameters of at-a-station hydraulic geometry, expected to depend on channel form and flow resistance in the reach.

At-a-station hydraulic geometry exponents vary within a known range across cross sections, typically 0.00-0.1 for b and 0.3-0.4 for f (Park, 1977). However, considerable variation in the value of the at-a-station exponents occurs between cross sections (Park, 1977) and that remains true at the reach scale (Stewardson, 2005). These variations remain largely unexplained, although they have been related (at the cross-section scale) to channel type (i.e., straight, meandering, braided), geomorphic unit (e.g., f is larger in riffles than in pools, Knighton, 1998) and bank cohesion (Ferguson, 1986; Knighton, 1998). It is noteworthy that Ashmore and Sauks (2006) observed b values greater than 1 on a braided river in Canada. Consistently, Smith et al. (1996) observed large b values of 0.51 and 0.65 and low f values of 0.20 and 0.16 in two braided rivers in Alaska, indicating that wetted width increases faster than water depth with increasing discharge in braided channels. Conversely, Nanson et al. (2010) observed average values of 0.35 for f and 0.06 for b across 19 cross sections in cohesive rivers suggesting that depth increases rapidly and width slowly with increasing discharge in streams with cohesive banks. More generally, at-a-station hydraulic geometry coefficients have been more frequently related to local cross-sectional factors than regional catchment-scale properties (Park, 1977, Ridenour, 2001).

Theoretically, variations in width should be essentially linked to channel cross-sectional shape and variations in depth should be linked to flow resistance, and partly to channel shape and channel slope (Williams, 1978; Ferguson, 1986; Ridenour and Giardino, 1995; Dingman, 2007). Channel shape itself depends on many factors such as the type of riparian vegetation (Huang and Nanson, 1997, Millar, 2000, Polvi et al., 2014), river bed and bank sediment composition (Schumm, 1963; Hey and Thorne, 1986), and sediment transport rates (Leopold and Maddock, 1953). Flow resistance takes different forms, i.e., grain, spill and form resistance. Grain resistance is linked to viscous forces and drag around the particles. Form resistance is due to the irregularities of the bed, the bank and obstacles such as boulders or log jams, while

spill resistance is linked to the accelerations and decelerations of the flow in the presence of steps/jumps (Girard et al., 2014). These different types of resistance interact and their relative contributions vary between river types (e.g., step-pool, plane bed rivers, David et al., 2010). In theory, we would expect an influence of some catchment-scale factors such as geology, land cover, catchment slope or catchment-scale alterations (e.g., flow regulation and sediment transport controls, channelization; Stewardson, 2005; Navratil and Albert, 2010). Catchment-scale factors (e.g., geology, catchment slope) would be expected to be related to catchment-wide patterns in at-a-station hydraulic geometry because they provide proxy indicators of the physical controls of channel hydraulics.

A better understanding of variations of b and f exponents would be beneficial for improving available hydraulic geometry models. In this paper, we analyze the variations in reach-scale at-a-station hydraulic geometry exponents for width and depth, using a unique data set comprising hydraulic surveys made in 492 French reaches (covering a wide range of geomorphic contexts and surveyed at two discharge rates). We relate observed exponents to several explanatory data sets with varying potential for spatial interpolation across the national hydrographic network. Explanatory variables are attributes of catchment and reach derived from combinations of nationally available GIS databases, remote sensing and/or field surveys. Multiple linear regression and discriminant analysis are used to find the best predictors of b and f exponents.

2. Methodology

2.1. Reach-scale hydraulic geometry data

Reach hydraulic measurements were collected from applications of the river statistical habitat model ESTIMHAB (n = 408 reaches; Lamouroux, 2002; based on Lamouroux and Capra, 2002; Lamouroux and Souchon, 2002; <http://www.irstea.fr/en/estimhab>) and applications of the French national tool for the characterization of the river hydromorphology CARHYCE (n = 84 reaches; Gob et al., 2014). ESTIMHAB is frequently used for estimating impact of water abstraction on availability of suitable fish habitat in stream reaches and for defining ecological flows. The model predicts availability of suitable physical habitat for different fish species within stream reaches from reach-averaged hydraulic characteristics (i.e., depth, width and bed grain size). Its application requires the measurement of reach hydraulics at two different discharge rates, as different as possible from each other, but generally remaining below the median flow Q_{50RHT} . Most ESTIMHAB applications were made by private companies. CARHYCE (Baudoin et al., 2017; http://www.onema.fr/sites/default/files/pdf/guide_technique_carhyce.pdf) is a tool designed for the implementation of the European Water Framework Directive (WFD) with respect to the geomorphic quality of rivers. It has been applied at a large number of river reaches in France. The field protocol describes river characteristics (e.g., channel geometry, riparian vegetation, bed grain size) and feeds a national database allowing the construction of hydromorphological reference models. In most cases, CARHYCE has been applied at a single discharge rate; however, some reaches (CARHYCE+ reaches) have been surveyed at two different discharges, generally below the median flow, and are considered herein. CARHYCE+ applications were made by operators of the French Agency for the Biodiversity. CARHYCE+ reaches are located across France, whereas a high proportion of the ESTIMHAB reaches are located in southeastern France (Fig. 1). In general, this dataset represents a large range of hydromorphodynamic contexts in terms of channel bed slope, stream size, catchment area, climate and geology (Fig. 1, Table 1). Overall, reaches in the study have *a priori* limited anthropic alteration of their morphology by, e.g., embankment, reshaping, dredging, perturbation of bedload transport and delivery. However, many ESTIMHAB reaches are situated below dams and have altered flow regimes.

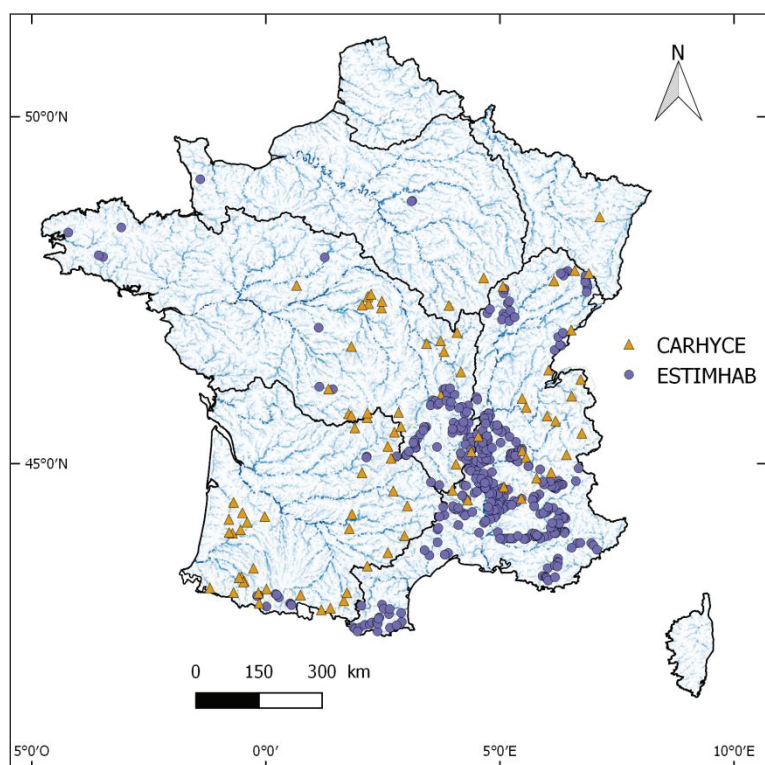


Figure 1: Location of studied reaches.

Table 1: Main characteristics of reaches (n = 492)

<i>Reach characteristics</i>	Min.	Max.	Median	Quartile 25%	Quartile 75%
<i>Catchment area CA_{RHT} (km²)</i>	3	1918	77	31	200
<i>Median daily flow Q_{50RHT} (m³.s⁻¹)</i>	0.01	18.41	0.58	0.24	1.73
<i>Stream slope S_{RHT} (‰)</i>	0.0	164.2	10.7	5.3	23.1
<i>Mean grain size D_{mean} (mm)</i>	1	760	91	45	180

Field protocols developed for CARHYCE followed those applied for ESTIMHAB. The two methods therefore shared many aspects to their methodology. With both protocols, ~15 regular cross sections (between 11 and 17 for CARHYCE, between 9 and 26 for ESTIMHAB, depending on the heterogeneity of the reach) were regularly spaced (at spacings of the average wetted width for ESTIMHAB and average bankfull width for CARHYCE) along the reach. The wetted width of cross sections was measured, and water depth and particle sizes were measured at regularly spaced points along all cross sections. Overall, each survey provided 80 to 300 observations of point water depths (mean = 110) and 9 to 26 wetted widths (mean = 16),

allowing a robust estimation of reach averaged hydraulic geometry parameters (Stewardson, 2005).

Hydraulic geometry relationships established from measurements at two distinct discharge rates (Q_{low} and Q_{high}) are subject to sampling error and to the values of survey discharge rates. To reduce uncertainties, we removed reaches with $Q_{high} < 1.5 \times Q_{low}$. Furthermore, we excluded reaches without georeferencing or with suspicious at-a-station hydraulic geometry exponent values (i.e., not between 0 and 1). We georeferenced the observed reaches and we calculated width and depth at-a-station hydraulic geometry exponents, respectively b and f , for each reach using the relations:

$$b = \frac{\log(W_{low}/W_{high})}{\log(Q_{low}/Q_{high})} \quad (5)$$

$$f = \frac{\log(H_{low}/H_{high})}{\log(Q_{low}/Q_{high})} \quad (6)$$

where W_{low} , W_{high} and H_{low} , H_{high} are respectively the reach-averaged wetted width and the mean water depth at Q_{low} and Q_{high} .

2.2. Explanatory variables of at-a-station hydraulic geometry exponents

Catchment and reach-scale variables that could influence at-a-station exponents (listed in Table 2, and see introduction) were collected from various sources, with varying degrees of availability and varying potential for spatial interpolation across the national hydrographic network. To better explore the reach- and catchment-scale drivers of hydraulic geometry, we created four hydraulic geometry datasets, differing by the number of reaches they covered, the list of explanatory variables retained, and the spatial coverage of the data (Table 2, Fig. 2). The selection of explanatory variables in each dataset depended on the availability of these variables in reaches and decisions we made to avoid variable redundancy and obtain parsimonious models.

A first data set (RHT, 492 reaches) grouped explanatory variables available for all our reaches. It included data from the national geographic information system database RHT (Réseau Hydrographique Théorique; Pella et al., 2012). The RHT includes environmental descriptors for all river reaches in France (~115,000 stream segments that are defined from upstream and downstream confluences with an average length of 2.5 km). The RHT is an oriented

hydrographic network with defined flow directions. It was created on the basis of hydrographic national reference network BD Carthage® and the 50 m digital elevation model (DEM) from the BD Alti®, both developed by IGN (the "Institut National de l'Information Géographique et Forestière"). Available environmental descriptions include those describing the hydrological regime (spatial extrapolations of a dense gauging network; Sauquet and Catalogne, 2011), topography and geology. Here, we assigned each reach to a segment of the RHT network for estimating catchment area (CA_{RHT}), reach slope (SR_{RHT}), the median flow (Q_{50RHT}), an index of geological resistance to erosion (ER_{ORHT}) and an index of geological permeability ($Perm_{RHT}$) of the upstream catchment area. Both ER_{ORHT} and $Perm_{RHT}$ were based on the proportion of 22 geological categories in the catchment area and defined as described in Snelder et al. (2008). These variables are available across the entire French hydrographic network, enabling their attribution to all our observed reaches. However, uncertainties are associated with the attributes of the RHT (Lamouroux et al., 2014).

In this dataset, we also included explanatory variables derived from field measurements of hydraulic characteristics (width W_m , depth H_m) observed at one measured discharge (Q_m). These hydraulic measurements were used to estimate hydraulic characteristics of the reach at a characteristic and thus comparable discharge between reaches, i.e., the median flow Q_{50RHT} available for each reach using:

$$W_{50} = W_m \cdot (Q_{50RHT}/Q_m)^{\tilde{b}} \quad (7)$$

$$H_{50} = H_m \cdot (Q_{50RHT}/Q_m)^{\tilde{f}} \quad (8)$$

where Q_m was chosen as the measurement discharge (Q_{low} or Q_{high}) closest to Q_{50RHT} . To make a correction independent of the reach, the parameters \tilde{b} and \tilde{f} were the mean hydraulic geometry exponents across all reaches (0.14 and 0.30, respectively). Hydraulic estimations at Q_{50RHT} allow estimation of some explanatory variables like the Froude number (Fr_{50}) and the median width to depth ratio (W_{50}/H_{50}), which are potential descriptors of the hydraulic geometry variation. Fr_{50} was calculated using:

$$Fr_{50} = Q_{50RHT} / [g^{0.5} \cdot H_{50}^{1.5} \cdot W_{50}] \quad (9)$$

where g is the acceleration due to gravity. Local point Froude number classifies flow types (as fluvial or torrential) and discriminates geomorphic units such as pools and riffles (Jowett, 1993). Consistently, reach-scale Froude number Fr_{50} is linked to the relative proportion of

riffles and pools within the reach (Lamouroux et al., 2002). We expect this variable to influence hydraulic geometry coefficients, because f is generally larger in riffles than in pools (Knighton, 1998), and because proportion of riffles will vary across the landscape. W_{50}/H_{50} describes the entrenchment of the stream reach and its ability to widen with increases in discharge. We also used median average depth estimation D_{mean} , based on the b-axis measurement of bed particles sampled at each water depth measurement point for all studied reaches (~100 measurements per reach), to calculate the average grain relative submergence D_{mean}/H_{50} , i.e., a descriptor of resistance often used in the literature (e.g., Girard et al., 2014). Importantly, involving hydraulic measurements at one discharge as explanatory variables of at-a-station hydraulic geometry exponents is not circular, because these exponents reflect hydraulic changes with discharge, not hydraulic dimensions at one specific discharge. However, models that involve explanatory variables derived from field measurements are evidently more difficult to extrapolate spatially than models that would involve GIS data alone.

A second dataset (RHONE , 119 reaches) involved data available only for some reaches of the Rhône basin (i.e., 24% of our reaches) originating from the network of geomorphic homogeneous reaches of the Rhône-Méditerranée-Corse region (Wiederkehr, 2012). This database includes several environmental indicators extracted semi-automatically for each reach from vector data included in the BD Topo® database developed by IGN. We derived from this database the normalized active channel width (W^*_{RHONE}), calculated by measuring width of the channel comprising water and unvegetated channel bars (i.e., vectors delineating water, unvegetated channel bars in BD Topo®) normalized by catchment CA_{RHT} (i.e., divided by $CA_{RHT}^{0.44}$ to reduce catchment size dependency; Piégay et al., 2009). W^*_{RHONE} denotes the contribution from the watershed in terms of sediment supply (i.e., presence of bars within the reach, Piégay et al., 2009). We also derived channel pattern ($Pattern_{RHONE}$) from an initial classification of rivers in 18 types based on several geomorphic indicators (such as the reach slope, the sinuosity and the confinement). We simplified $Pattern_{RHONE}$ by transforming it to binary 1-0 values for multi-thread channels vs. single thread channels, for model parsimony. As for the RHT dataset, we also included in the RHONE dataset hydraulic variables derived from field measurements of Fr_{50} , W_{50}/H_{50} , D_{mean} and D_{mean}/H_{50} .

A third dataset (AERIAL, 124 reaches) involved analysis of aerial images on a subset of reaches. This analysis was made on 146 selected reaches (ESTIMHAB and CARHYCE+ combined) with aerial photography of the BD Ortho® supplied by IGN. Aerial photographs

were available across the whole French territory, but usable only for a subset of the reaches without too much riparian vegetation. From the photographs, fluvial pattern ($Pattern_{AERIAL}$) based on a simplified classification of Bravard and Petit (1997) (i.e., straight, braided or meandering) was determined and the average bankfull width (W_{Qb}) was determined following the methodology applied by Valette et al. (2008) using about 15 homogeneous spaced bankfull widths for estimation. Similarly to the RHONE dataset, the qualitative explanatory variable $Pattern_{AERIAL}$ was transformed to binary 1-0 values (multi-threads channel vs. single thread channel). We also included Fr_{50} , W_{50}/H_{50} , D_{mean} and D_{mean}/H_{50} and the variables depending on bankfull width, the median to bankfull width ratio (W_{50}/W_{Qb}) and the bankfull specific stream power (ω_{AERIAL}). The bankfull specific stream power was calculated by using the relation:

$$\omega_{AERIAL} = g \cdot \rho \cdot Q_{0.1RHT} \cdot S_{RHT} / W_{Qb} \quad (10)$$

where ρ is water density and $Q_{0.1RHT}$ is discharge that occurs 1% of the time derived from the RHT (Sauquet and Catalogne, 2011). The explanatory variable W_{50}/W_{Qb} reflects the shape of the wetted cross section.

A fourth dataset (CARHYCE+, 71 reaches) used data originating from the CARHYCE+ field protocol that provides, in addition to hydraulic measurements, descriptions of channel bankfull morphology, morphological units and riparian vegetation. During CARHYCE+ applications, the bankfull geometry was identified by breaks in cross-section slope between the channel and floodplain and/or debris wash lines and/or vegetation scour area (Gob et al., 2014). Unlike the previous GIS or remote sensed variables, these variables require field surveying on one occasion, limiting their potential for spatial extrapolation of hydraulic geometries. From these field observations we derived the average bankfull width (W_{Qb}), the average bankfull width to depth ratio (W_{Qb}/H_{Qb}), the water slope measured at observed flow ($S_{CARHYCE}$) and the riparian vegetation ($Veget_{CARHYCE}$, detailed in four classes depending on structure and composition), for most CARHYCE+ reaches. The relative proportions of morphological units (pool, run or riffle) were also assessed from visual observations made at each cross section using the simplified classification of Malavoi and Souchon (2002). Following Lamouroux et al., 2002, we defined $\%Riffles_{CARHYCE}$ as (proportion of riffles + 0.5*[proportion of runs]) to indicate the proportion of riffles vs. pools within the reach. Bed longitudinal profile along the thalweg was also collected with four elevation measurements made between successive cross sections. Following the methodology of Yochum et al. (2012) we computed the detrended standard deviation of bed

elevation (σz) from the reach longitudinal profile by performing a linear regression between the bed elevation (measured along the thalweg) and longitudinal distance and by deriving the standard deviation of regression residuals. The variables Fr_{50} , W_{50}/W_{Qb} , $\omega_{CARHYCE}$ and D_{mean}/H_{50} were also estimated. The median width to depth ratio W_{50}/H_{50} was not included because of the presence of the measured variable W_{Qb}/H_{Qb} . The bankfull specific stream power $\omega_{CARHYCE}$ was computed using Eq. (10) but using slope measured on the field $S_{CARHYCE}$. Finally, we also used averaged depth at the median flow estimation H_{50} to produce the relative bedform submergence $H_{50}/\sigma z$ that is descriptor of longitudinal roughness (Yochum et al., 2012).

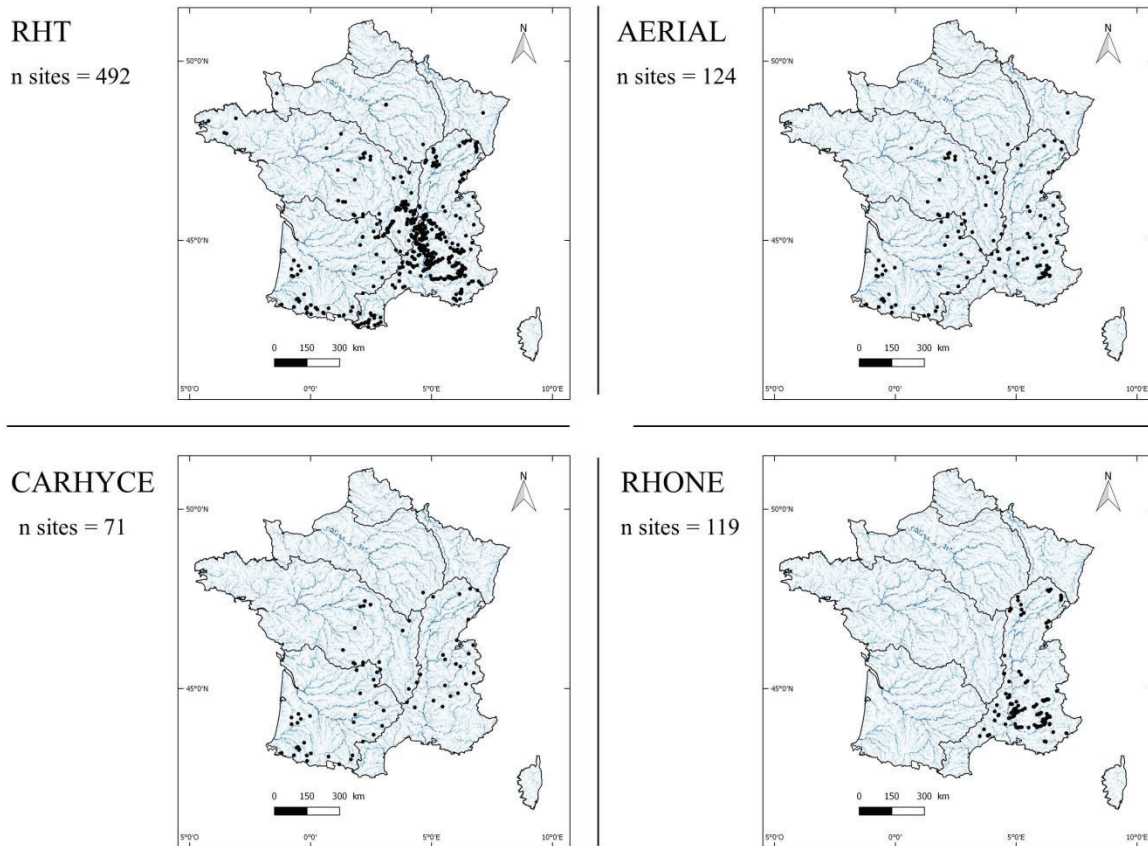


Figure 2: Map of reaches used for each of the four datasets. See Table 2 for the explanatory variables involved.

2.3. Multivariate analysis

For each data set, we used linear discriminant analysis (LDA) and stepwise multiple linear regressions (MLR) to explore which explanatory variables could account for the variation in hydraulic geometry exponents (b and f). All statistical analyses were made using the R software (R Core Team, 2017). LDA identifies combinations of explanatory variables that best

discriminate pre-defined groups. It has been used, for example, to investigate groundwater redox (Close et al., 2016) and to assess impacts of catchment disturbance on geomorphic variables for several reaches (Woodsmith and Buffington, 1996). Here, we defined four groups of b - f combinations using a "k-means" clustering method. The choice of four groups was found appropriate for a clear interpretation of results. LDA provides a graphical representation of the explanatory variables and their discriminatory power for the separation of groups. Compared with MLR, LDA can reveal non-linear relations with the explanatory variables and can be used to identify the variables associated with extreme values of the b and f exponents. For example, if a group with intermediate f values is discriminated by explanatory variables, this can reflect non-linear relationships between f and the explanatory variables (although LDA is a linear method from a mathematical point of view). We performed LDA using the “*discrimin*” function of the *ade4* package (Dray et al., 2007). Stepwise MLR was performed separately on b and f , to infer the most important predictive variables of hydraulic geometry exponents and to provide parsimonious predictive models. The Akaike information criterion (AIC), balancing model likelihood and parsimony was used for selecting variables in the stepwise MLR. For MLR, natural logarithmic and square root transformations were applied to the explanatory variables to produce distributions closer to normality.

To assess possible effects of sampling errors and anthropogenic alteration on our model performance, we tested whether model absolute residuals from the MLR were linked to the ratio of measurement discharges Q_{low}/Q_{high} and the proportion of anthropogenic land cover (e.g., artificial zones or agricultural areas) in the catchment $\%anthropogenic$. Low Q_{low}/Q_{high} ratios could increase the uncertainty of b and f estimates and increase residuals (Navratil and Albert, 2010). Residuals could increase with $\%anthropogenic$, a proxy of potential embankment, reshaping and dredging the stream. Finally, we also mapped model residuals to appreciate their spatial patterns and discuss potential unexplained sources of b and f variations.

Table 2: Summary of the studied explanatory variables and their statistical transformation for normality. Black points indicate which variables are used in the four different datasets considered.

Group/ Variables	Notations and transformations	Datasets			
		RHT (n= 492)	CARHYCE (n=71)	AERIAL (n =146)	RHONE (n= 119)
Watershed					
Watershed area (km ²)	$\text{Log}(C_{RHT})$	•	•	•	•
Erodability index of catchment substrate	Ero_{RHT}	•	•	•	•
Permeability index of catchment substrate	$Perm_{RHT}$	•	•	•	•
Energy					
Estimated channel slope (‰)	$\sqrt{(S_{RHT})}$	•		•	•
Measured channel slope (‰)	$\sqrt{(S_{CARHYCE})}$		•		
Specific stream power (W m ⁻¹)	$\text{Log}(\omega_{AERIAL})$			•	
Specific stream power (W m ⁻¹)	$\text{Log}(\omega_{CARHYCE})$		•		
Lateral channel shape					
Bankfull width-to-depth ratio (dimensionless)	$\text{Log}(W_{Ob}/H_{Ob})$		•		
Median flow wetted width to depth ratio (dimensionless)	$\text{Log}(W_{50}/H_{50})$	•		•	•
Median flow wetted width to bankfull width ratio (dimensionless)	W_{50}/W_{Ob}		•	•	
Fluvial pattern	$Pattern_{AERIAL}$			•	
Fluvial pattern	$Pattern_{RHONE}$				•
Normalized active channel width (m km ^{-0.84})	$\sqrt{(W^*_{RHONE})}$				•
Riparian vegetation classification	$Veget_{CARHYCE}$		•		
Longitudinal channel shape					
Median Froude number (dimensionless)	$\text{Log}(Fr_{50})$	•	•	•	•
Proportion of riffles vs pools in the reach (%)	$\%_{riffle_{CARHYCE}}$		•		
Roughness					
Mean substrate size (m)	$\text{Log}(D_{mean})$	•	•	•	•
Relative roughness at the median flow (dimensionless)	$\text{Log}(D_{mean}/H_{50})$	•	•	•	•
Detrended standard deviation of bed elevation (m)	$\text{Log}(\sigma_{CARHYCE})$		•		•
Relative bedform submergence at the median flow (dimensionless)	$\text{Log}(H_{50}/\sigma_{CARHYCE})$		•		•

3. Results

3.1. Linear discriminant analysis (LDA)

Four groups of b - f exponent values were partitioned using k-means clustering (Fig. 3). Groups 3, 2 and 4 correspond respectively to low, intermediate and high values of f . Variation of b is presented by the discrimination of Group 1 (high values). Examples of reaches of each group are shown in Fig. 6.

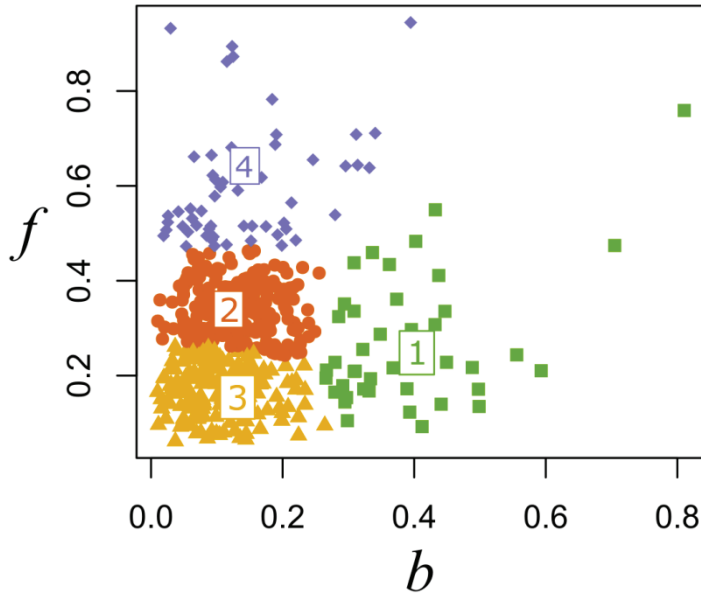


Figure 3: Four groups of reaches used in LDA analyses, based on their b - f values.

The LDA results on RHT dataset are not shown in figures because they provided a weaker discrimination than other LDAs. The first discriminant axis (LDA1) and the second discriminant axis (LDA2) accounted for 20% and 5% of the total inertia, respectively. LDA1 was characterized by a weak separation between Group 1 (i.e., high b exponent values) and the other three groups. The most important variables for LDA1 were Fr_{50} and W_{50}/H_{50} (negatively correlated). LDA2 was characterized by a weak discrimination.

The LDA of RHONE dataset (also not shown in figures) had a slightly higher discriminant power. LDA1 and LDA2 accounted for 30% and 11% of the total inertia, respectively. Again, LDA1 was characterized by a separation of Group 1 (high b exponent values) from the three other groups (low values of b). The variables $Pattern_{RHONE}$, W^*_{RHONE} , Fr_{50} and W_{50}/H_{50} (positively correlated) were the variables most contributing to this axis. LDA2 was characterized by a separation of Group 4 (high values of f exponent) from the other groups. By

contrast, Group 3 and 2 (low and intermediate values, respectively) were not well separated. The variables most contributing to LDA2 were D_{mean}/H_{50} and D_{mean} (negatively correlated).

By contrast, the LDA of the AERIAL dataset separated the different groups relatively well. LDA1 and LDA2 accounted for 45% and 30% of the total inertia, respectively. As with the previous datasets, LDA1 was characterized by a clear discrimination between Group 1 (i.e., high b exponent values) and the other groups (Fig. 4). The most important variables for LDA1 were Fr_{50} , $Pattern_{AERIAL}$ (both positively correlated) and W_{50}/W_{Qb} (negatively correlated). Moreover, LDA2 was characterized by a separation between Groups 2 and 3 and Groups 1 and 4. The most important variables for the LDA2 are $Pattern_{AERIAL}$, W_{50}/H_{50} (negatively correlated) and W_{50}/W_{Qb} (positively correlated).

For the CARHYCE dataset, the first discriminant axis (LDA1) and the second discriminant axis (LDA2) accounted for 59% and 26% of the total inertia, respectively (Fig. 5). LDA1 was characterized by a separation of the 4, 2, 1 and 3, which represent variation of exponent f values (high, intermediate and low f values groups, respectively). The most important variables for the LDA1 are Fr_{50} , $H_{50}/\sigma_{ZCARHYCE}$ (negatively correlated) and $\sigma_{ZCARHYCE}$ (positively correlated). Although only one site from group 1 remained in this analysis, LDA2 clearly indicated that this site was totally discriminated from all others. Its high b value was associated with high D_{mean} and W_{Qb}/H_{Qb} and low W_{50}/W_{Qb} and $Veget_{CARHYCE}$.

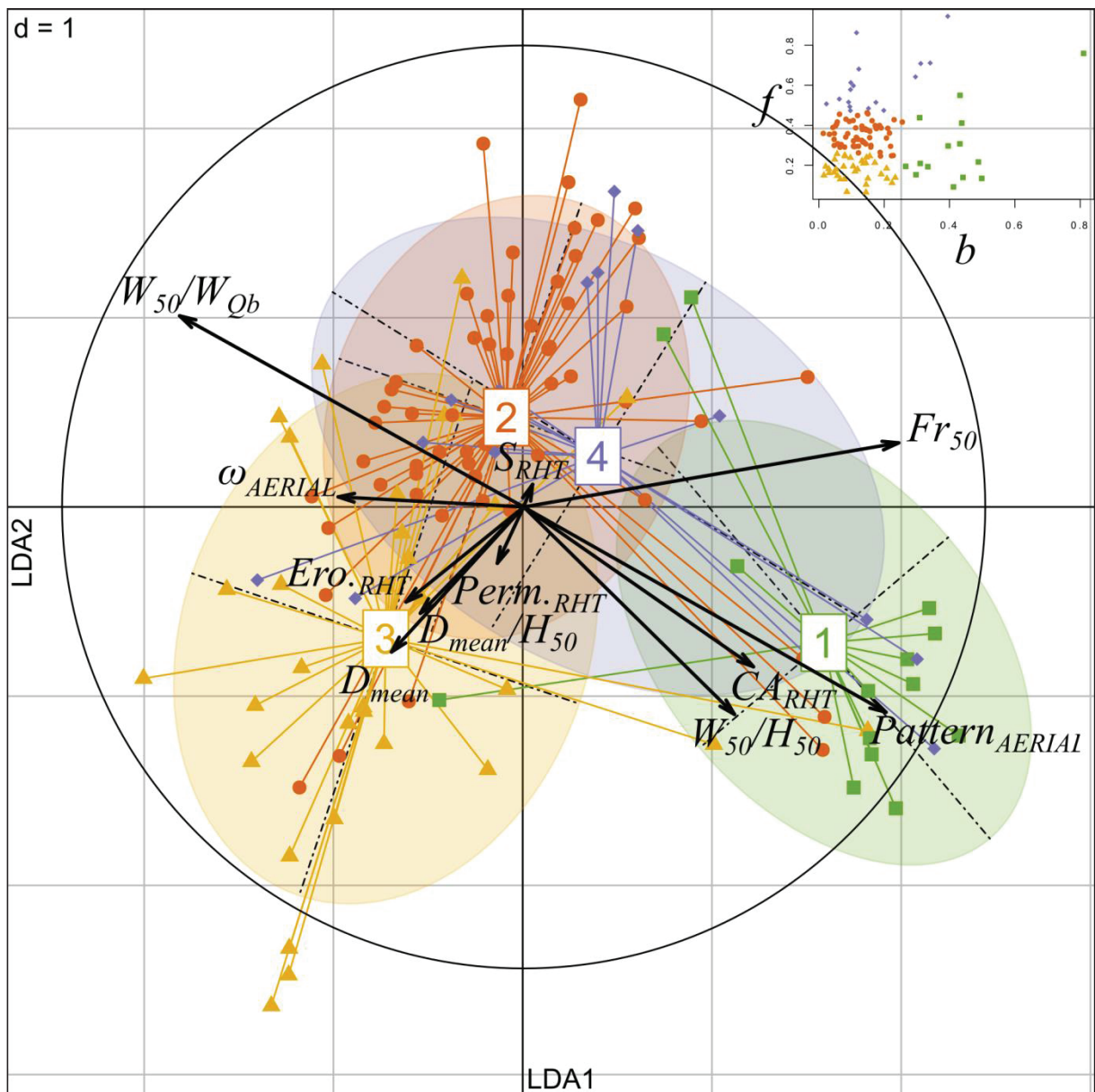


Figure 4: Factorial map for the LDA on the AERIAL dataset. Black arrows show the main correlations between axes and explanatory variables. Variable codes are from Table 2.

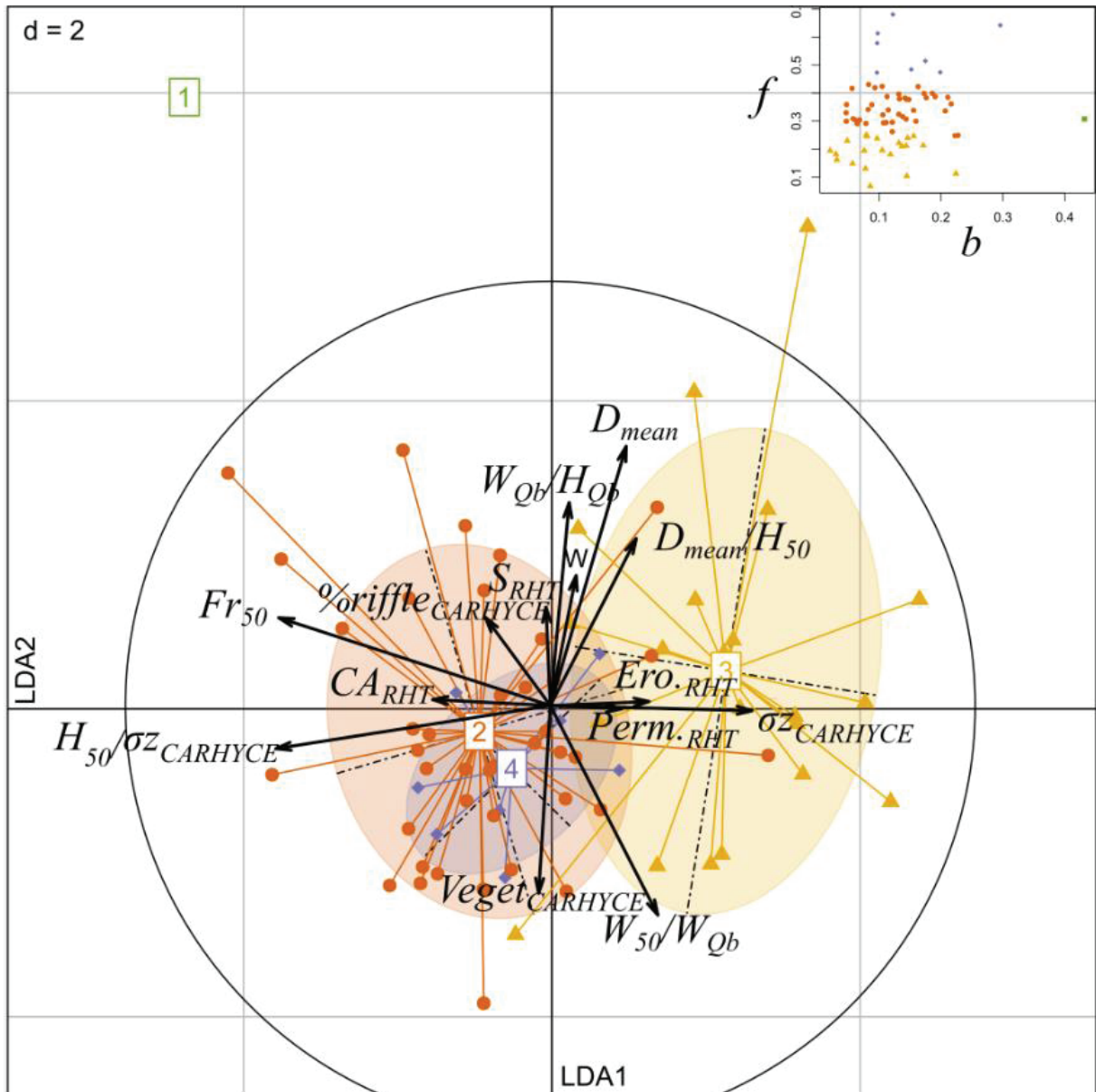


Figure 5: Factorial map for the LDA on the CARHYCE dataset. Black arrows show the main correlations between axes and explanatory variables. Variable codes are from Table 2.



Figure 6: Examples of reaches observed in the AERIAL dataset. (a) Asse River (Group 1, $b = 0.67$; $f = 0.26$). (b) Gave de Caunterets (Group 3, $b = 0.07$; $f = 0.24$). (c) Gartempe River (Group 2, $b = 0.05$; $f = 0.41$). (d) Chauranne River (Group 4, $b = 0.24$; $f = 0.65$).

3.2. Stepwise multiple linear regression

Multiple regressions confirmed the consistency of results in the different data sets, and the strong influence of longitudinal and lateral channel shape on width exponent b (Table 3). Consistently with LDA results, the depth exponent f was also less explained, but weak relationships were identified with channel roughness and longitudinal channel shape descriptors (Table 3, and examples of fit on Fig. 7). Specifically, high b values were generally associated to wide active channels characterized by high Fr_{50} values, multithread reaches, large W^*_{RHONE} and low W_{50}/W_{Qb} . Strong relationships between the depth exponent, f and the various explanatory variables were not fitted. However, Fr_{50} was a good predictor of f (with a positive effect), although this relationship was weaker than for b . In addition, W_{50}/H_{50} , D_{mean} and $\%Riffle_{CARHYCE}$ explained partially the variation of f , with high f values for high W_{50}/H_{50} and $\%Riffle_{CARHYCE}$ and low D_{mean} .

The analyses of the absolute residuals of the stepwise multiple regression models indicated that f residuals can occur for high ratios of Q_{low}/Q_{high} (i.e., close values of measurement discharges) for a part of the sites, particularly when Q_{high} was below $2.5Q_{low}$ (Fig. 8). By contrast, residuals were not clearly linked to $\%anthropogenic$ (Fig. 8). Concerning b residuals, no specific trend was observed for both variables (Fig. 8). These analyses suggest that the f exponent is potentially sensitive to the difference between the two measurement discharges. Finally, residuals mapping revealed spatial patterns, notably with high values of f residuals in southeastern France where many braided rivers occur (Fig. 9). Regions with high f absolute residuals usually also have high b absolute residuals. The main exception is located in the west side of the southern part of the Rhône-Mediterranean region (Cévennes) where f is high but b is low.

Table 3: Stepwise multiple regression models obtained for the different datasets and their associated statistics. Explanatory variables in equations are ordered to the most to the least significant.

Dataset	Equation	Determination coefficient R^2	p-Value	F-statistic	RMSE
RHT n=492	$\ln(b) = -2.569 + 0.377*\ln(Fr_{50}) + 0.076*\sqrt{SRHT} + 0.148*\ln(W_{50}/H_{50}) + 0.067*\ln(CARHT)$ $\ln(f) = -0.937 + 0.197*\ln(Fr_{50}) - 0.061*\ln(D_{mean}/H_{50}) - 0.063*Perm.RHT$	0.25 0.08	<0.001 <0.001	40.84 14.68	0.579 0.477
RHONE n=119	$\ln(b) = -2.471 + 0.406*\ln(Fr_{50}) + 0.165*\sqrt{W^*_{RHONE}} + 0.321*Pattern_{RHONE} + 0.213*\ln(W_{50}/H_{50})$ $\ln(f) = -1.090 + 0.150*\sqrt{W^*_{RHONE}} - 0.07*\ln(CARHT)$	0.42 0.05	<0.001 0.035	27.84 3.449	0.596 0.529
AERIAL n=124	$\ln(b) = -0.821 - 1.179*W_{50}/W_{Qb} + 0.379*\ln(Fr_{50})$ $\ln(f) = -1.214 + 0.349*\ln(Fr_{50}) - 0.113*\ln(D_{mean}) + 0.584*W_{50}/W_{Qb} + 0.100*\sqrt{SRHT} - 0.077*Ero.RHT$	0.52 0.25	<0.001 <0.001	65.9 8.18	0.508 0.433
CARHYCE n=71	$\ln(b) = -2.164 + 0.379*\ln(Fr_{50}) - 1.298*W_{50}/W_{Qb} - 0.189*\ln(D_{mean}/H_{50}) + 0.142*Ero.RHT + 0.710*\ln(D_{mean}) + 0.220*\ln(W_{Qb}/H_{Qb}) + 0.063*\sqrt{SRHT}$ $\ln(f) = -1.077 + 0.444*\ln(H_{50}/\sigma_{CARHYCE}) + 0.258*\ln(Fr_{50}) - 0.065*\ln(D_{mean}/H_{50}) + 0.005*\%Riffle_{CARHYCE} + 0.202*\ln(\sigma_{CARHYCE})$	0.50 0.39	<0.001 <0.001	11.31 8.3	0.359 0.312

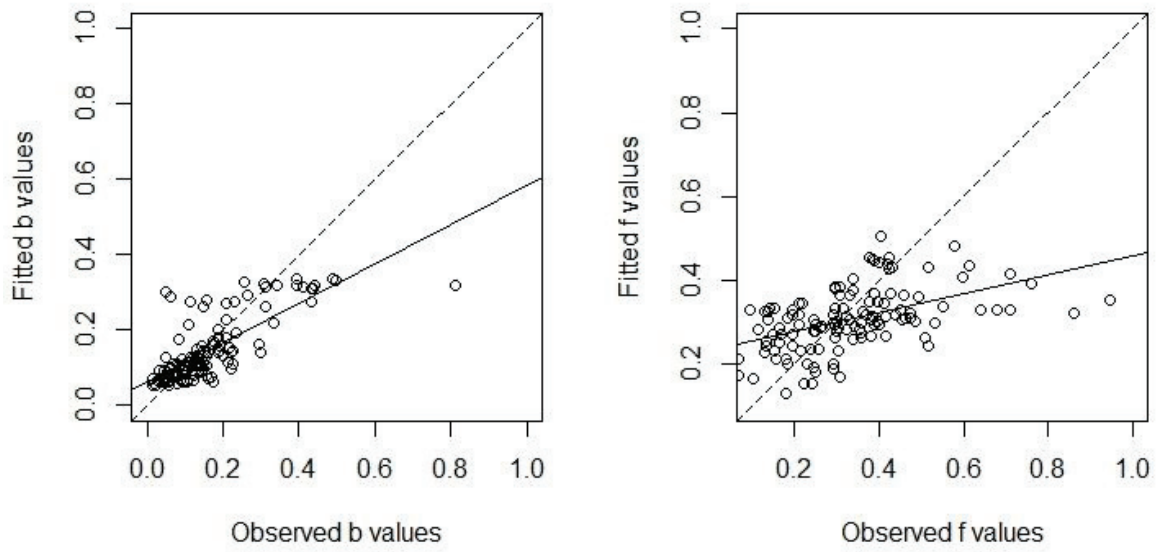


Figure 7: Fitted (MLR) vs observed values of the exponents for the AERIAL dataset. Dashed lines represent perfect agreement.

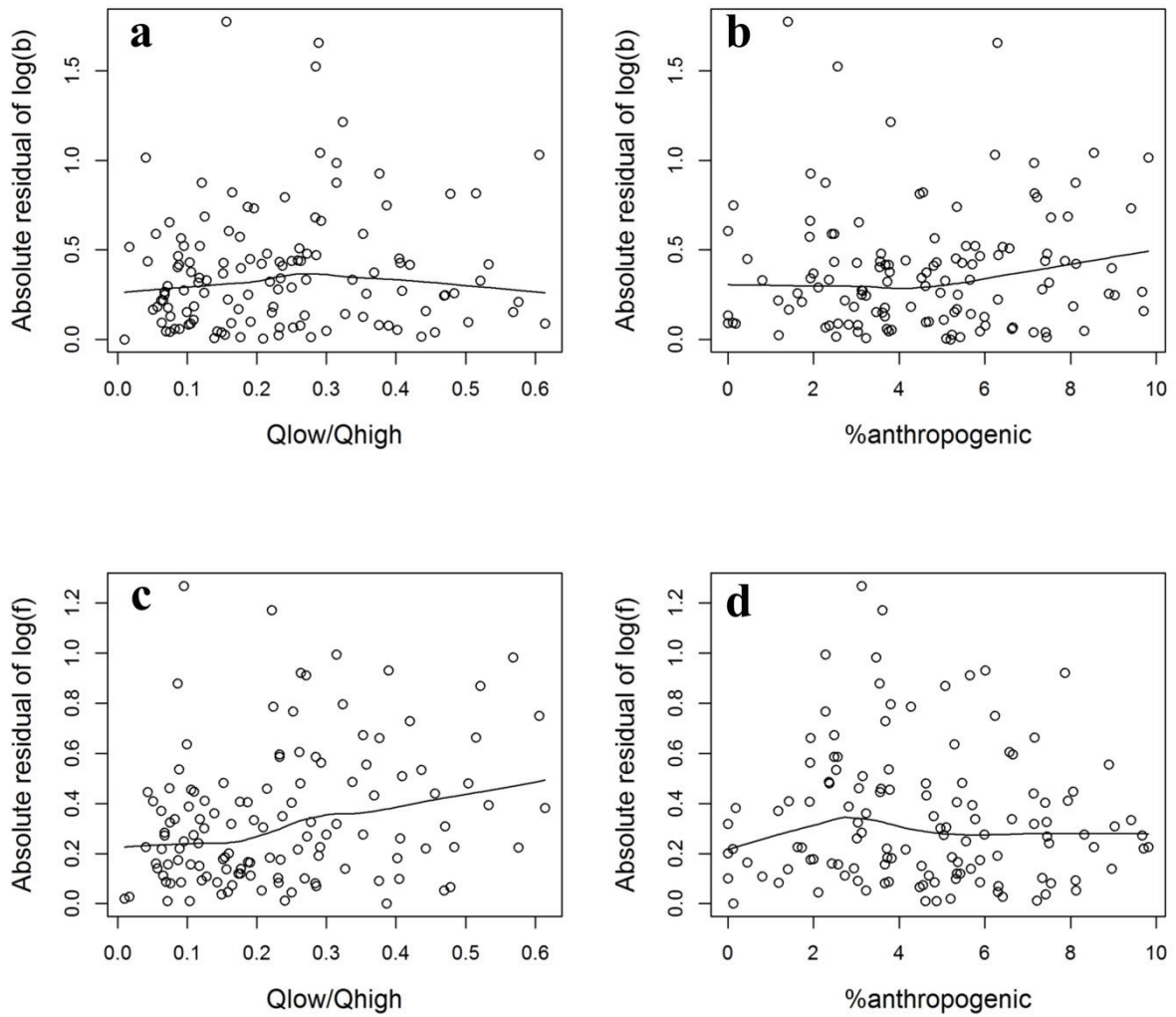


Figure 8: Examples (AERIAL dataset) of bivariate relationships between the absolute residuals of the regressions of AERIAL dataset and the variables Q_{low}/Q_{high} and $\%anthropogenic$ (respectively a,b for the b exponent and c,d for the f exponent). Black lines show LOWESS smoothers (Cleveland, 1981).

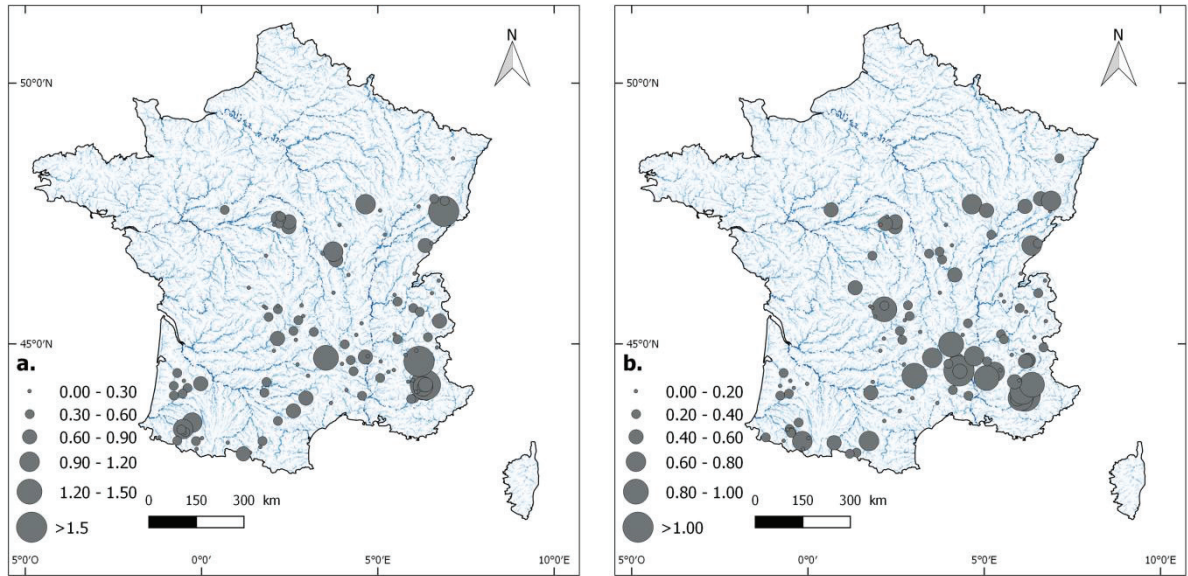


Figure 9: Example (AERIAL dataset) of maps of the absolute residuals of MLR regressions, for b (a) and f (b)

4. Discussion

In this study, we analyzed width and depth at-a-station hydraulic geometry exponents from 492 stream reaches across the French hydrological network. The estimated b - f exponents show similar range as in other reach-scale hydraulic geometry studies (Table 4).

Table 4: Mean values of b and f estimated from measurements at different discharges observed in the literature.

b	f	Source
0.14	0.30	492 reaches across France, this study
0.18	0.31	73 reaches across New-Zealand, Jowett (1998)
0.13	-	58 reaches across France, Lamouroux and Capra (2002)
0.11	0.28	17 reaches in Australia, Stewardson (2005)
0.06	0.35	19 reaches with cohesive banks in Australia, Nanson et al. (2010)
1.05	-	1 braided reach in Canada, Ashmore and Sauks (2006)
0.10	0.31	17 reaches across France, Navratil and Albert (2010)

Our results show that width exponent b is well explained by the Froude number Fr_{50} , the median to bankfull width W_{50}/W_{Qb} , the normalized active width W^*_{RHONE} and the channel pattern ($Pattern_{AERIAL}$ and $Pattern_{RHONE}$). More specifically, LDA and MLR results suggest that multithread reaches with high Froude number values, large active channel and low median to bankfull width ratio explain high values of b . In such river reaches, the wetted width is not constrained by steep banks, and therefore increases rapidly with discharge. Multivariate analyses suggest that we did not clearly identify the important predictors of f . It is possible that the high heterogeneity of water depth in the observed reaches explains the weak change of the mean depth with discharge. However, LDA and LMR results suggest that reaches with large grain size, high longitudinal bedform variability and low Froude number have low values of f . It seems there is a regional organization of f and b with high absolute residuals of both b and f located on some upper sections of hydrographic districts.

4.1. Lateral morphology

Our results show that the median width to bankfull width ratio (W_{50}/W_{Qb}) is an important variable for explaining b . Low values of W_{50}/W_{Qb} refer theoretically to dynamic reaches

presenting high capacity of widening with increasing discharge. Consistently, the normalized active channel width (W^*_{RHONE}) is strongly related to b . W^*_{RHONE} reflects the contribution of the river catchment in terms of sediment load (Piégay et al., 2009). The active channel width includes wetted channel and unvegetated sediment bars, and results in a relatively low bedload transport compared to bedload delivery. W^*_{RHONE} is comparable to W_{50}/W_{Qb} : large active channel width for a given catchment size reflects a greater capacity of wetted width to widen with increasing discharge (submersion of in-channel benches or secondary channel overflowing).

Our results also show that braided reaches ($Pattern_{AERIAL}$ and $Pattern_{RHONE}$) present generally high values of the b exponent. Braided rivers are characterized by significant bedload delivery compared to transport capacity, by the presence of low flow channels actively eroding banks and shifting, and gravel bars well-connected within the flow channels (Piégay et al., 2009). Ferguson (1986) underlined that braided rivers have generally higher width exponent values than other fluvial styles. In addition, high b values (close to 1) have been previously observed by Ashmore and Sauks (2006) in a braided reach in Canada. Smith et al. (1996) also observed b values of 0.51 and 0.65 in two rivers in Alaska (Table 4). These high values show that for these types of rivers, increasing discharge produces a significant increase of wetted width.

The exponent b is also quite variable amongst the studied braided reaches. As suggested by Ashmore and Sauks (2006), b estimation in braided reaches can be very uncertain and sensitive to the range of measurement discharges, because hydraulic geometry in braided rivers does not necessarily follow conventional power laws. Indeed, the rewetting of multiple channels when flow increases can generate important breaks in the hydraulic geometry relationships. Variability of b also may be due to the occurrence of different “types” of braided rivers, which themselves depend on the overall sediment delivery within the catchment (Piégay et al., 2009): b is probably higher in reaches with abundant bedload delivery compared to transport capacity. Such braided rivers are usually aggrading with a fairly high W^* and a low BRI (Bed Relief Index, Liébault et al., 2013). Inversely when bedload delivery is small compared to transport capacity, braided rivers usually undergo channel incision, with gravel bars being less connected to the flow channels, W^* being low and BRI high. We expect b evolves like BRI, where it is very high when the channel is well-supplied and bars are very well-connected and low when the channel is progressively starved by sediment. Therefore, more precise descriptions of the different fluvial patterns related to different transport/supply limitations of sediment could

improve our models. No significant links between the fluvial pattern and exponent f have been observed in our analyses. However, mapping residuals of f showed a spatial structure with high values in southeastern France characterized by occurrence of many braided rivers. Further examination is required to understand these spatial trends.

The b exponent was also partly explained by the aspect ratio (i.e., median and bankfull width-to-depth ratio W_{50}/H_{50} and W_{Qb}/H_{Qb}). Theoretically, however, these lateral channel shape descriptors (W_{50}/W_{Qb} , W^*_{RHONE} , W_{50}/H_{50} , $Pattern_{AERIAL}$ and $Pattern_{RHONE}$) were expected to have an influence on the depth exponent f (Knighton, 1998). Reaches with low W_{50}/W_{Qb} and high W^*_{RHONE} should correspond to channel form where water depth should increase slowly (low f) and wetted width rapidly (high b). Here, we only detected a weak relationship between f and W_{50}/H_{50} , a variable often used as a descriptor of bank stability. These results are consistent with the findings of Nanson et al. (2010) who studied hydraulic geometry relationships of 19 cross sections in narrow and deep channels in peatland. They found high values for the f exponent in these channels characterized by low width to depth ratios, cohesive and high vegetated banks. On the other hand, very low values of b have been observed in these channels. Ridenour and Giardino (1994), by analyzing 166 cross sections classified depending on bank strength, also observed relationships between bank strength and hydraulic geometry exponent's values. Surprisingly, no significant relationships have been identified in our study between the riparian vegetation descriptor ($Veget_{CARHYCE}$) and the hydraulic geometry exponents. This was probably due to the wide range of geographical contexts explored with complex interactions between riparian vegetation and the channel shape depending on the bank composition, stream gradient and stream size (Millar, 2000). Developing a more detailed descriptor of bank strength (i.e., bank composition, slope, riparian vegetation density) and taking account the possible interactions between these variables could improve our models.

The empirical effect of lateral morphology on at-a-station exponents observed in our study is consistent with analytical approaches of hydraulic geometry patterns. In particular, parameters describing the cross-section shape and the bankfull geometry should theoretically influence hydraulic geometry exponents (Dingman, 2007). This consistency supports further developments of analytical approaches, although they do not always reflect observed hydraulic geometry at cross sections. However, analytical approaches are even more challenging at the reach scale than at the cross-section scale (and are out of the scope of this paper). In particular,

reach scale approaches would require debatable hypotheses on the longitudinal morphology and longitudinal variations in cross-section shape and resistance patterns.

4.2. Longitudinal morphology

The reach Froude number at the median flow (Fr_{50}) was the explanatory variable with the strongest relationship with b and (to a lesser extent) f . Riffle proportion ($\%Riffle_{CARHYCE}$) within the reach was also positively related to b and f . Both variables describe the longitudinal morphology of the reach (Girard, 2013) because the Froude number increases with the proportion of riffles vs. pools within the reach (Jowett, 1993). Our findings that b and f increase with Fr_{50} are consistent with the comments of Knighton (1998), who indicated that wetted width and water depth variations are greater in riffles than in pools with increasing discharge. Under high flow conditions, depth and width increase in riffles while velocities increase in pools, tending to uniformize the different habitat types observable at low flows.

4.3. Roughness descriptors

Weak relationships have been observed between the hydraulic geometry exponents, especially f , and the roughness descriptors D_{mean} , D_{mean}/H_{50} , $\sigma_{Z_{CARHYCE}}$ and $H_{50}/\sigma_{Z_{CARHYCE}}$. Ridenour and Giardino (1995) and David et al. (2010) have already studied relationships between grain size and hydraulic geometry exponents in 41 cross sections and 19 high gradient streams reaches, respectively. These studies did not reveal significant relationships between these variables and suggested that the use of bed material size for assessing flow resistance is not relevant, especially in streams with large bedforms and in high gradient streams where spill and form resistance contribute the most to total flow resistance. For this purpose, we also included standard deviation of bed elevation and relative bedform submergence in our study. Both variables are accurate predictors of flow resistance in streams where bedform is the primary source of resistance (Aberle and Smart, 2003; Yochum et al., 2012). Our results showed that with an increase of mean grain size, relative grain size and standard deviation of bed elevation, the depth exponent tends to decrease. Surprisingly, these results suggest that high flow resistance induces lower depth variation with discharge. It is possible that high resistance increases at-a-station coefficients rather than exponents (i.e., increase water depth at low flow but not its rate of change). Another possible explanation is that reaches with high sediment size are generally characterized by high width-to-depth ratios as a result of important bedload and aggradation (Schumm, 1963). In these cases of rivers, the channel tends to widen inducing low

changes of water depth with discharge. There is also a potential interaction between river type (e.g., reaches dominated by form or grain resistance) and the key roughness descriptors. Overall, the influence of roughness on hydraulic geometry is weaker than we expected and our results suggest investigating other descriptions of channel roughness, especially to better describe spill and form resistance. For example, David et al. (2010) used the roughness area and instream wood volume for describing both grain and form resistances. Girard et al. (2014) described spill resistance by measuring total height of large drops relative to reach length. More accurate pebble size estimates are also warranted for a better description of grain roughness within the channel and for producing statistic descriptors (i.e., grain sorting, 50th and 84th percentile of the cumulative grain size distribution). All these parameters are candidate variables for improving our models.

4.4. Catchment attributes

Both hydraulic geometry exponents did not exhibit relationships with catchment attributes available in this study such as catchment size, geology and land cover. These results are consistent with suggestions from some hydraulic geometry studies (e.g., Stewardson, 2005) that at-a-station hydraulic geometry exponents are more dependent on local features at the reach or facies scale than catchment attributes. It is also possible that our catchment variables are weakly related to the overall sediment load, whose influence on hydraulic geometry is expected and should be better tested.

4.5. Limitations of the study

Cross-sectional hydraulic geometry is particularly sensitive to uncertainties due to several factors (e.g., cross-section location, sampling errors; Navratil and Albert, 2010; Gonzalez and Pasternack, 2015). The use of reach averaged hydraulic geometry ensures the elimination of effects of individual cross-section locations and smooths possible sampling errors. Stewardson (2005) recommended measuring more than ten cross sections in homogeneous reaches to limit such uncertainties. These recommendations have been met for all our CARHYCE reaches and most of the ESTIMHAB reaches. Nevertheless, some ESTIMHAB reaches (N= 28) do not have any information about the sampling details (i.e., number of transects). Moreover, at-a-station hydraulic geometry developed at only two discharges is particularly sensitive to uncertainties (Navratil and Albert, 2010), especially in braided reaches as discussed above. We attempted to reduce these uncertainties by retaining only reaches with contrasted flows surveyed in our

study. However, part of the unexplained variability of the hydraulic geometry exponents of our studied reaches can be attributed to these uncertainties, as illustrated by the relationships between our model residuals and the ratio between the two measurement discharges.

Another limit of our models is that at-a-station hydraulic geometry relationships are not static and do change over time due to river perturbations (Phillips, 1990, 1991). Temporal changes may be reduced at the reach- compared to the cross-section scale, but they are particularly expected in dynamic contexts such as those of braided rivers and/or just after extreme floods. Although challenging, incorporating more detailed hydrological data as explanatory variables of hydraulic geometry would better account for these dynamics.

Our explanatory variables also have their own uncertainty, as already quantified for some of the GIS-based variables we used (i.e., Q_{50RHT} and Q_{01RHT} ; Lamouroux et al, 2014). Furthermore, the segments of the RHT and RHONE databases represent several kilometers of river length while the studied reaches generally do not exceed more than three hundred meters. This mismatch between the spatial scale of the response and predictor variables could represent a source of uncertainty in the model fitting.

5. Conclusion

Despite their limitations, models in Table 3 provide refined estimates of at-a-station hydraulic geometry exponents and should improve the estimation of hydraulic characteristics in hydrographic networks. Because our models were built using a wide range of stream types, they have the potential to be tested/applied internationally. These models could be used to update a wide range of environmental applications. For example, improved hydraulic geometry models can be used to better estimate stream discharges from remotely sensed data (Bjerklie et al., 2003; Smith and Pavelsky, 2008). Lamouroux et al. (2017) also identified hydraulic geometry as key information for integrating hydraulic information in environmental flow studies at large scales, by translating hydrological alterations into hydraulic alterations and subsequently habitat alterations for aquatic communities. Such catchment-scale applications may be increasingly useful with ongoing climatic changes.

Acknowledgements

Many thanks to the staff from the French Agency for Biodiversity (AFB, ex-ONEMA) for supplying database of CARHYCE surveys. Thanks also to the Water Agency Rhône-

Méditerranée-Corse and the many catchment stakeholders who contributed to gather ESTIMHAB raw data. Laurent Valette is also thanked for his comments and explanation about the SYRAH-CE database. We are grateful to Jonathan D. Phillips for his useful comments on the manuscript.

Article 2

Consistent theoretical and empirical approaches of at-a-station hydraulic geometry exponents in stream reaches

Consistent theoretical and empirical approaches of at-a-station hydraulic geometry exponents in stream reaches

Maxime Morel¹, Doug J. Booker², Frédéric Gob³, and Nicolas Lamouroux¹

¹ INRAE, UR RiverLy, Villeurbanne, France

² National Institute of Water and Atmospheric Research, Christchurch, New-Zealand

³ Université Paris 1-Panthéon-Sorbonne, CNRS, Laboratoire de Géographie Physique, Meudon, France

Abstract

Reach-scale at-a-station hydraulic geometry (AHG) relationships are power laws that describe variations of reach-averaged water depth, wetted width and current velocity in stream reaches when discharge varies. Modeling AHG exponents is important, because the variations of hydraulics with discharge in stream networks influence physical habitats of aquatic species, biodiversity, water temperature, nutrient fluxes and sediment transport. Theoretical approaches indicated that AHG exponents should depend on topographic descriptors of cross-sections and roughness elements. Empirical approaches suggested that AHG exponents partly depend on hydraulic characteristics measured at a single discharge. We used a unique data set of AHG observed in 812 stream reaches (obtained from measurements at several discharge rates or from hydrodynamic models) to (1) test the consistency of theoretical and empirical predictions of AHG exponents, and (2) test the generality of AHG predictions across rivers of different countries with variable landscape settings. We found that observed AHG depended on topographic predictors (describing cross-section shape and substrate size) as expected from theory. However, AHG exponents were better predicted by empirical hydraulic characteristics of reaches: the ratio of wetted width to bankfull width and the reach Froude number. The effects of hydraulic variables were consistent with those of topographic predictors. In addition, relations between AHG and hydraulic predictors were significant and with similar direction in different data sets. Despite limited explanatory power, our results help identifying general drivers of AHG exponents. Their application still requires measurements at a single discharge rate, but open perspectives of AHG prediction by remote sensing.

Key Points

At-a-station hydraulic geometry of stream reaches governs habitats, sediment, nutrient and pollutant fluxes in river catchments.

With data from 812 reaches, we show that hydraulic geometry exponents are consistently predicted by empirical and theoretical approaches.

Intercontinental similarities suggest that global hydraulic translations of flow discharges in hydrographic networks can be improved.

1. Introduction

River hydraulics influence most patterns and processes in river networks including physical habitats, biodiversity and ecosystem services (Statzner et al., 1988), nutrient and pollutant fluxes (Seo and Cheong, 1998) or water temperature (Schmadel et al., 2015). For example, the hydraulic characteristics of streams govern the impacts of flow alteration on most aquatic habitat groups including fishes (Malcolm et al., 2012), invertebrates (Dolédec et al., 2007), macrophytes (Riis and Biggs, 2003) and periphyton (Hoyle et al., 2017).

More generally, the knowledge of temporal variations in river hydraulic characteristics (e.g., wetted width, water depth and velocity) across stream networks is a key element for catchment management (Maddock, 1999). For example, hydraulic estimations across catchments have been used for quantifying habitat alteration due to discharge alteration at national or regional scales (Snelder et al., 2011; Miguel et al., 2016). Damiani et al. (2019) used hydraulic estimations across the French network, in the context of “life cycle assessment” approaches, to quantify the ecological impacts of water consumption; they showed that habitats are more sensitive to water abstraction in small streams than in large ones. Hydraulic variations in catchments were also estimated to study water temperature in a large catchment (Beaufort et al., 2016), nutrients fluxes in France (Dupas et al., 2013), sediment transport in an Australian catchment (Russell et al., 2018), pollutant fluxes in an Italian catchment (Whelan et al., 1999), streambed hydraulic conductivity in French stream network (Stewardson et al., 2016), flood risk in an Australian catchment (Grimaldi et al., 2018) or pathogens fluxes at the global scale (Vermeulen et al., 2019).

Large-scale variations in river hydraulics are often represented by hydraulic geometry relationships (Leopold and Maddock, 1953). “Downstream hydraulic geometry” describes how wetted width, water depth and current velocity change in space, along or between rivers, at a characteristic reference flow such as the mean flow. “At-a-station hydraulic geometry” (AHG) describes how hydraulic characteristics change with discharge rate, over time, at a given location. Hydraulic geometry has traditionally been studied at the cross-section scale, due to

available data at gauging stations. However, many authors (Jowett, 1998; Lamouroux and Capra, 2002; Navratil and Albert, 2010; Stewardson, 2005) have studied hydraulic geometry at the larger scale of stream reaches, defined as river segments long enough (> 10 - 20 channel widths) to include short-scale variability of natural river morphology (e.g. pools and riffles sequences). Reach-scale hydraulic geometry may be easier to understand and to predict because it smooths out complicated local, cross-sectional variations and turbulent fluctuations (Stewardson, 2005). In addition, the reach-scale is relevant for many applications. For example, habitat suitability modeling for aquatic organisms is generally applied at the reach-scale, because this scale relates to home ranges of these organisms (Wolter et al., 2016). Similarly, studies of nutrient fluxes generally need reach-scale hydraulic estimates (Dupas et al., 2013).

Although downstream hydraulic geometry has been extensively studied (Eaton, 2013; Gleason, 2015), variations in AHG across landscapes remain less studied likely due to large data requirements (hydraulic measurements made at different discharge rates). Reach- and cross-section scale AHG relationships are generally represented using the well-known power laws between discharge and hydraulic characteristics (Leopold and Maddock, 1953):

$$W = aQ^b \quad (1)$$

$$H = cQ^f \quad (2)$$

$$V = kQ^m \quad (3)$$

where W is mean wetted width, H is mean water depth and V is mean velocity at instantaneous discharge Q in a reach. Parameters a , c , k are the coefficients and b , f and m are the exponents. Log-transformation of variables is frequently used to linearize equations (1-3). Velocity (Eq. 3) is not considered directly here because velocity can be estimated from discharge, depth and wetted width at cross-sections or in uniform reaches, as:

$$V = Q/(HW) \quad (4)$$

Coefficients of the at-a-station hydraulic geometry (a and c) are related to hydraulics at a reference discharge rate (i.e., they depend on the downstream hydraulic geometry of rivers), because equations (1) and (2) can be re-written as:

$$W = \bar{W} \left[\frac{Q}{\bar{Q}} \right]^b \quad (5)$$

$$H = \bar{H} \left[\frac{Q}{\bar{Q}} \right]^f \quad (6)$$

where \bar{W} and \bar{H} are respectively the mean wetted width and mean water depth at mean discharge \bar{Q} . Therefore, exponents b and f provide the rate of increase of hydraulic characteristics with discharge and are the key parameters for describing temporal changes in reach hydraulics.

Empirical analysis of AHG exponents (Leopold and Maddock, 1953; Rhodes, 1977; Park, 1977) revealed high exponent variability among cross-sections of different reaches. Typically, b ranges between 0 and 0.1 and f between 0.3 and 0.4 (Park, 1977). However, exponent values can vary from 0 to 1 among cross-sections and stream reaches (Stewardson, 2005). Empirical explanations of variations in AHG exponents remain limited (Gleason, 2015). For example, Nanson et al. (2010) analyzed AHG exponents at 19 cross-sections in peatland channels and observed low values of b and high values of f , suggesting that water depth increases rapidly and wetted width increases slowly with discharge in these channels. By contrast, large b values were observed on a couple of braided reaches (Smith et al., 1996; Ashmore and Sauks, 2006). In 19 high gradient reaches, David et al. (2010) observed weak relationships between AHG exponent values and several explanatory variables such as channel type, roughness elements and channel slope. Similarly, in 73 reaches in New Zealand, Jowett (1998) reported non-significant relationships between exponent values and a channel shape parameter.

Despite these difficulties to explain AHG, a recent empirical analysis of data from 492 reaches in France suggested that AHG exponents could be partly predicted from hydraulic characteristics measured at a single discharge: the Froude number of the reach and the ratio of wetted width to bankfull width (Morel et al., 2019). In the same vein, environmental descriptors available in GIS databases (e.g. reach slope, catchment area) partly (although weakly) explained AHG exponents in both France and New Zealand datasets (Morel et al., 2020). These results suggest potential intercontinental similarities in reach-scale AHG patterns.

From river hydraulics theory, the variation in at-a-station hydraulic geometry at a given cross-section depends on its cross-section profile and flow resistance (Ferguson, 1986; Dingman, 2007). Dingman (2007) developed analytical expressions stating that AHG exponents are exclusively linked to channel cross-sectional shape and bed roughness (i.e. exponent of the velocity-depth relationship) in an idealized cross-section. Recently, Dingman and Afshari (2018) validated Dingman's formulation on observed empirical values of AHG at the cross-section scale. However, the consistency of theory and empirical observations and the predictive ability of Dingman's formulation remain untested at reach scale. Furthermore, Dingman and

Afshari (2018) used empirical observations of velocity-depth relationships at several discharge rates; they did not attempt to predict AHG from topography alone, or from observations at a single discharge rate.

The objectives of this paper are to (1) test the consistency of theoretical and empirical predictions of AHG exponents, and (2) test the generality of AHG predictions across rivers of different countries with variable landscape settings. For this purpose, we tested if the empirical results obtained in France by Morel et al. (2019) remained valid in a much larger data set grouping observed AHG data from France, United Kingdom and New Zealand. Building on Dingman (2007), we also investigated if topographic reach characteristics could explain observed AHG exponents, and the consistency of this theoretical approach with our empirical explanations.

2. Materials and Methods

2.1 Observed AHG exponents and numerical predictions

AHG exponents (equations 1 and 2) were estimated in a total of 812 stream reaches from various sources in France, United Kingdom and New Zealand. These reaches were sampled in various geomorphic contexts and present different fluvial patterns (i.e. single channel or braided reaches) and size (Figure 1, see Table 1 for details). The 812 studied reaches had median discharge Q_{50} between 0.005 and 139 m³/s. Q_{50} estimates were available for all our reaches, generally extrapolated from available gauging data networks (Holmes et al., 2002a; Holmes et al., 2002b; Sauquet and Catalogne, 2011; Booker and Woods, 2014). Notably, stream reaches had “minimally-impacted morphologies” (e.g. were free from the effects of channel engineering such as channel reshaping or addition of embankments). However, some reaches had undocumented and potentially high levels of water abstraction. In particular, ESTIMHAB, EVHA, RHYHABSIM and PHABSIM data sets (in Table 1) were often downstream of hydropower dams or other abstraction works. By contrast, CARHYCE, ESTIMHAB+ and Navratil (2005) reaches (Table 1) were intentionally located in streams without morphologic and hydrologic alterations.

Most AHG observations were derived (hereafter, OBS_2Qs data) from field measurements observed at two contrasted discharge rates (with a ratio > 1.66 between the two discharges), generally below median discharge (Q_{50}). OBS_2Qs data come from applications of habitat model ESTIMHAB (n = 378, Lamouroux, 2002), from applications of the French national tool

of river hydromorphology characterization CARHYCE ($n = 88$, Gob et al., 2014) and from unpublished surveys borrowing from the two previous methods ESTIMHAB+ ($n = 14$) (see also Morel et al., 2019, for further information about ESTIMHAB and CARHYCE). Other observed AHG exponents were estimated from applications of hydrodynamic numerical models calibrated in reaches (hereafter, OBS_NUM data). These data came from the application of the one-dimensional habitat models RHYHABSIM ($n= 119$; Jowett, 2008; Booker, 2016), PHABSIM ($n = 60$; Booker and Acreman, 2007), EVHA ($n=138$; Ginot, 1998) and also from Navratil (2005) and Navratil and Albert (2010) ($n = 15$). Most of these numerical models were calibrated from measurements made at several discharge rates in the reach. In other words, they provided numerical extrapolations of observed hydraulic geometry. An exception was the EVHA data set, which was calibrated in the field at a single discharge rate and used the Limerinos' formulae for bed friction (Limerinos, 1970) to extrapolate water levels at other discharges.

For both types of observed AHG (OBS_2Qs and OBS_NUM), reaches corresponded to several cross-sections (between 5 and 116 depending on the reach, with an average value of 15) in which a wetted width and several water depth points were measured or estimated. Due to the sampling protocols, reach length/width ratio was generally > 15 . However, field measurements followed different protocols. OBS_2Qs data were measured on regularly-spaced cross-sections (at spacings of the average wetted width for ESTIMHAB and average bankfull width for CARHYCE and ESTIMHAB+) and regularly-spaced water depth measurements along cross-sections. In contrast, for OBS_NUM reaches, cross-sections and points were selected in order to best represent the reach topography in view of the hydraulic modeling, with weightings subsequently applied to gain unbiased reach-averaged estimates.

For all reaches, observed AHG exponents (noted b_{obs} and f_{obs}) were estimated by separately regressing width and depth against discharge (equations 1 and 2, fitted by linear regression after log-transformations). For RHYHABSIM and PHABSIM, AHG exponents were estimated from reach-averaged hydraulics extrapolated at flows ranging from Q_{90} (i.e. daily discharge exceeded 90% of the time) to Q_{50} . For Navratil (2005) reaches, reach-averaged hydraulic estimates associated with simulated flows below bankfull stage were selected. For EVHA, the range of discharge used was between $Q_{50}/10$ and $5*Q_{50}$ (Lamouroux and Capra, 2002).

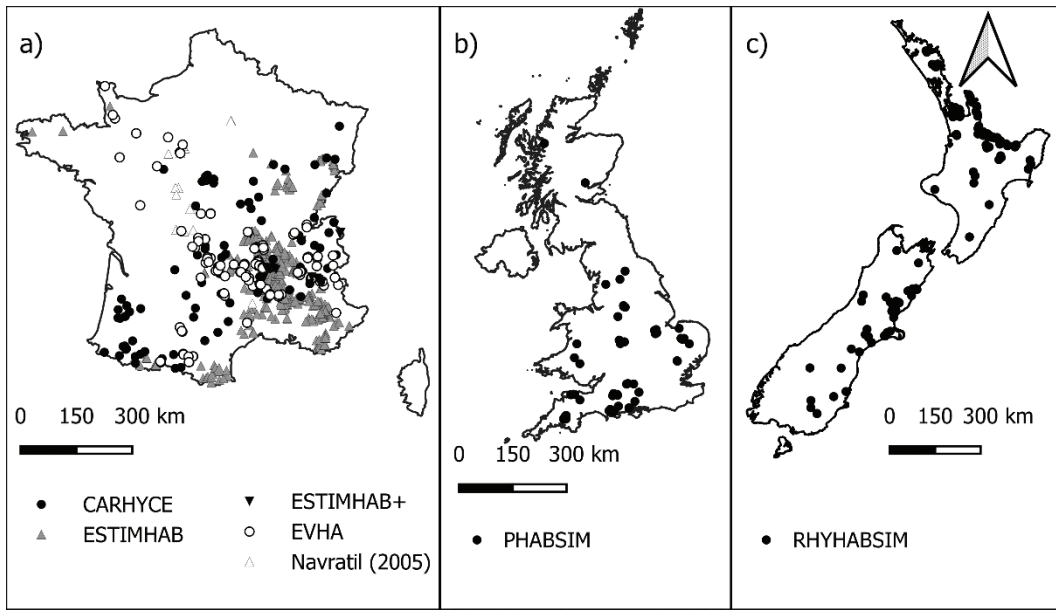


Figure 1. Spatial distribution of studied reaches in France (a), New Zealand (b) and United Kingdom (c).

Table 1: Data sets and their characteristics, including the estimation method of AHG and the available reach hydraulic variables used for the empirical predictions.

Data sets	Location	Number of reaches	AHG estimation method	Q_{50} , m ³ /s (min; mean; median; max)	H_{50} , m (min; mean; median; max.)	W_{50} , m (min; mean; median; max.)	Source	Available hydraulic variables
ESTIMHAB	Metropolitan France	378	OBS_2Qs	0.007; 1.722; 0.577; 70.458	0.04; 0.30; 0.34; 1.54	0.68; 7.14; 9.33; 81.50	Morel et al. (2019)	Fr_{50}
CARHYCE	Metropolitan France	88	OBS_2Qs	0.030; 0.730; 0.311; 6.660	0.13; 0.27; 0.30; 0.73	1.59; 4.83; 6.34; 30.71	Morel et al. (2019)	Fr_{50} , W_{50}/W_{Qb} (σ/W_{Qb} , D/W_{Qb} for 80 reaches)
ESTIMHAB+	Metropolitan France	14	OBS_2Qs	0.180; 0.755; 0.463; 2.625	0.11; 0.27; 0.26; 0.35	2.70; 5.88; 6.36; 13.12	This study	Fr_{50} , (W_{50}/W_{Qb} , σ/W_{Qb} , D/W_{Qb} for 11 reaches)
PHABSIM	United Kingdom	60	OBS_NUM	0.038; 1.204; 0.759; 7.783	0.05; 0.34; 0.36; 0.77	1.87; 8.58; 10.03; 31.01	Booker and Acreman (2007)	Fr_{50}
RHYHABSIM	New Zealand	119	OBS_NUM	0.005; 4.464; 0.791; 41.377	0.04; 0.35; 0.42; 1.61	1.09; 7.84; 12.46; 68.80	Booker (2016)	Fr_{50}
Navratil	Metropolitan France	15	OBS_NUM	0.172; 2.112; 1.233; 8.663	0.18; 0.47; 0.59; 1.22	2.86; 9.82; 11.90; 25.31	Navratil (2005); Navratil and Albert (2010)	Fr_{50} , W_{50}/W_{Qb}
EVHA	Metropolitan France	138	OBS_NUM	0.031; 8.625; 2.205; 139.206	0.08; 0.46; 0.36; 2.07	1.33; 16.50; 9.64; 134.88	Lamouroux and Capra (2002)	Fr_{50}

2.2 Dingman's equivalents of observed AHG exponents

Ferguson (1986) proved that AHG is conceptually governed by cross-sectional shape and the velocity-depth relationship. On this basis, Dingman (2007) introduced physically based parameters for explaining AHG exponents. A first parameter (r_{theo}) reflects channel cross-sectional shape, up to bankfull, and a second parameter (p_{theo} , that should be related to bed roughness) is the exponent of the velocity-depth relationship according to generalized power-law hydraulic relations.

In Dingman's formulation, the shape parameter r_{theo} reflects the form of an idealized cross-section as:

$$W = W_{Qb} \times (Hmax/Hmax_{Qb})^{1/r_{theo}} \quad (7)$$

where W and $Hmax$ are the wetted width and the maximum water depth of individual cross-sections measured at any instantaneous discharge Q ; W_{Qb} and $Hmax_{Qb}$ are the wetted width and the maximum water depth of individual cross-sections measured at the bankfull stage respectively. Theoretically, r_{theo} varies from 1 to infinite; where $r_{theo} = 1$ represents a triangular cross-section, $r_{theo} = 2$ represents a parabolic cross-section and $r_{theo} = \infty$ represents a rectangular cross-section. Herein, we will use similar formulations but with reach-averaged values.

Dingman (2007) did not relate his parameter p_{theo} to the reach topography or roughness, but defined it as the exponent of the velocity-depth relationship as:

$$V = K \cdot S^q \cdot H^{p_{theo}} \quad (8)$$

where K is the conductance coefficient, S is the energy slope and q is the energy slope exponent. The parameter p_{theo} should depend on bed roughness properties. For example, Manning's equation leads to $p_{theo} = 2/3$ in a uniform channel. However, several studies (e.g. Dingman and Afshari, 2018; Ferguson, 2010) revealed the large variety of empirical estimated of p_{theo} values in natural streams. In theory, p_{theo} could be predicted from the different forms of flow resistance (i.e. form, grain or spill resistance) that vary among river types (e.g. step-pool, plane bed rivers; David et al., 2010; Girard et al., 2014).

Dingman's (2007) approach is equivalent to a re-parametrization of hydraulic geometry exponents; i.e. his theoretical approach leads to:

$$b = \frac{1}{1+r_{theo}+r_{theo} \cdot p_{theo}} \quad (9)$$

$$f = \frac{r_{theo}}{1+r_{theo}+r_{theo} \cdot p_{theo}} \quad (10)$$

Here, we will inverse these equations to calculate r_{obs} and p_{obs} for each AHG observation. This provided observed Dingman's parameters corresponding to observed b_{obs} and f_{obs} .

$$r_{obs} = f_{obs}/b_{obs} \quad (11)$$

$$p_{obs} = 1/f_{obs} - 1/r_{obs} - 1 \quad (12)$$

2.3 Empirical predictors of AHG exponents: hydraulic reach characteristics at one discharge

We considered the discharge-independent hydraulic predictors of AHG exponents identified by Morel et al. (2019): the reach-scale Froude number at the median flow (Fr_{50}) and the ratio of the reach-averaged width at the median flow to bankfull width (W_{50}/W_{Qb}), both estimated from field measurements at a single discharge (Q_m). Local point Froude number is a ratio between inertia forces and gravity forces and is used to define tranquil or critical flow (Chow, 1959; Jowett, 1993). It is higher in geomorphic units such as riffles compared to pools (Jowett, 1993). Consistently, the reach-scale Froude number Fr_{50} is linked to the relative proportion of riffles and pools within the reach (Lamouroux et al., 2002) and reflects the longitudinal variability in channel morphology. The median to bankfull width ratio W_{50}/W_{Qb} describes the capacity of a reach of widening with increasing discharge (Morel et al., 2019) and reflects the lateral variability in channel morphology.

Morel et al. (2019) used hydraulic descriptions at Q_{50} to compare hydraulic conditions across many reaches at a comparable discharge rate. However, field measurements were made at another discharge rate (Q_m) than Q_{50} . Therefore, Morel et al. (2019) proposed to predict the reach characteristics at Q_{50} from those at Q_m using the following correction common to all reaches:

$$W_{50} = W_m \cdot (Q_{50}/Q_m)^{\tilde{b}} \quad (13)$$

$$H_{50} = H_m \cdot (Q_{50}/Q_m)^{\tilde{f}} \quad (14)$$

where W_{50} and H_{50} are, respectively, reach-average wetted width and water depth at Q_{50} . W_m and H_m are wetted width and water depth at measurement discharge Q_m . Exponents \tilde{b} and \tilde{f} of

equations (13) and (14) are mean values of b and f from the all data sources combined (i.e. 0.141 and 0.302, respectively). This ensures that our corrections for measurement discharge was similar in all reaches and was not influenced in any way by reach-specific AHG.

Finally:

$$Fr_{50} = Q_{50} / [g^{0.5} \cdot H_{50}^{1.5} \cdot W_{50}] \quad (15)$$

where g is acceleration due to gravity.

Additionally, we calculated W_{50}/W_{Qb} for reaches with bankfull geometry measurement (i.e. CARHYCE, ESTIMHAB+ and Navratil (2005), 14 % of our reaches, see Table 1).

When surveys were made at several discharge rates, Q_m was taken as the first measurement survey (generally the more complete survey). When the first survey was not identified, we selected Q_m randomly among measurement discharges.

2.4 Theoretical predictors of AHG exponents: topographic reach characteristics

A theoretical shape exponent r_{theo} was calculated from observed reach topography using equation (7) and for our reaches with documented bankfull geometry (see Table 1).

Dingman and Afshari (2018) did not relate p_{theo} to topographic reach characteristics. Here, we attempted to estimate p_{theo} using two candidate discharge-independent variables describing stream roughness: the reach-average grain size relative to bankfull width (D/W_{Qb}), and the standard deviation of the bed elevation relative to the bankfull width (σ/W_{Qb}). Although roughness size is commonly expressed relative to water depth, we chose bankfull width here because it is easier to estimate than bankfull depth in the field, and easier to estimate from remote sensing. For obtaining σ , we regressed thalweg elevation as a function of the longitudinal distance along the reach, and we defined σ as the residual standard deviation of this regression. D/W_{Qb} was chosen to reflect grain resistance and σ/W_{Qb} was chosen to reflect form resistance (Yochum et al., 2014). In our theoretical approach, the parameter p_{theo} was estimated from a multiple linear regression, among reaches, of p_{obs} on both roughness descriptors.

The theoretical r_{theo} and p_{theo} were calculated only for reaches that included detailed topographic measurements (i.e. CARHYCE and ESTIMHAB+ reaches, 11 % of our 812 reaches, see Table 1).

2.5 Statistical analyses

To analyze the consistency of the empirical and theoretical approaches for predicting AHG exponents, we started from observed f_{obs} , b_{obs} and their Dingman's recombinations r_{obs} , p_{obs} . We tested how these observed parameters depended on (1) empirical hydraulic predictors, and (2) theoretical topographic predictors, and discussed if these relationships had consistent interpretation. We also checked for correlations among explanatory variables. We used linear regressions and pairwise scatterplot matrix to evaluate the relationships between the different AHG parameters and their explanatory variables. All statistical analyses were made using the R software (R Core Team, 2019).

For reaches with available topographic data, we expected r_{obs} and p_{obs} to be related to their topographic theoretical predictor r_{theo} and p_{theo} . Consistently with the theoretical approach, we also expected r_{obs} to be correlated with the empirical hydraulic predictor W_{50}/W_{Qb} , which reflects cross-section shape. In the same vein, we also expected p_{obs} to be correlated with the empirical hydraulic predictor Fr_{50} , which is linked to form resistance.

Concerning b_{obs} and f_{obs} , we expected that they would be influenced by our two empirical discharge-independent predictors W_{50}/W_{Qb} and Fr_{50} , with b_{obs} more correlated to r_{theo} and W_{50}/W_{Qb} due the influence of cross-section shape on width changes, and f_{obs} more influenced by p_{theo} and Fr_{50} due to the influence of bed resistance form on depth changes.

Finally, we compared how observed b_{obs} , f_{obs} were related to empirical predictors among the different countries and data sets to discuss the generality of our models and potential improvements.

3. Results

The average exponent values for at-a-station relationships for width and depth were 0.141 and 0.302 with width exponent values ranging from 0.002 to 0.948 and depth exponents from 0.005 to 0.944. No particular difference of exponent ranges was observed between our studied datasets and exponents values globally fell in ranges reported in AHG literature (e.g. Jowett, 1998; Stewardson, 2005).

Values of r_{obs} ranged from 0.501 to 9.799 with a median value equal to 2.595. In comparison, theoretical r_{theo} ranged from 0.818 to 6.764 and median value was 2.182. Values of p_{obs} ranged from 0.097 to 12.518 with a median value equal to 1.806. In comparison, values of p_{theo} ranged

from 1.293 to 6.604 and median value was 2.074. This indicates that p_{obs} values observed in river channels may strongly differ from conventional uniform-flow values of Chézy or Manning (0.5 and 0.667, respectively), reflecting the complexity of friction processes in natural streams. Parameters r_{obs} , r_{theo} and p_{theo} fall inside typical ranges observed by Dingman and Afshari (2018) in more than 109 cross-sections. However, the distribution of the parameter p_{obs} is somewhat outside the range observed by Dingman and Afshari (2018) (i.e. exponent of velocity-depth relation ranged from 0.234 to 9.783 in their 109 cross-sections).

Table 2 shows the results of regressions of b_{obs} and f_{obs} and Dingman's parameters r_{obs} and p_{obs} on topographic and hydraulic reach characteristics. Significant theoretical (from topography) and empirical (from reach hydraulics at one discharge) predictions were obtained for both parametrizations. As expected, Dingman's parameter r_{obs} and p_{obs} were more clearly related to their theoretical estimates, whereas b_{obs} and f_{obs} were more clearly related to reach hydraulics.

Parameters r_{obs} and p_{obs} were significantly explained by topographic parameters ($R^2 = 0.32$ for r_{obs} and 0.20 for p_{obs}). They were related to their theoretical corresponding variable exactly as expected: r_{obs} was related to r_{theo} and not p_{theo} , whereas p_{obs} was related to p_{theo} and not r_{theo} . The observed relationship between p_{obs} and p_{theo} (Table 2, $R^2 = 0.20$, $P < 0.001$) was associated with a definition of p_{theo} where both roughness descriptors positively influenced p_{theo} ($p_{theo} = 1.033 + 43.924 * \sigma / W_{Qb} + 13.216 * D / W_{Qb}$). This suggests a combined influence of grain and form friction. As expected also and consistently with theory (see section 2.5), r_{obs} was related to the empirical W_{50} / W_{Qb} ($R^2 = 0.14$; $P < 0.001$), whereas p_{obs} was related to the empirical Fr_{50} ($R^2 = 0.24$, $P < 0.001$).

Parameters b_{obs} and f_{obs} were better explained by reach hydraulics ($R^2 = 0.44$ for b_{obs} and 0.32 for f_{obs} according to multiple regressions, Table 2) than topographic parameters. b_{obs} was influenced by both Fr_{50} ($R^2 = 0.34$ according to a univariate regression) and W_{50} / W_{Qb} ($R^2 = 0.26$), with an unexpected stronger influence of Fr_{50} , whereas f_{obs} was essentially influenced by Fr_{50} ($R^2 = 0.26$, Table 2). Of the explanatory variables tested, Fr_{50} appeared as the main empirical driver of AHG exponents. Parameters b_{obs} and f_{obs} were less directly related to topographic parameters; however, b_{obs} was more influenced by the cross-section profile (r_{theo}) whereas f_{obs} was more influenced by roughness descriptors (p_{theo}).

Correlations among hydraulic and topographic explanatory variables (Figure 2) confirmed a strong positive correlation between the topographic channel shape exponent r_{theo} and the

empirical variable W_{50}/W_{Qb} . In addition, they indicated negative correlations between Fr_{50} and both variables p_{theo} and W_{50}/W_{Qb} . These correlations suggest that reaches with low values of Fr_{50} (that is, with many pool-type habitats) generally have cross-sections where width increases slowly with discharge (i.e. high values of W_{50}/W_{Qb}) and where velocity increases more rapidly with depth (high values of p_{theo}).

Table 2: Coefficient of determination (R^2) of linear regressions between AHG observed exponents, their theoretical predictors (topography) and their empirical predictors (reach hydraulics at one discharge). Significance is noted: < 0.001 ***; < 0.01 (**); < 0.1 (*).

Explanatory variables	AHG observed exponents			
	b_{obs}	f_{obs}	r_{obs}	p_{obs}
Topographic reach characteristics (n = 91)				
$p_{theo} + r_{theo}$	0.19***	0.15***	0.32***	0.20***
p_{theo} alone	0.06	0.14***	0.00	0.20***
r_{theo} alone	0.08***	0.04*	0.32***	0.01
Hydraulic reach characteristics (n = 114)				
$Fr_{50} + W_{50}/W_{Qb}$	0.44***	0.32***	0.13***	0.26***
Fr_{50} alone	0.34***	0.26***	0.01	0.24***
W_{50}/W_{Qb} alone	0.26***	0.00	0.14***	0.00

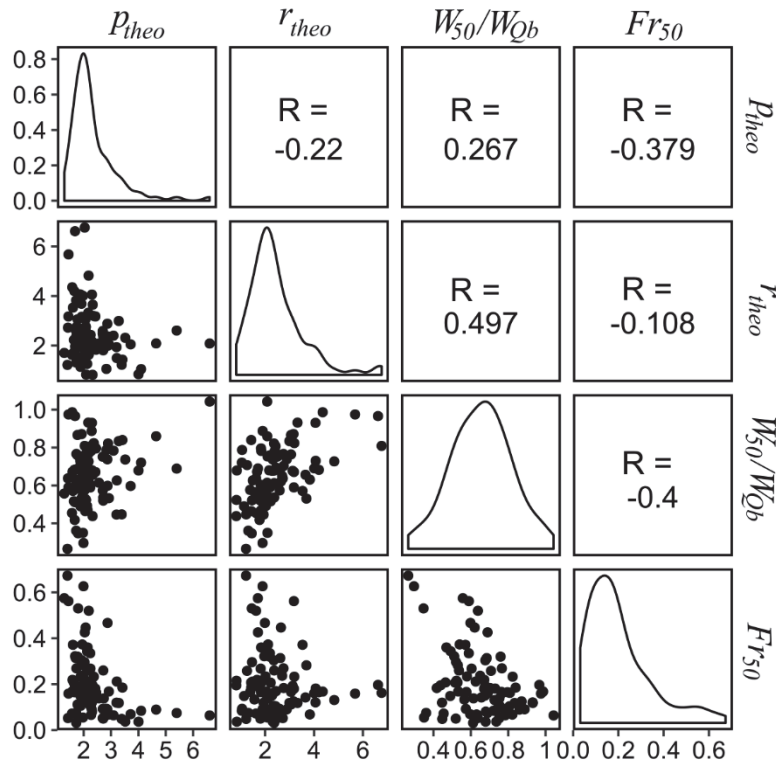


Figure 2: Pairwise scatter plot matrix, distribution and Pearson correlation coefficients (R) of all hydraulic and topographic AHG predictors for CARHYCE and ESTIMHAB+ data sets ($n = 91$ reaches). Pairwise scatter plots are in lower boxes, distribution are in the diagonal boxes, and upper boxes give the Pearson correlation coefficients between variables.

The significant univariate relationships between b_{obs} , f_{obs} and their empirical predictors were remarkably consistent (significant and with similar directions) among data sources and data types (OBS_2Qs and OBS_NUM). Relations with Fr_{50} were significant for all data sources and explained 15% to 48% of b_{obs} variance (Figure 3) and 0.06% to 78% of f_{obs} variance (Figure 4) depending on the data sources. Notably, CARHYCE, Navratil (2005) and EVHA data sets presented stronger relations than the others for b_{obs} ($R^2 = 0.35, 0.48$ and 0.40 , respectively). Moreover, ESTIMHAB+ and Navratil (2005) reaches presented stronger relations for f_{obs} ($R^2 = 0.78$ and 0.67 , respectively). Relations between b_{obs} with W_{50}/W_{Qb} were significant for all studied data sets and explained 21% to 50% of b_{obs} variance (Figure 5).

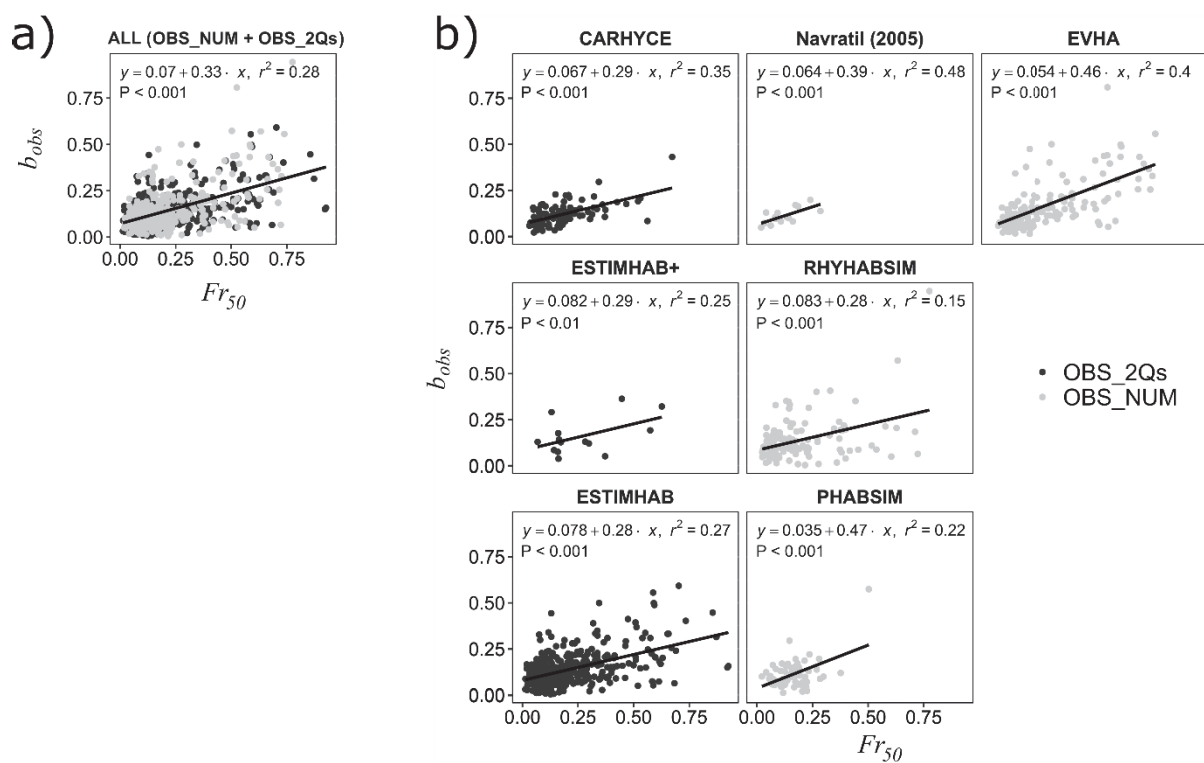


Figure 3: Relationship between b_{obs} and Fr_{50} for OBS_2Qs and OBS_NUM data sets corresponding to all field observations (a). Panels in (b) show the data in (a) split by independent data sources. Solid black lines represent the linear regressions between both variables.

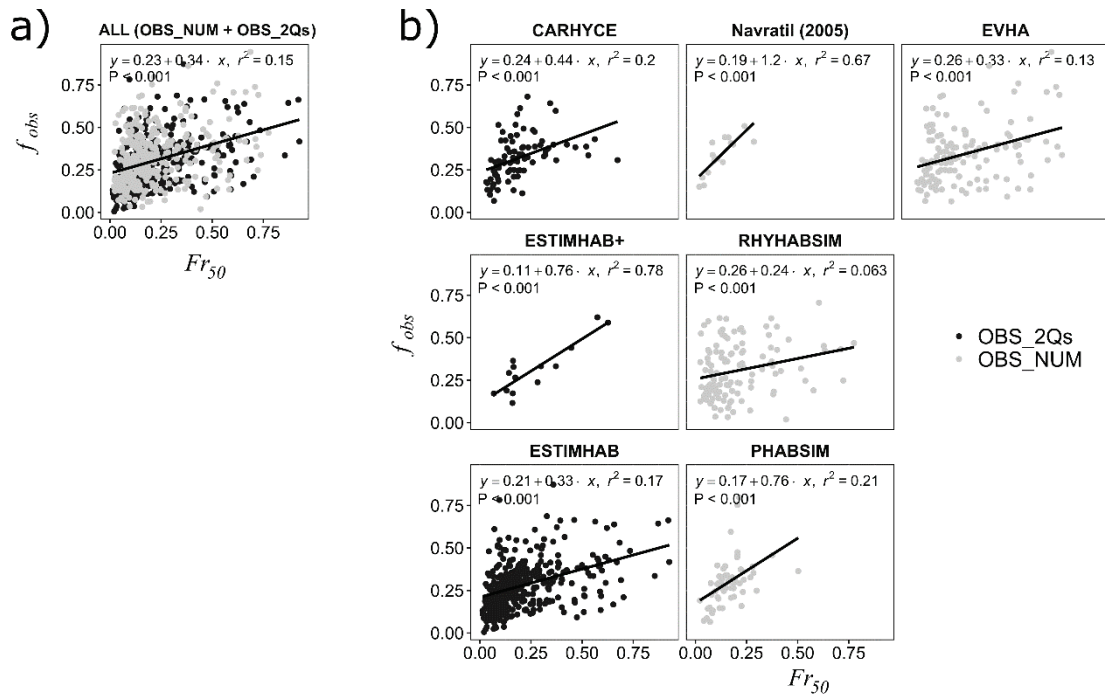


Figure 4: Relationship between f_{obs} and Fr_{50} for OBS_2Qs and OBS_NUM data sets corresponding to all field observations (a). Panels in (b) show the data in (a) split by independent data sources. Solid black lines represent the linear regressions between both variables.

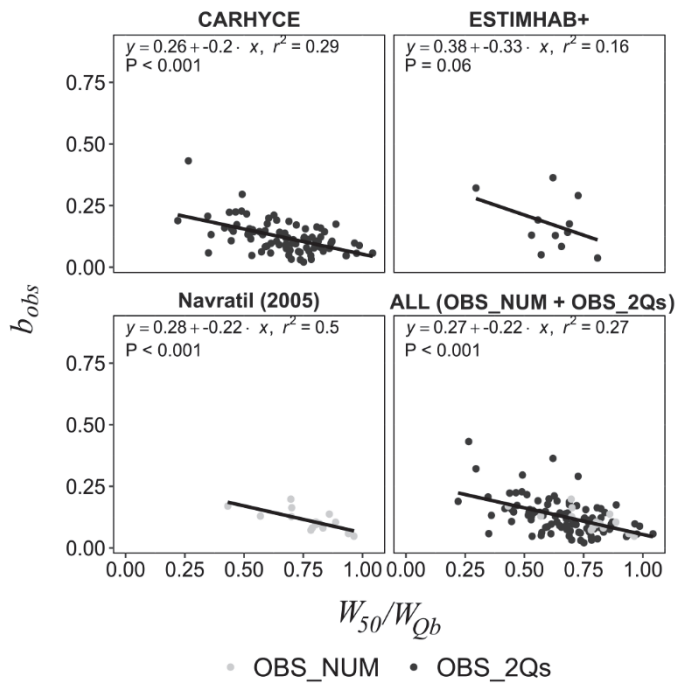


Figure 5: Relationships between b_{obs} and W_{50}/W_{Qb} observed for the different data sources. Solid black lines represent the linear regressions between both variables.

4. Discussion

Our study demonstrates the consistency of empirical and theoretical approaches for explaining AHG exponents and indicates the generality of these patterns. We found that the theoretical approach of Dingman, adapted here at the reach scale, was well suited to explain variations in AHG exponents. However, AHG exponents were better predicted by empirical hydraulic variables (measured at a single discharge) than by theoretical predictors. Empirical relationships were consistent with theory, because both approaches confirmed the general influence of cross-section shape and bed friction on AHG. Despite their limited explanatory power, our empirical models were also significant and of similar direction among all data sets (from France, New Zealand and United Kingdom) and data types, suggesting that they result from very general physical processes. Therefore, following Morel et al. (2019) findings on French rivers, our results provide original empirical explanations of AHG exponents of international relevance.

Dingman's formulation of observed AHG parameters was related to reach topography exactly as theoretically expected (r_{obs} was exclusively related with r_{theo} , p_{obs} with p_{theo}). This indicates that the theoretical approach partly reflects the relative influence of cross-sectional shape and friction on observed coefficients. Our results also suggest that the topographic variables that we proposed for estimating p_{obs} were relevant. In other words, we provided original evidence that the relative grain size and the relative standard deviation of the bed elevation both influence friction and AHG parameters. However, we tested the theoretical approach on data subsets without braided rivers. It would be interesting to extend our analyses and comparisons between the theoretical and empirical approaches in braided rivers, given the relationships reported between AHG exponents and observed fluvial patterns (Morel et al., 2019).

Relationships between AHG exponents and empirical hydraulics were stronger than with topographic explanatory variables. In particular, Fr_{50} was the major empirical parameter explaining both AHG exponents b_{obs} and f_{obs} . Fr_{50} is linked to the relative proportion of riffles and pools within the reach (Lamouroux, 2002). More generally, the Froude number is the main predictor of local bed shear stress and velocity distributions in stream reaches (Lamouroux et al., 1992, 1995). Therefore, we suspect that this hydraulic variable contains information on the effects of reach friction that is not taken into account by our topographic variables alone. Friction properties can result from the complex lateral and longitudinal heterogeneity of reaches, substrate arrangements and the distribution of geomorphic units. The theoretical

parameters considered here are probably insufficient to represent these complex friction processes, suggesting potential further improvements of the theoretical explanation of AHG.

In more detail, the width exponent b_{obs} was explained by predictors related to cross-sectional shape: the theoretical predictor r_{theo} and the empirical predictor W_{50}/W_{Qb} (both being correlated). This is consistent with previous empirical studies (Morel et al., 2019) and confirms the relevance of theoretical approaches based on channel shape made at the cross-section scale (Ferguson, 1986). However, we also found that Fr_{50} was a strong predictor of b_{obs} , suggesting that b_{obs} also depends on the longitudinal distribution of geomorphic units. The negative correlation between Fr_{50} and W_{50}/W_{Qb} also suggests that Fr_{50} is partly related to cross-sectional shape. In other words, the longitudinal distribution of geomorphic units may also influences AHG through variations in section shape.

The depth exponent f_{obs} was less well explained (as also noted by Morel et al., 2019) but was also linked to Fr_{50} , and secondarily to the theoretical friction parameter p_{theo} . The negative correlation between p_{theo} and Fr_{50} , probably due to more rapid velocity changes in pools than in riffles when discharge increases, can explain this joint influence. However, the stronger influence of Fr_{50} suggests that this variable integrates information on longitudinal form resistance that is not well represented by p_{theo} alone.

The variance in AHG explained by our approach varied across data sources drawn from different locations. For example, Fr_{50} explained from 15% to 48% and from 6% to 78% of b_{obs} and f_{obs} variance, respectively, depending on the studied data sets. Explained variances were in most cases satisfactory given the limits and uncertainties associated with field measurements (Stewardson, 2005; Navratil and Albert, 2010). Although AHG should be less affected by field uncertainties at the reach than the cross-section scale (Stewardson, 2005), AHG is particularly sensitive to sampling errors or cross-sections location (Navratil and Albert, 2010; Gonzalez and Pasternack, 2015). AHG estimated from two discharge rates are also sensitive to field uncertainties (Navratil and Albert, 2010; Morel et al., 2019). Moreover, AHG naturally vary with time due to river perturbations (Phillips, 1990, 1991). Finally, our data sets present various degree of hydrological alterations, which could potentially affect the results. Specifically, our results tended to be stronger in unaltered data sets (i.e. Navratil (2005), CARHYCE and ESTIMHAB+), indicating that the degree of morphological alteration should be better accounted for in future studies.

A full understanding of AHG variations will require reduction of these uncertainties, and more generally to understand the key catchment- and reach-scale processes that govern channel shape and friction. In particular, the observed relationship between Fr_{50} and AHG exponents suggests to further investigate the hydromorphological processes that drive the distribution of geomorphic units (riffle, run, pool; Thompson, 2001) and the various forms of friction in reaches (Yochum et al., 2012; Billi et al., 2014). Such investigations would help to better predict hydraulic geometry and therefore aid river management at unvisited locations or data poor locations.

5. Conclusion

Direct applications of our empirical models in catchment-scale studies would still be complicated, because they would require field calibrations at a single discharge, in order to estimate the explanatory variables of AHG exponents as well as AHG coefficients. Therefore, the main immediate contribution of our results is to identify key drivers, with repeatable influence on AHG exponents in various landscape settings, that should be considered in generalized AHG models. Specifically, the knowledge of the distributions of riffles and pools in reaches, together with ratios of wetted to bankfull width, should inform generalized AHG models. Estimations of these variables from aerial images are possible (Bjerklie et al., 2005; Morel et al., 2019) and could be further developed.

Improved models of AHG exponents can be combined with general models of downstream hydraulic geometry (e.g., following equations 5 and 6) to inform catchment management tools that use reach hydraulics as inputs. Such applications concern catchment management of sediment transport, nutrients fluxes, floods, water temperature and river habitats, as well the estimation of discharge via remote sensing (e.g., Bjerklie et al., 2003; Smith and Pavelsky, 2008; Gleason, 2015). More accurate AHG exponents may be particularly useful for predicting the ecological effects of relative changes in discharge in stream reaches. For example, Damiani et al. (2019) showed that, for aquatic communities across French reaches, the width exponent b is a key driver of the sensitivity of habitat suitability to water abstraction. Therefore, further developments of AHG models should contribute to improved environmental flow and river management studies.

Acknowledgements

Many thanks to all those who provided data for this study. This study received funds from the Office Français de la Biodiversité (OFB). The contribution of DJB was funding by NIWA's Environmental Flows Programme.

Chapitre 4 : Modélisation intercontinentale de la géométrie hydraulique longitudinale et stationnelle

Ce chapitre concerne la construction des modèles de géométrie hydraulique nationaux et intercontinentaux combinant les approches stationnelles et longitudinales. Ce chapitre se présente sous la forme d'un article (Article 3) publié dans la revue *Journal of Hydrology*.

4.1 Synthèse

Une description des caractéristiques hydrauliques moyennes des cours d'eau et de leur changement avec le débit à travers les réseaux hydrographiques est un élément fondamental pour la gestion des bassins versants (Lamouroux et al., 2017). Comme évoqué dans le chapitre 1, plusieurs études environnementales utilisent des caractéristiques hydrauliques pour modéliser l'habitat aquatique ou la température de l'eau à l'échelle de grands bassins versants (Miguel et al., 2016, Beaufort et al., 2016). Ce type d'application environnementale à large échelle tend à croître dans un contexte de changements globaux.

L'objectif de cette étude est de construire des modèles de prédictions à large échelle (c'est-à-dire national et intercontinental) de la géométrie hydraulique prenant en compte la géométrie hydraulique longitudinale et stationnelle. Complémentairement, cette étude vise également à mettre à jour les prédictions nationales de géométrie hydraulique provenant des modèles Estimkart (Lamouroux et al., 2010) et fournissant des modèles améliorés. Pour ce faire, cette étude s'appuie sur 1179 données de tronçons à un ou deux débits en France (tronçons CARHYCE, CARHYCE+ et ESTIMHAB). À cela s'ajoutent 125 tronçons à plusieurs débits issus de Nouvelle-Zélande (tronçons RHYHABSIM).

Les paramètres de géométrie hydraulique ont été estimés pour l'ensemble des tronçons. Les exposants de géométrie hydraulique stationnelle (b et f) ont été estimés à partir des valeurs de largeurs mouillées et hauteurs d'eau à plusieurs débits. Pour les tronçons où des mesures ont été faites à un débit unique, c'est-à-dire les tronçons CARHYCE, les exposants b et f ont des valeurs moyennes de l'ensemble du jeu de données. Les paramètres reflétant la géométrie hydraulique longitudinale ($W50'$ et $H50'$ dans l'article) ont été estimés au débit médian interannuel ($Q50$) à partir des équations 1.7 et 1.8.

Les paramètres de géométrie hydraulique ont été modélisés en se basant sur des variables SIG nationales. Trois méthodes utilisant des formulations différentes pour prédire ces paramètres ont été appliquées. La première méthode applique une formulation « basique » où les paramètres de géométrie hydraulique longitudinale sont essentiellement dépendants du débit et la géométrie hydraulique stationnelle est considérée comme constante (b et f sont des valeurs moyenne du jeu de données total). La deuxième méthode applique des modèles nationaux pour tous les paramètres de géométrie hydraulique en fonction de variables SIG spécifiques à chaque pays. La troisième méthode applique des modèles intercontinentaux où les paramètres de géométrie hydraulique sont modélisés à partir d'une sélection de variables SIG très générales et communes aux deux pays (par exemple la pente moyenne du tronçon, l'altitude, la surface de bassin versant, etc.).

La méthodologie appliquée dans cette étude (c'est-à-dire la réalisation de plusieurs formulations et l'utilisation d'un jeu de données français et néo-zélandais) permet de répondre à des sous-objectifs de l'étude qui sont : 1) d'évaluer le gain de performance de modèles complexes (les modèles nationaux et intercontinentaux) comparés à un modèle basique ; 2) de tester l'applicabilité de modèles universels (c'est-à-dire les modèles intercontinentaux) ; 3) d'analyser les similarités quant aux réponses des paramètres de géométrie hydraulique avec les variables SIG spécifiques aux deux pays.

La première méthode a été mise en œuvre en utilisant des modèles de régressions linéaires simples. Pour les deux autres méthodes, des forêts aléatoires ont été utilisées pour prédire les paramètres de géométrie hydraulique. Plusieurs tests ont été faits pour évaluer la performance des modèles, particulièrement, j'ai examiné l'efficacité avec laquelle les modèles arrivent à prédire les observations mesurées sur le terrain à un débit instantané. En complément à ces analyses, j'ai également examiné dans quelle mesure les modèles de hauteur d'eau et de largeur mouillée arrivent à prédire des vitesses observées. Pour ce faire, les analyses ont été faites sur l'ensemble des tronçons RHYHABSIM en Nouvelle-Zélande, où des mesures de vitesses ont été faites à un débit sur l'ensemble du tronçon, et sur une collecte restreinte de tronçon EVHA en France où 23 tronçons ont fait l'objet de mesure de vitesses à un débit à l'échelle du tronçon.

De manière générale, les modèles développés prédisent bien les hauteurs d'eau, les largeurs mouillées et les vitesses dans la gamme de taille de cours d'eau étudiés et les modèles internationaux sont aussi performants que les modèles nationaux. Egalement, les modèles intercontinentaux et nationaux sont globalement plus performants que les modèles basiques,

particulièrement pour prédire les hauteurs d'eau. Les paramètres de géométrie hydraulique longitudinale sont bien prédits quel que soit le pays et l'analyse de l'importance des variables explicatives a montré des similitudes quant aux variables dominantes dans la prédiction des paramètres. Ces similitudes sont globalement cohérentes avec les précédentes études de géométrie hydraulique longitudinale (par exemple Faustini et al., 2009 ; Wilkerson et al., 2014). Par contre, les paramètres de géométrie hydraulique stationnelle sont moins bien prédits et peu de similitudes ont été observés dans les relations avec les variables explicatives entre les pays. Malgré certaines limites de l'étude, ces résultats sont satisfaisants et des prédictions des caractéristiques hydrauliques peuvent désormais être faits sur l'ensemble du réseau hydrographique français et néo-zélandais.

Article 3

Intercontinental predictions of river hydraulic geometry from catchment physical characteristics

Intercontinental predictions of river hydraulic geometry from catchment physical characteristics

Maxime Morel^a, Doug J. Booker^b, Frédéric Gob^c, Nicolas Lamouroux^a

^a Irstea, UR RiverLy, Centre de Lyon-Villeurbanne, Villeurbanne, France

^b National Institute of Water and Atmospheric Research, P O Box 8602 Riccarton, Christchurch, New-Zealand

^c Université Paris 1-Panthéon-Sorbonne, CNRS, Laboratoire de Géographie Physique, France

Abstract

Hydraulic geometry is used to describe spatio-temporal variations in wetted width, mean depth and mean velocity with discharge in stream reaches. Models describing downstream (spatial variations) and at-a-station (temporal variations) hydraulic geometry are required for efficient and effective management of flow regimes, sediment and nutrient transport, and physical habitats at catchment to global scales. Data describing observed hydraulic conditions at 1327 stream reaches in France and New Zealand were compiled alongside reach descriptors and upstream catchments extracted from available GIS databases with nationwide coverage. Three contrasting empirical methods were developed to predict hydraulic geometry at unvisited sites. The first method applied basic models in which downstream hydraulic geometry parameters depend on discharge only. The second method applied separate country-specific models whose predictors were selected from the available nationwide GIS data from country. The third method applied an intercontinental model in which all observed hydraulic data were lumped together and predictors were selected from those available across both countries. Flexible regression models that account for interactions were used to parameterize second and third methods. Cross-validation tests showed that downstream parameters were well predicted for independent sites regardless of country. Model performance was higher for width than for depth. At-a-station parameters were less well predicted than downstream parameters, but the models provided satisfactory predictions of observed reach hydraulics. Importantly, the lumped intercontinental model performance was comparable to that of the country-specific models. This suggests that our approach can be applied in other regions where similar explanatory environmental variables are available.

Keywords: Reach hydraulic geometry; river modelling; river hydraulics; random forests; catchment management

Highlights

We analyzed hydraulic data from 1327 reaches in France and New Zealand.

We developed hydraulic geometry models based on catchment physical characteristics

General intercontinental models perform as well as country-specific ones

Our models will be useful for physical and ecological catchment models

1. Introduction

River hydraulics influence most patterns and processes in river networks including nutrient and pollutant fluxes, water temperature, sediment transport rates, physical habitats, biodiversity and ecosystem services (Statzner et al., 1988). Quantitative spatial and temporal variations in river hydraulic characteristics (e.g., wetted width, water depth, current velocity) across stream networks is therefore a key input for catchment management (Maddock, 1999). Quantified relationships between river flow and hydraulic conditions are required when estimating the potential impacts of flow alteration on aquatic habitat for fishes (Malcolm et al., 2012), invertebrates (Doledec et al., 2007), macrophytes (Riis and Biggs, 2003), and periphyton (Hoyle et al., 2017). Several studies have used estimations of river hydraulics distributed over large catchments for modelling water temperature (Beaufort et al., 2016), nutrients fluxes (Dupas et al., 2013) or habitat alterations due to water abstraction (Snelder et al., 2011a; Miguel et al., 2016). Such spatially explicit catchment-scale models will be increasingly needed for guiding management actions given the expected modifications of the hydrological regime due to climate change (Milly et al., 2005; Marx et al., 2018).

Large-scale variations in river hydraulics are often represented by two types of hydraulic geometry relationships (Leopold and Maddock, 1953). “At-a-station hydraulic geometry” describes how hydraulic characteristics change with discharge rate, over time, at a given location. “Downstream hydraulic geometry” describes how hydraulic characteristics change longitudinally, in space, at a characteristic reference flow such as the median or the bankfull flow (e.g., Lee and Julien, 2006). Most hydraulic geometry models have been developed and applied at the scale of individual river cross-sections (Knighton, 1998). However, some recent studies have considered reach-scale hydraulic geometry, where a river reach corresponds to

approximately 10-20 channel widths in length and includes several sequences of geomorphic units such as pools and riffles (Jowett, 1998; Lamouroux and Capra, 2002; Stewardson, 2005; Lamouroux, 2008; Navratil and Albert, 2010). Reach-scale hydraulic geometry may be easier to understand and to predict than cross-section scale hydraulic geometry, because the reach-scale averaging of cross-section data smooths out complicated local variations (Stewardson, 2005). Following the formulations of Leopold and Maddock (1953), many authors have expressed variations in reach-average hydraulic characteristics as a function of discharge rate as:

$$W = aQ^b \quad (1)$$

$$H = cQ^f \quad (2)$$

for “at-a-station” relationships, and:

$$W50 = a_d Q50^{b_d} \quad (3)$$

$$H50 = c_d Q50^{f_d} \quad (4)$$

for downstream relationships, where W and H are, respectively, the reach-averaged wetted width and water depth at instantaneous discharge Q ; $W50$ and $H50$ are reach-averaged wetted width and water depth at reference discharge, here chosen as the median daily discharge $Q50$. Parameters a, b, c, f and a_d, b_d, c_d, f_d are the hydraulic geometry coefficients and exponents.

Because W and H increase monotonously with Q at-a-station (Equations 1-2), $W = W50$ and $H = H50$ when $Q = Q50$. Therefore, Equations (1-2) can be reparametrized as:

$$W = W50 \left[\frac{Q}{Q50} \right]^b \quad (5)$$

$$H = H50 \left[\frac{Q}{Q50} \right]^f \quad (6)$$

It is notable that the reach-averaged velocity can be approximated from discharge, average depth and wetted width (Lamouroux, 2008; Stewardson, 2005) by:

$$V = Q/(WH) \quad (7)$$

where V is the reach averaged velocity at a given discharge Q and associated width and depth.

Exponents of hydraulic geometry relationships vary over similar ranges in different geomorphic contexts (e.g. Knighton, 1998). Mean exponents values across locations approximate $b = 0.14$, $f = 0.3$, $b_d = 0.5$ and $f_d = 0.36$ (Knighton, 1998). However, large variations occur between locations, due to the influence of factors other than discharge rate alone (Dingman, 2007). Downstream hydraulic geometry variations have been well documented in the literature (e.g. De Rose et al., 2008; Eaton, 2013; Gleason, 2015; Huang and Nanson, 1998) and have been related to factors such as bed material size, texture and strength of bank materials, stream slope or the nature of the riparian vegetation. At-a-station hydraulic geometry is generally more difficult to predict but should theoretically depend on cross-section shape, bankfull geometry and flow resistance (Dingman, 2007). This is consistent with Morel et al. (2019) who found that the at-a-station reach-scale exponent for width was well explained by longitudinal and lateral channel shape descriptors; the depth exponent was less explained and related to both lateral channel shape and roughness.

Several empirical studies have attempted to model the hydraulic characteristics W , H and V of stream reaches across large areas (i.e. over national hydrographic networks or large catchments) by relating observed hydraulic patterns to discharge and a series of physical variables available from Geographic Information System (GIS) with national coverage. For example, Booker and Dunbar (2008) developed a method for predicting cross-sectional wetted width, water depth and current velocity in England and Wales. Booker (2010) proposed a method to predict wetted width at any discharge across the hydrographic network of New Zealand from several nationally available variables describing landscape settings. However, these empirical studies did not clearly report the ability of the models to explain at-a-station and downstream variations, and models have not been tested on international data sets where the correlations between explanatory variables of hydraulic geometry can be more varied and complex.

Empirical methods used to model hydraulic geometry from GIS variables were often based on statistical regressions (e.g. linear regression model, multilevel models). Such models are not able to describe flexible response forms, due to constraints associated with mathematical linearity. Moreover, such models may be sensitive to outliers and make implicit assumptions on data distributions that are not always verified. The use of recent machine learning approaches such as artificial neural networks (Hornik et al., 1989), support vector machines (Vapnik, 1998) and random forests (RF, Breiman, 2001) can provide more flexible predictive models with good predictive performance. In particular, RF comprises groups of regression trees that produce

robust ensemble predictions. They have been successfully applied for classification and regression studies in many different fields, for example to predict grain size distributions in rivers (e.g. Haddadchi et al., 2018) or habitat suitabilities for aquatic species (Snelder et al., 2011a, Booker, 2016). RF provides a measure of the relative importance of each predictor variable.

In this study, we use RF models to develop and test international empirical models of reach-scale hydraulic geometries that can be applied across entire stream networks. We develop several models of W and H based on Equations (5-6), using unique hydraulic data collected in 1202 stream reaches in France and 125 in New Zealand. All models are two-step models that first estimate b and f exponents in Equations (5-6), then estimate reach hydraulic characteristics ($H50$, $W50$) at median flow ($Q50$). Our first “Basic” method considers b and f exponents as constants (i.e. neglects at-a-station variations) and uses $Q50$ as the unique explanatory variable. In our second “Country-specific” method, hydraulic geometry parameters depend on different GIS-derived explanatory variables available in each country. Our third “Intercontinental” method uses similar GIS variables available in both countries. We compare how these alternative methods explain observed width and depth, and at-a-station vs. downstream variations. This comparison aims to: 1) assess the added value of complex models (i.e. Country-specific and Intercontinental methods) compared to simple ones (i.e. Basic method); 2) assess the possibility to develop general models that can be applied intercontinentally; 3) infer the dominant variables explaining hydraulic geometry parameters across a wide range of climates and topographies. Using data on velocity in part of our reaches, we also test how our models for width and depth can predict reach-averaged velocities with Equation (7).

2. Method

2.1. Hydraulic data

Reach hydraulic measurements were collected in continental France and in New Zealand and spread over the entire territory in both countries (Figure 1) providing wide variations in terms of geomorphic contexts (Table 1). Hydraulic data come from four distinct sources. French data come from applications of the river statistical habitat model ESTIMHAB ($n = 415$ reaches, Lamouroux, 2002; based on Lamouroux and Capra, 2002), applications of the French national tool for characterization of the river hydromorphology CARHYCE ($n = 764$ reaches, Gob et al., 2014) and applications of the numerical habitat model EVHA ($n = 23$; Ginot, 1998;

Lamouroux et al.,1995). New Zealand data came essentially from application of the river habitat model RHYHABSIM (n = 125 reaches, see Jowett et al., 2008 and Booker, 2016 for further details).

Table 1: Main characteristics of the studied reaches

Symbol	Description	France			New-Zealand		
		Min.	Median	Max.	Min.	Median	Max.
<i>usCA</i>	Catchment area (km ²)	3	79	3728	1	50	3088
<i>segSlope</i>	Average segment slope (m/km)	0.001	10.400	164.200	0.001	30.300	110.000
<i>Q50</i>	Median discharge (m ³ /s)	0.010	0.576	70.458	0.005	0.778	41.378
<i>Strahler</i>	Strahler stream ordination	1	3	5	1	4	7

ESTIMHAB is mainly used to predict availability of suitable physical habitat for different fish species within stream reaches and requires the measurement of reach depth and width at two contrasting discharge rates, generally below *Q50*. CARHYCE (Baudoin et al., 2017) is a tool designed for the implementation of the European Water Framework Directive (WFD) regarding the geomorphic quality of rivers. It has been applied at a large number of river reaches in France. Its application also includes measurements of average depth and width at reach scale. In most cases (n = 685/764), CARHYCE has been applied at a single discharge rate; however, some reaches (CARHYCE+ reaches, n = 79/764) have been surveyed at two different discharges; generally below *Q50*. EVHA is a numerical habitat model (containing a one-dimensional hydraulic model) mainly used to evaluate the physical habitat of fish species; its application requires detailed measurements of point depth, width and water column velocity across the reach at one discharge. Similar to EVHA, RHYHABSIM is used for predicting the availability of suitable physical habitat for different fish species; its application requires measurement of point depth, width and depth-averaged velocity across the reach at one discharge. However, with RHYHABSIM data, repeated surveys of water surface level at several cross-sections and for several discharge rates make it possible to construct stage-discharge relationships for each cross-section and to extrapolate reach width and depth at several discharges. Following Booker (2016), reach-averaged hydraulics was extrapolated from these measurements for 20 increments of flow between the percentile *Q90* (i.e. daily discharges exceeded 90% of the time) and *Q50* as estimated from the ungauged-site flow duration curves developed and tested by Booker and Woods (2014).

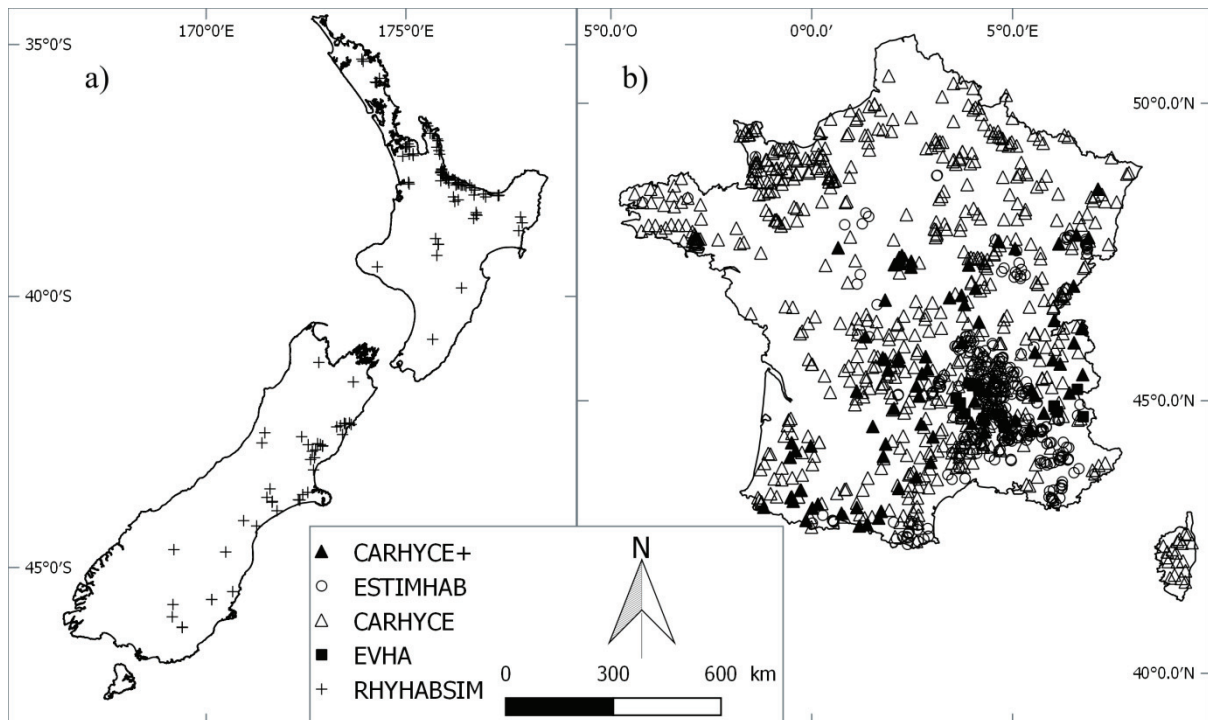


Figure 1: Spatial distribution of studied reaches in a) New Zealand and b) France .

All sources of data concerned reaches whose morphology was not directly altered (e.g., by channelization, reshaping or embankment) according to the expertise of the data collectors, although such expertise is always debatable in European rivers that all have some degree of historical alteration (see Discussion section below). By contrast, data sources had varying degrees of hydrological regulation, from no alteration (CARHYCE+ reaches) to “moderate” alteration (i.e., no influence of abstraction according to the expertise of data collectors, other CARHYCE reaches) to undocumented but potentially high alteration (most ESTIMHAB, RHYHABSIM and EVHA reaches were downstream of hydropower dams). We used these groups to test *a posteriori* if our results were influenced by different degrees of hydrological regulation.

All four sources of data share similarities in field measurement protocols. For all sources, c.a. 15 cross-sections were placed along the reach with a regularly spacing for CARHYCE and ESTIMHAB (at spacings equal to average bankfull width and larger than average wetted width respectively) but not necessary regular for EVHA and RHYHABSIM (cross-section locations were selected in order to best represent the reach morphology in view of the hydraulic modelling). At each cross-section, wetted width was measured, and water depths were measured along the cross-section at regularly spaced points along the cross-section except for EVHA and RHYHABSIM protocols in which water depths are generally regularly spaced with

extra points placed to represent rapid changes in bed height. EVHA and RHYHABSIM also include measurements of water velocity in their protocols. For reaches without regularly spaced cross-sections and/or water depths spacings, each point depth and width measurement was weighted by wetted area it represented as appropriate for estimating reach-average hydraulics.

Surveys at different discharge rates were associated with data of ESTIMHAB and RHYHASIM, as well as CARHYCE+ applications. For all sources of data, surveyed discharges were generally below $Q50$ and the reach measurement provided on average of 15 wetted widths and 120 water depths. Details of four sources of data are given in Table 2.

Table 2: Summary of the four sources of data.

Source	Country	Number of reaches	Number of cross-sections	Hydraulic characteristics measured	Regularity in spacing	Number of surveys
ESTIMHAB	France	415	9-26	W, H	Yes	2
EVHA	France	23		W, H, V	No	1
RHYHABSIM	New Zealand	125	4-42	W, H, V	No	2 to 9
CARHYCE	France	764	11-25	W, H	Yes	1 (2 for 79 CARHYCE+ reaches)

2.2. GIS data

Stream networks of France and New Zealand have been digitalized into national geographic information databases RHT (Réseau Hydrographique Théorique; Pella et al., 2012) and REC (River Environment Classification; Snelder and Biggs, 2002), respectively. Both river networks have a similar construction. REC was derived from a 30-m digital elevation model (DEM) and comprises 560 000 stream segments with a mean length of ~ 700 m. In the same way, RHT was created from a 50-m DEM and comprises about $\sim 115\ 000$ stream segments with a mean length of 2.5 km. Both databases include environmental descriptors for all river segments in both countries. Available descriptors include hydrological indices (Sauquet and Catalogne, 2011; Booker and Woods, 2014; for the RHT and the REC, respectively) produced from hydrological models that utilise catchment characteristics such as catchment area, segment slope, landcover and geology, and tested against observations from dense gauging station networks. However, uncertainties are associated with the attributes of the databases (see Discussion section below).

Potential predictors of the hydraulic geometry parameters were derived from RHT and REC. Over 36 variables in New Zealand and 16 variables in France were associated to each reach. See Table 3 for a list of variables selected for each country. Both databases have their own

variables describing climate (i.e. precipitation, hydrology and temperature characteristics), geomorphology, land cover and bedrock geology. However, catchment area (*usCA*), mean average catchment slope (*usAveSlope*), segment slope (*segSlope*), segment average altitude (*segAltitude*), specific median flow (*SpeQ50*), Strahler stream ordination (*Strahler*) and a geological index describing substrate hardness (*usHard*) were all described in the same form in France and New Zealand (see Snelder et al., 2008 and Leathwick et al., 2003).

1 Table 3: Explanatory variables from RHT and REC databases. Variables in bold are common in both countries. ^L refers to log transformation applied for the
 2 models. ^R refers to square root transformation applied for the models.

	France		New Zealand	
Description	Parameters	Unit	Parameters	Unit
Topography				
Proportion of catchment with slope < 30°	<i>usSteep</i>	%/100		
Mean slope of the whole catchment area	<i>usAveSlope^R</i>	m/km	<i>usAveSlope^R</i>	m/km
Distance of the segment to the coast		km	<i>dsDistToSea</i>	km
Distance of the segment from headwater	<i>segDistHead^R</i>	km		
Morphology				
Upstream catchment area	<i>usCA^L</i>	km²	<i>usCA^L</i>	km²
Average segment slope	<i>segSlope^R</i>	m/km	<i>segSlope^R</i>	m/km
Average elevation of the segment	<i>segAltitude^R</i>	m	<i>segAltitude^L</i>	m
Mean drainage density of the watershed (km/km ²) for the upstream watershed of each segment	<i>usDrainDens</i>	km/km ²		
Flow				
Median discharge	<i>Q50^L</i>	m³/s	<i>Q50^L</i>	m³/s
Number of events per year exceeding three times the median flow based on mean daily flows, with no windows to account for successive events applied.			<i>FRE3</i>	events/yr
Median flow per unit catchment area	<i>SpeQ50^L</i>	m³/s/km²	<i>SpeQ50^L</i>	m³/s/km²
Mean annual low flow per unit catchment area (annual minimum monthly flow with 5 year return period)	<i>SpeLowFlow^L</i>	m ³ /s/km ²		
Mean annual flood discharge per unit catchment area (instantaneous peak discharges with 10 year return period)	<i>SpeAnnualFloodFr^L</i>	m ³ /s/km ²		
Mean annual flood (derived from mean daily flows) per unit catchment area			<i>SpeAnnualFloodNz^L</i>	m ³ /s/km ²
Mean annual low flow per unit catchment area			<i>SpeMALF^L</i>	m ³ /s/km ²
Strahler stream order (1 to 7)	<i>Strahler</i>		<i>Strahler</i>	
Substrate				
Sediment grain sorting			<i>segGrainSort^L</i>	dimensionless
Median sediment grain size			<i>segD50^R</i>	mm
Mean sediment grain size	<i>segDmean^R</i>	mm		
Geomorphologic units			<i>segRiffle</i>	%
Climate				
Average number of days per year within catchment with rainfall intensities > 25 mm/month			<i>usRainDays25^L</i>	Number of days/yr
Average number of days per year within catchment with rainfall intensities > 50 mm/month			<i>usRainDays50^L</i>	Number of days/yr
Average number of days per year within catchment with rainfall intensities > 200 mm/month			<i>usRainDays200</i>	Number of days/yr
Coefficient of variation of annual catchment rainfall			<i>usAnRainVar</i>	mm
Climate categories (Warm-dry; Warm-wet; Warm-extremely wet; Cool-dry; Cool-wet; Cool-extremely wet)			<i>CLIMATE</i>	
Source of flow categories (Glacial mountain; Hill; Low elevation; Lake; Mountain)			<i>SRC_OF_FLW</i>	

	Watershed average maximum rainfall in a 24 hour period with a return period of 10 years.(millimeter, mm) for the upstream watershed of each segment	<i>usRainId^L</i>	mm
	Watershed average annual rainfall (millimeter, mm) for the upstream watershed of each segment	<i>usRainMean^L</i>	mm
Landcover	Proportion of catchment covered by bare ground land cover	<i>usBare^R</i>	%/100
	Proportion of catchment covered by exotic forest land cover	<i>usExoticForest</i>	%/100
	Proportion of catchment covered by indigenous forest land cover	<i>usIndigForest</i>	%/100
	Proportion of catchment covered by mangrove land cover	<i>usMangrove</i>	%/100
	Proportion of catchment covered by miscellaneous land cover	<i>usMiscLandCover</i>	%/100
	Proportion of catchment covered by pastoral land cover	<i>usPastoral</i>	%/100
	Proportion of catchment covered by scrub land cover	<i>usScrub</i>	%/100
	Proportion of catchment covered by tussock land cover	<i>usTussock</i>	%/100
	Proportion of catchment covered by urban land cover	<i>usUrban</i>	%/100
	Proportion of catchment covered by wetland land cover	<i>usWetland</i>	%/100
	Landcover categories	<i>LANDCOVER</i>	
	Proportion of catchment covered by artificial land cover	<i>usArtificial</i>	%/100
Geology	Catchment average of hardness of underlying rocks, 1 = low to 5 = high	<i>usHard</i>	Ordinal scale
	Catchment average of calcium of underlying rocks, 1 = low to 4 = high	<i>usCalc</i>	Ordinal scale
	Catchment average of phosphorous concentration of underlying rocks, 1 = low to 5 = high	<i>usPhos</i>	Ordinal scale
	Area of catchment covered by alluvium land resource inventory	<i>usAlluvium^R</i>	%/100

3

4

2.3. Modelling approach

2.3.1. Estimation of observed $W50$, $H50$, b and f

Our predictions of reach hydraulics (W , H and V) were derived from estimations of the four parameters of Equations (5) and (6): $W50$, $H50$, b and f . Field observations were used to derive estimates of these parameters, noted $W50'$, $H50'$, b' and f' . In reaches with data at several discharge rates, b' and f' were estimated by separately regressing width and depth against discharge (Equations 1, 2). For the reaches with measurements at only one discharge ($n = 685/764$ CARHYCE reaches), at-a-station exponents were approximated by assigning the mean b' and f' values observed in reaches with multiple measurements. Then, in all reaches, we estimated $W50'$ and $H50'$ using:

$$W50' = Ws \cdot (Q50/Qs)^{b'} \quad (8)$$

$$H50' = Hs \cdot (Q50/Qs)^{f'} \quad (9)$$

Where Qs was the measurement discharge closest to $Q50$; Ws and Hs are reach-average wetted width and water depth at Qs .

At-a-station hydraulic geometry relationships are sensitive to sampling error and to the values of the survey discharge rates especially when relationships have been established from few surveys (Stewardson, 2005; Navratil and Albert, 2010). Prior checks were applied on our data sets. For the reaches with multiple measurements, we removed reaches with less than a 66% difference in flow between surveys. Furthermore, we removed sites with suspicious at-a-station exponents values (i.e. not in the range 0-1). We also excluded reaches without known locations and sites with suspicious RHT/REC flow attributes (e.g. when the measured discharge is greater than the estimated high flow percentile $Q05$ or less than the low flow percentile $Q95$ (i.e. daily discharges exceeded 5 and 95% of the time respectively) which can be induced by sampling errors, wrong estimations of flow duration curves in the RHT/REC segment or incorrect location of the site on the river network. Finally, 1304 reaches were collected for downstream hydraulic geometry analyses (764 CARHYCE reaches, 415 ESTIMHAB reaches and 125 RHYHABSIM reaches) comprising 619 reaches in which at-a-station hydraulic geometry was known (79 CARHYCE reaches, 415 ESTIMHAB reaches and 125 RHYHABSIM reaches). The additional 23 EVHA reaches were not considered in the modelling stage and were only used as independent data set to quantify model performance.

2.3.2. Model formulations

In this study, three methods using different model formulations for predicting the four estimated hydraulic geometry parameters $W50'$, $H50'$, b' and f' were applied and compared for both French and New Zealand datasets (see Figure 2 for the general analytical logic). The three methods were:

The first “Basic method” modelled $W50'$ and $H50'$ as a function of $Q50$ and at-a-station exponents b' and f' were considered as constant and their values were the respective mean of the whole dataset. The second “Country-specific” method was based on a model of $W50'$, $H50'$, b' , f' from country-specific GIS data (Table 3). The third “Intercontinental method” fitted each parameter as a function of a selection of environmental variables similar in both databases (Table 3).

This modelling strategy aims to assess the improvement of complex models (i.e. Country-specific and Intercontinental methods) in prediction of reach water depth and wetted width compared to a basic and general hydraulic geometry model (i.e. Basic method). The Intercontinental method represented a universal method. For the Intercontinental method, we made the assumption that the common variables were calculated in the same way and preliminary checks were made to ensure that these variables were defined on the same scale. National estimations of sediment grain size were calculated as a geometric mean of local field measurement for France (*segDmean*, Snelder et al., 2011b) and on 50th percentile of local measurement in New Zealand (*segD50*, Haddadchi et al., 2018). For the Intercontinental method, we considered that both descriptors were similar and we labelled them *segD50* as in New Zealand. Also, Intercontinental method was performed on an unbalanced data set (Table 2) because more sites were available from France than New Zealand, which can potentially affect the fitting and testing procedure. Figure 2 shows a flow chart outlining the strategy used to predict hydraulic characteristics.

The Basic Method was implemented using simple linear regression between both parameters $W50'$ - $H50'$ and $Q50$ (in logarithmic scale). The Country-specific and Intercontinental methods were implemented using RF (Breiman, 2001). An RF model comprises an ensemble of individual classification and regression trees (a forest) from which a final prediction is based on the predictions averaged over all trees (Breiman, 2001; Cutler et al., 2007). A RF model is created by drawing several bootstrap samples from the original training data and fitting a single

classification tree to each sample. Independent predictions (i.e. independent of the model fitting procedure) are made for each tree from the observations that were excluded from the bootstrap sample (the out-of-bag, OOB samples). These predictions are aggregated over all trees (the OOB predictions) and provide an estimate of the predictive performance of the model for new cases. Statistical analyses were performed on R (R Core Team, 2017) and RFs were performed using the package “RandomForest”. VSURF variable selection procedure, from the “VSURF” package, was applied for RF (Genuer et al., 2010, 2015) to obtain the best-performing and parsimonious models. VSURF reduces the number of explanatory variables by applying a step-wise ascendant strategy designed to decrease error rate (see Genuer et al., 2015 for a detailed description of the tool). For each method, natural logarithmic and square-root transformations were applied to data with highly skewed distributions. Transformations applied to each variable are given in Table 3. $W50'$ and $H50'$ were log-transformed and square-root transformation was applied on b' for all data sets.

We used several methods to assess the performance of the different hydraulic geometry parameters models. First, we performed a leave-one-out (LOO) cross-validation procedure by leaving out each observation in turn, fitting a model with all remaining data, and then predicting the value of the left-out observation. This procedure provides an assessment of model performance for unvisited sites. Second, we examined how well our models predicted W and H at any discharge by applying the Equations (5) and (6). In the same way, we examined how well our models predicted V using Equation (7) for data with velocity measurement (11% of our reaches, i.e. 125 RHYHABSIM and 23 EVHA reaches).

We quantified model predictive performance of our LOO predictions using three performance metrics. Nash-Sutcliffe coefficient of model efficiency (NSE) measures residual variance of model predictions relative to the total variance in the observed data (Nash and Sutcliffe, 1970). NSE values can range from negative infinity to 1. NSE values of 1 indicate a perfect match between observed and predicted values. NSE values less than 0 indicate that the observed mean is more accurate than model predictions. NSE values of 0 indicate that model predictions is as accurate as the mean of the observed data.

Percent bias (pbias) is the ratio of the sum of the hydraulic parameters residual to the sum of the observed hydraulic geometry parameters and was used to estimate the tendency of the models to overpredict (negative pbias) or underpredict (positive pbias) the observed data (Gupta et al., 2009).

As error index, we used the RMSE-observations standard deviation ratio (RSR) which standardises root mean square error (RMSE) using the observations standard deviation. Lower RSR values indicate better model performance, with zero indicating perfect correspondence between estimates and observations. See Moriasi et al. (2007) for further details about calculation and complementarity of these metrics when comparing observed and predicted values.

In order to examine the nature of the RF models we used partial dependence plots and importance measures. Partial dependence plots show the marginal effect of an individual explanatory variable on the response, after fixing the other explanatory variables at their average value. Partial dependence plots are designed to demonstrate the influence of each explanatory variable independent of changes in all other explanatory variables. Whilst these graphs are not a perfect representation of the effects of each variable, particularly if there are strong interactions or explanatory variables are correlated, they do provide useful information for interpretation (Friedman and Meulman, 2003). Importance of a specific explanatory variable is evaluated by randomly permuting explanatory variable values in turn and predicting the response of OOB observations (Booker and Whitehead, 2018; Ellis et al., 2012). In order to check the consistency in the contribution of the explanatory variables to model accuracy and the response of each hydraulic geometry parameter to the explanatory variables, we inspected the importance measures and the partial plots for each of these models.

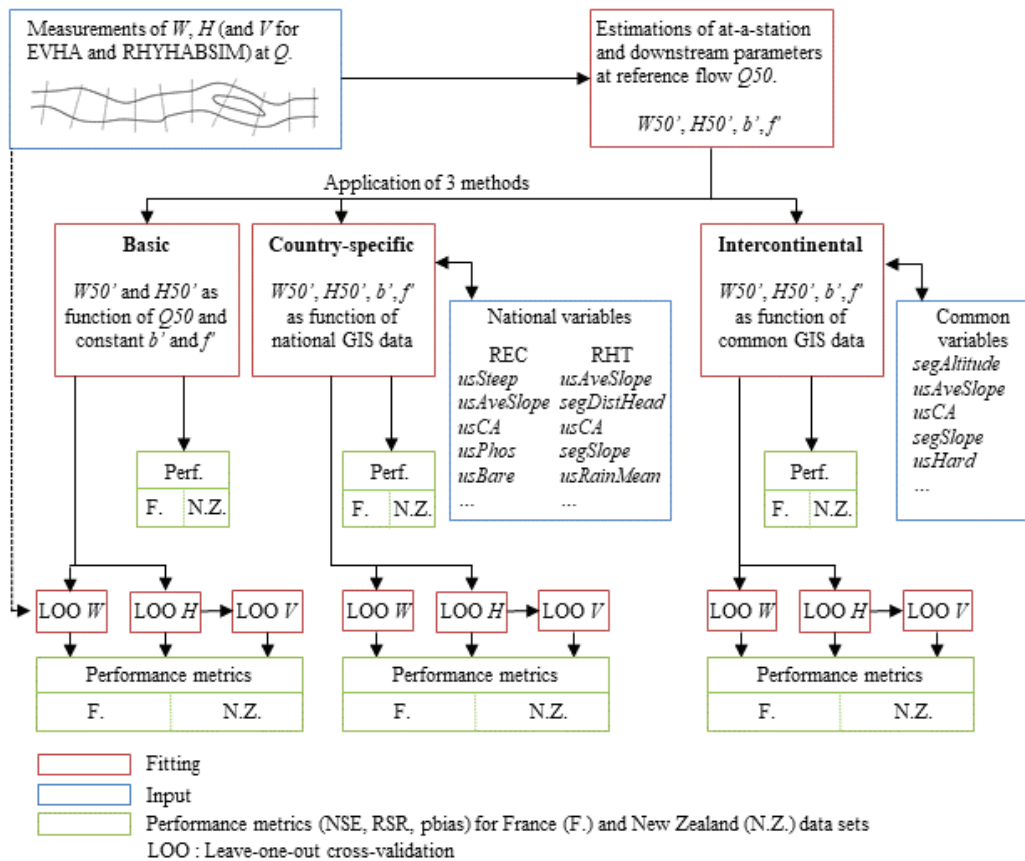


Figure 2: Graphical representation of methods applied in this study for obtaining and testing hydraulic predictions.

3. Results

3.1. Hydraulic geometry parameters models

Summary statistics describing the LOO cross-validation performance of the three methods for the four hydraulic geometry parameters were presented in Figure 3. For W_{50}' and H_{50}' , performance metrics were calculated between log-transformed observed vs. predicted values (Figure 3 and Figure 4); and between the square-root transformed observed vs. predicted values for the b' parameter.

For W_{50}' models, NSE values of French and New Zealand models were both high (i.e. $0.80 < \text{NSE} < 0.90$) and represented strong ability of the models to represent observed patterns at unvisited sites. NSE values of the Country-specific and Intercontinental methods were comparable and presented relatively small increase from the Basic method. Lowest RSR values were observed on W_{50}' models ($0.32 < \text{RSR} < 0.44$) regardless of the method. RSR values were

relatively lowest for New Zealand models regardless of method. Both countries presented a highest value of RSR for the basic method. French and New Zealand models of $H50'$ shared similarities in terms of NSE values ($0.42 < \text{NSE} < 0.67$) and both Country-specific and Intercontinental methods presented higher values than the basic method. As for $W50'$, the Country-specific and Intercontinental methods had comparable values of NSE. $H50'$ models shared relatively correct RSR values ($0.57 < \text{RSR} < 0.76$) without particular distinction between French and New Zealand models. The Basic method presented higher RSR values than the two others methods for both countries.

In Comparison with the previous downstream parameters, at-a-station exponent models presented low NSE values. NSE values of exponent b' models ranged between -0.01 and 0.34, representing relative poor explanatory power. Higher values were observed in models of Country-specific and Intercontinental methods. For New Zealand models, NSE value was higher when the Country-specific method was applied in comparison to when the Intercontinental method was applied (i.e. 0.28 and 0.17, respectively). For France, NSE values remained constant between both methods (i.e. 0.34 and 0.31 for the Basic and Country-specific methods, respectively). NSE values of f' models ranged between -0.01 and 0.13 and global results shared the same pattern as that for b' models (i.e. NSE values are higher for models of the Country-specific and Intercontinental methods, New Zealand models presented higher value in the Country-specific method than the Intercontinental method and French models of both Country-specific and Intercontinental methods were similar). Both exponents models also presented RSR values close to one ($0.81 < \text{RSR} < 1.01$ and $0.93 < \text{RSR} < 1.00$ for b' and f' respectively). Globally both exponents shared a similar pattern with a decrease of RSR values for models of the Country-specific and Intercontinental methods compared to the Basic method. No important between-country differences in RSR values were observed, although relatively smaller RSR values for b' and f' exponents models of the Country-specific method were evident for New Zealand.

Negligible biases were observed in our models regardless of the method and the country for all four parameters ($-2.1\% < \text{pbias} < 2.2\%$). Generally, pbias values close to zero indicate that the average tendencies of simulated variables estimated by the models were close to the respective observed hydraulic geometry parameters. However, high RSR values of b' and f' models demonstrate large variance in predicted variables.

Variable importance was calculated for each explanatory variable for each response that was generalised using random forests (Figure 5). $Q50$ was the most important explanatory variable for both French and New Zealand models of $W50'$ when the Country-specific method was applied. The hydrological descriptors $SpeQ50$ or $SpeAnnualFloodFr$ and the climatic descriptors $usRainMean$ and $usRainId$ presented similar importance values, indicating that their overall influence on the French model of $W50'$ was comparable. For the New Zealand model of $W50'$, catchment size descriptor $usCA$ was also an important variable. The variables $Q50$, $usCA$ and, to a lesser extent, $segSlope$ and $usRainDays25$ are the variables which contributed the most to the Country-specific New Zealand model of $H50'$. A similar pattern was found for the French model of $H50'$ in which $Q50$ and $segSlope$ were the strongest variables, followed by $segAltitude$, $usAveSlope$ and $SpeQ50$. For the at-a-station exponents, similarities in variable importance were not as evident as for the downstream parameters. For the New Zealand model of exponent b' , $segD50$, $segRiffle$ and $usBare$ were the only variables selected in the preliminary variable selection procedure. More variables were retained for the French model of exponent b' , although $usAveSlope$ and $segAltitude$ were the most important. The variable selection procedure retained only three variables for the New Zealand model of f' ($usCA$, $segGrainSorting$ and $usBare$). A similar pattern was not found for the French model of f' , for which $usRainId$ and $usDrainDens$ had the higher importance.

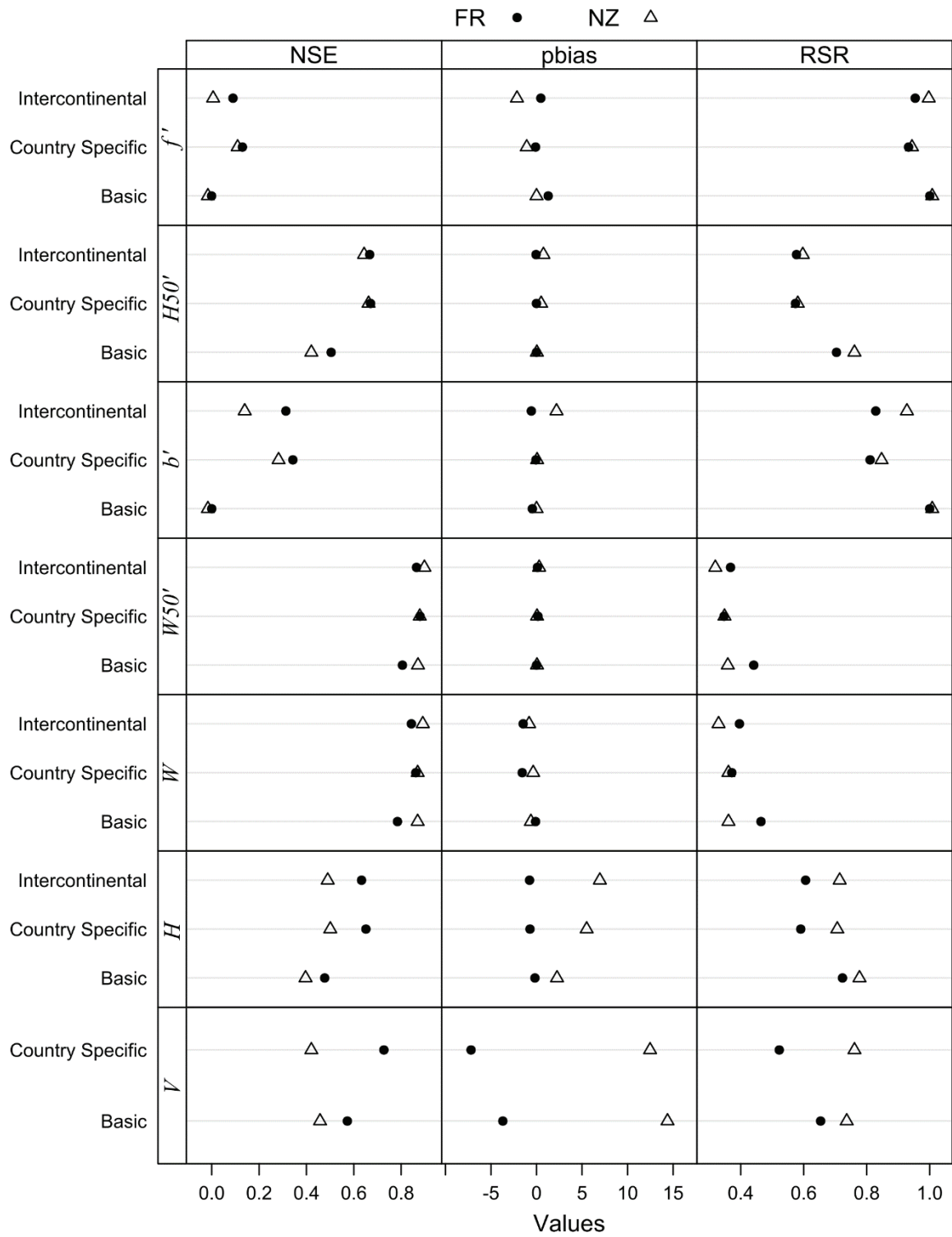


Figure 3: Predictive performance from LOO cross-validations of the three methods for the French (FR) and New Zealand (NZ) data sets.

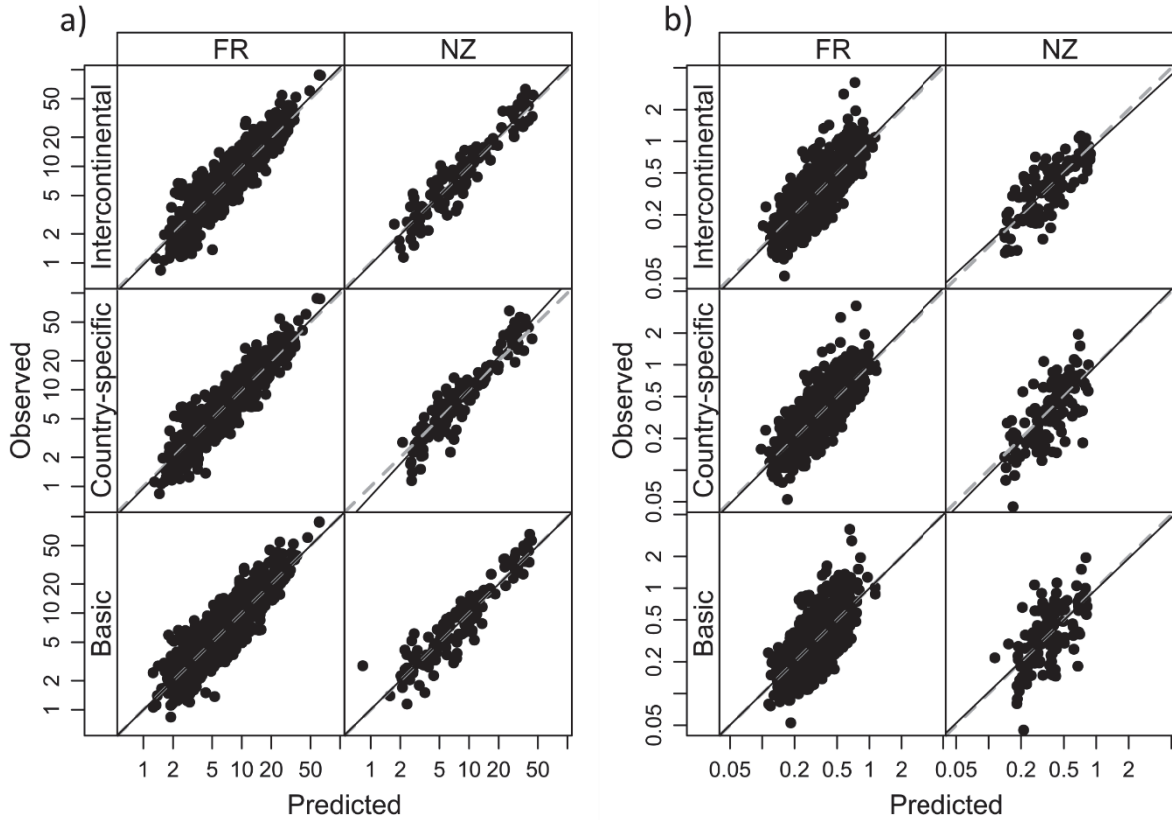


Figure 4: Examples of observed against LOO predicted values of $W50'$ (a) and $H50'$ (b) parameters calculated using different methods. FR and NZ refer to French and New Zealand data sets respectively. Grey dashed line represents 1:1. Solid line is a linear regression.

Variable importance displayed a high level of generality and agreement with the Intercontinental models. $Q50$, $segD50$ and $SpeQ50$ had high importance for the $W50'$ model. $Q50$, $segSlope$ and $usAveSlope$ were the most important variables for the $H50'$ model. Such similarities were not found for the f' exponent model, for which only $Q50$, $usAveSlope$ and $usCA$ were pre-selected. For the b' exponent model, no particular similarity with the Country-specific models was found in terms of variable importance except for the contribution of $segSlope$ and $segD50$.

Despite the specificities in terms of importance of explanatory variables of French and New Zealand models, downstream hydraulic geometry parameters showed similar responses to the explanatory variables (Figure 6 and Figure 7). Partial dependence plots suggested that relationships between $W50'$ and the 3 most important variables were frequently linear after variable transformation and similar in form both models. For example, the partial dependence plots indicated that $W50'$ increased with increasing of hydrological descriptors $Q50$, $SpeQ50$ and $SpeAnnualFloodFr$ and with increasing of catchment size ($usCA$). Furthermore, these

relationships were also observed in the Intercontinental model (Figure 8). In the same way, $H50'$ had also positive relationships with catchment size ($usCA$) and hydrological ($Q50$) descriptors and declined with morphological descriptors such as $segSlope$, $usAveSlope$ or $segAltitude$ in both Country-specific models and also in the Intercontinental model. No such relationships were observed regarding the at-a-station exponents. It was notable that b' showed a similar response to the variable describing the average bed sediment grain size ($segD50$) in New Zealand and the Intercontinental model. This response was characterized by an increase of b' as grain size increase (Figure 6 and Figure 8). Also, partial dependence plots indicated that b' was positively related to the mean slope of upstream catchment ($usAveSlope$) in French Country-specific model and Intercontinental model. Concerning f' , partial dependence plots did not indicate similar relationships between our models.

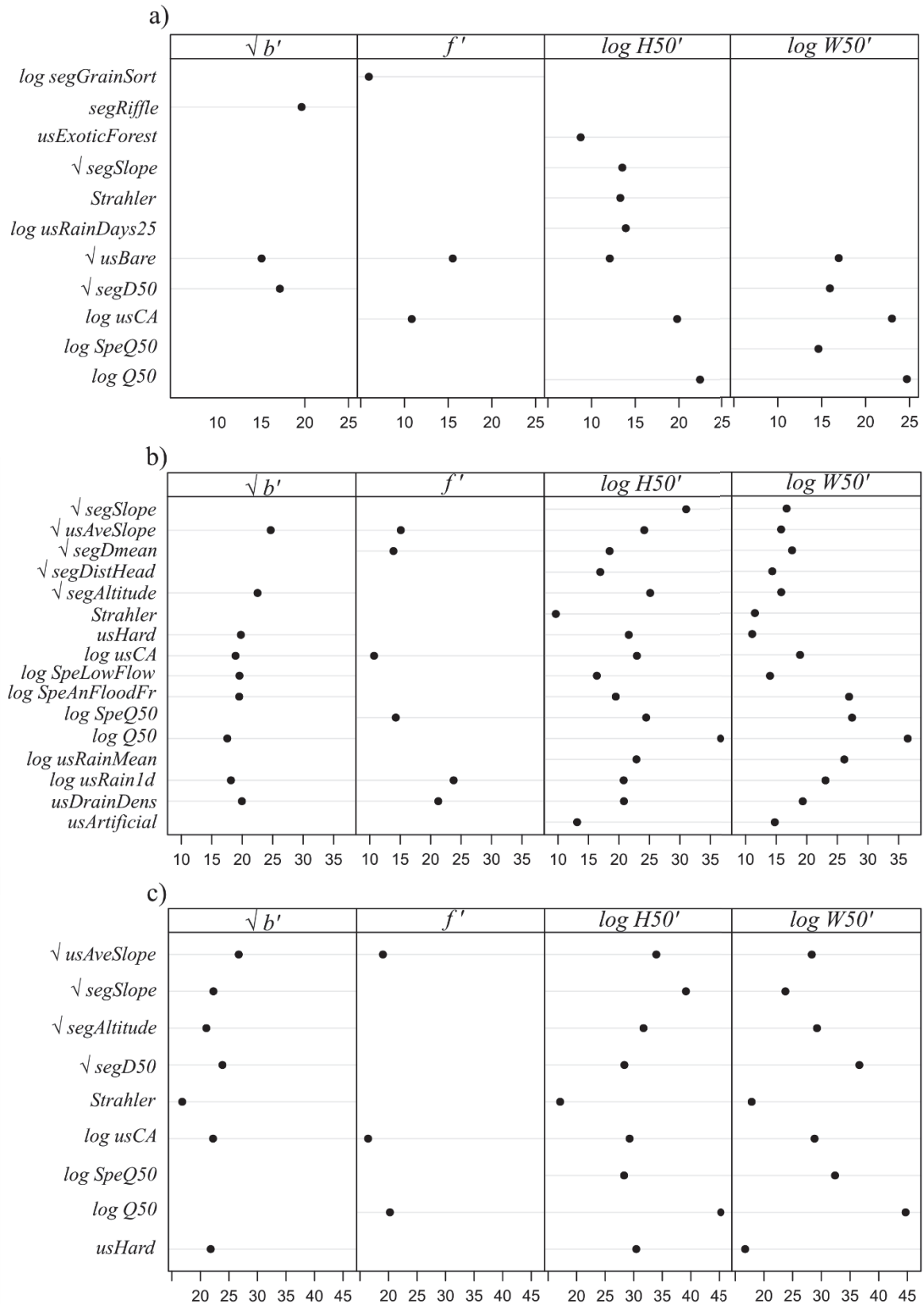


Figure 5: Variable importance measures (mean decrease in accuracy) for New Zealand (a); France (b)

and intercontinental (c) models. Only variables selected at the prediction step of VSURF procedure are showed.

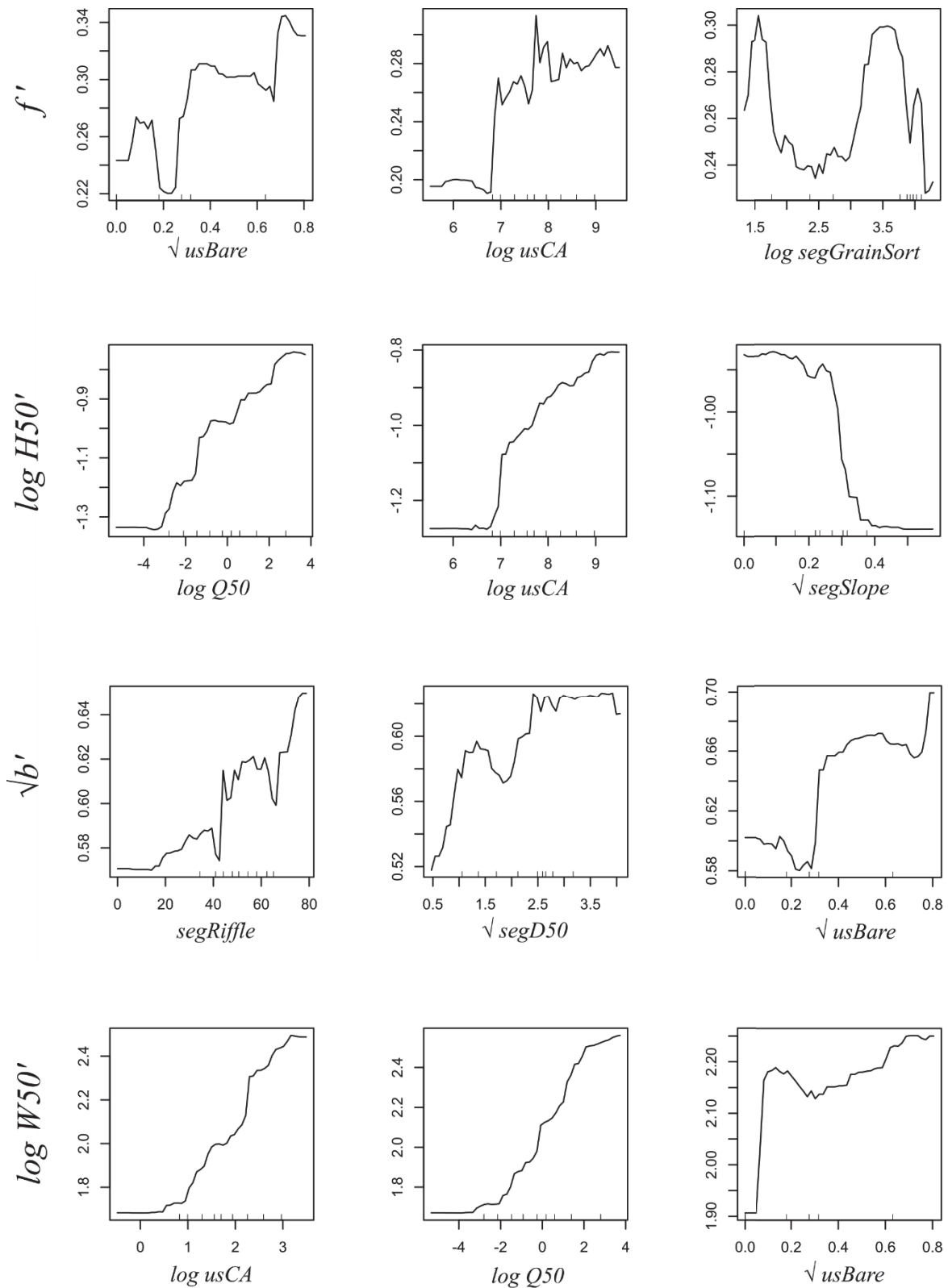
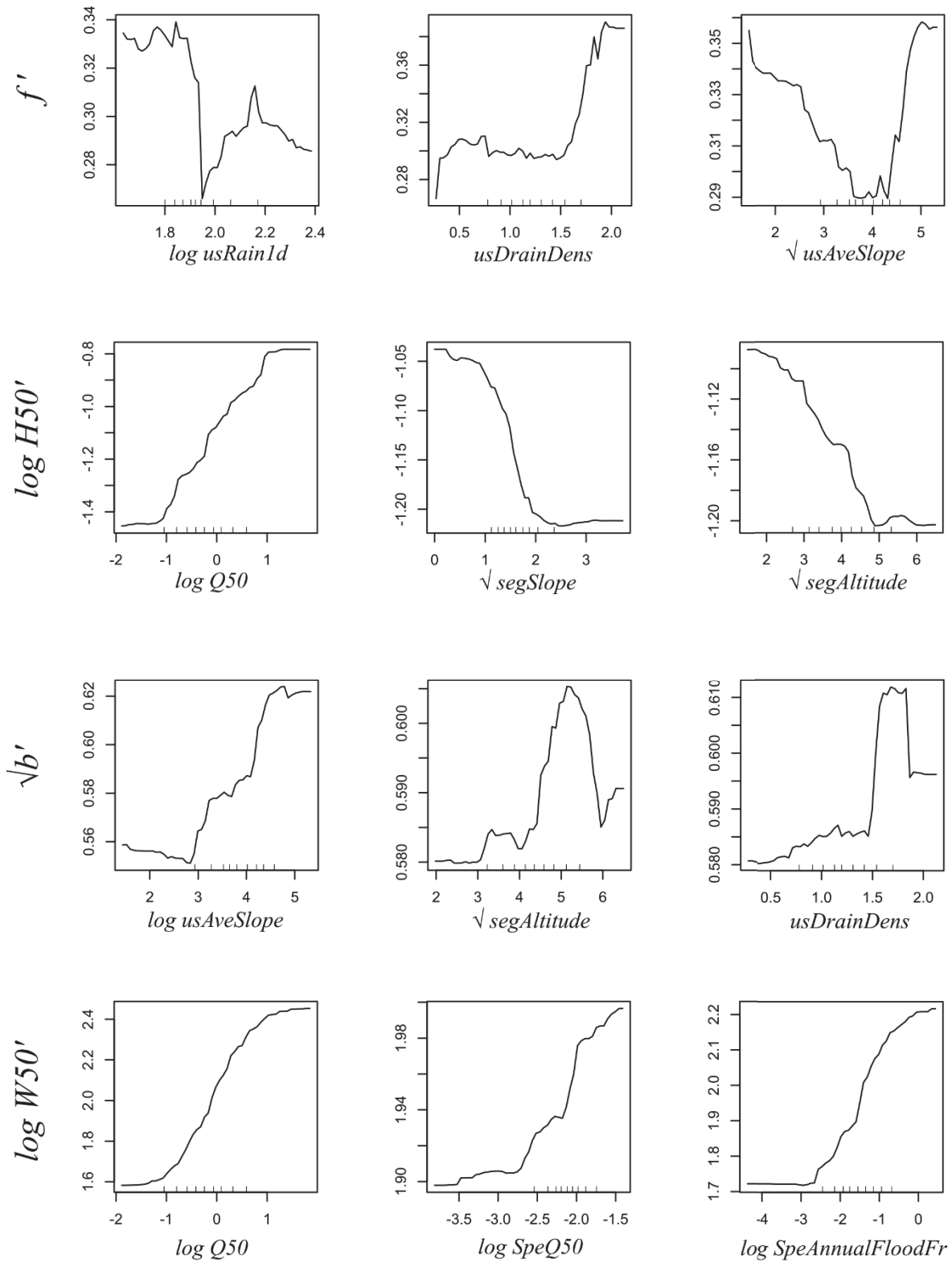


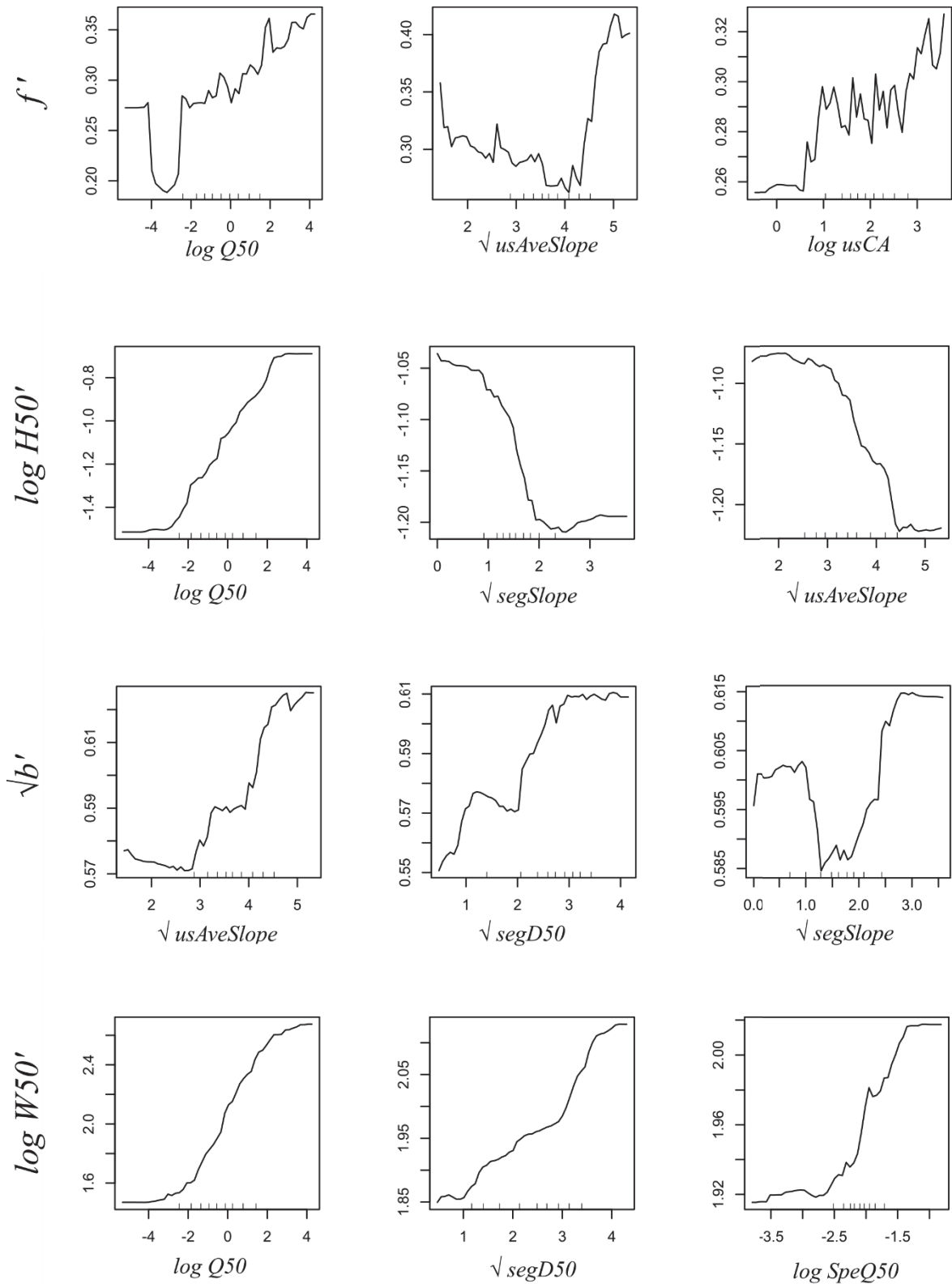
Figure 6: Partial dependence plots from the hydraulic geometry parameter models using the Country-specific method for the New Zealand reaches. Plots show the relationships between the three most

important explanatory variables and the four hydraulic geometry parameters. Plots illustrate the smoothed (Tukey's Running Median, Tukey, 1977) marginal effect of each explanatory variable on the response, after fixing the other explanatory variables at their average value.



1

2 Figure 7: Partial plots from the hydraulic geometry parameter models of the Country-specific method
 3 for the French reaches. Plots show the relationships between the three most important explanatory
 4 variables and the four hydraulic geometry parameters.



5

6 Figure 8: Partial plots from the hydraulic geometry parameter models of the Intercontinental method.
 7 Plots show the relationships between the three most important explanatory variables and the four
 8 hydraulic geometry parameters.

3.2. Models testing

We assessed the effectiveness of our three different methods for predicting W , H and V at each reach on each survey. Cross-validated performance metrics between observed and predicted log-transformed W , H and V were calculated for each method. Summaries of the performance of these models are shown in Figure 3. Predictions of W performed well regardless of the method and the country. NSE values ranged between 0.83 and 0.89, RSR values ranged between 0.33 and 0.41 and biases were negligible ($-0.8\% < \text{pbias} < 1.3\%$). Intercontinental and country-specific models provide slightly better performance than the basic model.

H predictions performances were variable between countries and methods. NSE values obtained from New Zealand models were substantially lower than French values regardless of method; values ranged from 0.40 to 0.50 for New Zealand models and from 0.56 to 0.75 for French models. Similarly, RSR ranged from 0.78 to 0.71 for New Zealand and from 0.70 to 0.50 for France. Notable biases were observed on New Zealand predictions for the Country-specific and Intercontinental methods (pbias values of 5.5% and 7.0% for Country-specific and Intercontinental method respectively) compared to the Basic method (pbias value of 0.0%). Inversely, pbias values obtained on French predictions were negligible except for Basic method (pbias value of 10.0%).

V predictions presented similar performance to that of the H predictions. Performance was better for RF-based models, although New Zealand predictions were less well predicted than French predictions. Globally, predictions obtained with the Country-specific and Intercontinental methods corresponded better with observations than when the Basic method was applied, especially for H and V predictions. Although predictions for New Zealand sites were less well predicted and presented more bias and errors than for French sites. When extrapolating our models to the national scale, for example with French Country-specific models, our models predict that 17% of rivers are larger than 10 m, 14% are deeper than 0.5 m and 47% have velocity higher than 0.2 m/s across French river network at median flow Q_{50} (Figure 9).

W and H predictions were comparable among the groups of reaches with different degrees of hydrological alterations. In detail, regressions of log-transformed observed vs. predicted W and H demonstrated the robustness of our predictions to the degree of alteration. Performances for each group are presented in Table 4.

Table 4: Performance metric values of W and H for group of reaches with different degree of alteration.

Group of reaches	NSE	RSR	pbias
CARHYCE+	$W: 0.83 ; H: 0.68$	$W: 0.42 ; H: 0.56$	$W: 2.4 \% ; H: 5 \%$
CARHYCE	$W: 0.83 ; H: 0.43$	$W: 0.40 ; H: 0.75$	$W: 3.0 \% ; H: 6.5 \%$
Other reaches	$W: 0.85 ; H: 0.58$	$W: 0.38 ; H: 0.65$	$W: 2.6 \% ; H: 5.2 \%$

4. Discussion

Although several previous hydraulic geometry studies have used combinations of GIS-based explanatory variables for hydraulic geometry modelling (e.g. Booker and Dunbar, 2008; Booker, 2010), the present study is the first to separately investigate at-a-station and downstream hydraulic geometry from a large intercontinental data set of reach scale hydraulic geometry parameters. In the present study, we derived at-a-station and downstream hydraulic geometry models aiming to predict reach-averaged water depth, wetted width and current velocity across France and New Zealand river networks. These models are based on the respective digital river network of each country and readily derived explanatory variables. We also combined both data sets in order to test the potentiality for model generalization by using explanatory variables common to both data sets.

We applied our models across the entire river networks of France and New Zealand to produce maps of predicted hydraulics W , H and V (e.g. Figure 9 and Figure 10). Our tests to predict the hydraulic geometry at the surveyed instantaneous discharge indicated that the predictions were good representations of reach averaged width, depth and velocity for both countries and that models were consistent and unbiased even when cross-validation was applied. Unsurprisingly, the Basic method performed less well than the RF-based methods for both countries. However, the Intercontinental method provided equally good performance as the Country-specific method.

Wetted widths were well predicted regardless of method and country. This is mainly the result of good predictions of the $W50$ parameter overriding weak performance of our b exponent models. Only minor improvements of $W50$ predictions were obtained with the RF-based methods for both countries underlying the strong relationships between $W50$ and $Q50$ of the Basic method. Furthermore, the variables having the highest contribution in $W50$ models of Country-specific and Intercontinental methods were mainly $Q50$ and other hydrological and catchment size descriptors such as $SpeQ50$, $SpeAnnualFloodFr$ and $usCA$ and for both

countries. These results suggest that $W50$ is essentially related to catchment size and hydrology and that descriptions of climate; landcover and geomorphology (e.g. *usRainMean*, *usBare*, *segD50*) provide surprisingly minor contribution to our models. Despite the purely empirical approach used in this study, results are consistent with previous downstream hydraulic geometry studies. For example, Faustini et al. (2019), Rawlins et al. (2014) and Wilkerson et al. (2014) reported strong influences of catchment size and hydrological descriptors on width. Booker (2010) also noted minor contribution of climatic, land cover or other catchment attributes when modelling cross-sectional wetted width as function of catchment area across New Zealand.

Although an empirical approach was applied, patterns in modelled results did have physical explanations. Globally, for the same discharge, rivers with larger catchments, wetter climates or larger flood events tend to be wider than rivers with smaller catchment, dryer climates or smaller flood events. Land cover and grain size also exerts control on the strength and stability of channel banks, and therefore on the adjustment of channel width (Millar, 2000; Piégay et al., 2005). Exponent b models perform poorly but the RF-based models performed better than a “null” model in which b was a constant mean of the whole dataset (i.e. Basic method). Moreover, similarities in explanatory variable contributions were observed between the Country-specific models and the Intercontinental model especially with the sediment grain size descriptors and average slope of the upstream catchment (i.e. *segD50* and *usAveSlope*, respectively). Width exponent tends to increase in reaches with largest sediment grain size and steepest slopes. Similar relationships with both variables is coherent because of the strong relationships between grain size and catchment slope (Snelder et al., 2011b). Curiously, this result is inconsistent with previous studies (Ridenour and Giardino, 1994; David et al., 2010 and Morel et al., 2019) that tried to relate grain size descriptors with at-a-station width exponent and did not reveal significant relationships. Reaches with high slope and high sediment grain size may also be interpreted as reaches with important sediment delivery and non-cohesive banks. In that case, channel shape is mostly wide with shallow banks and presents high capacity to widen with increasing discharge. Lateral channel shape has been reported as the main control on exponent in analytical studies (e.g. Dingman, 2007).

Unlike W , the predictions of H obtained by the Country-specific and Intercontinental methods were more effective than the Basic method. This is mostly due to the best performance of the RF-based models for predicting $H50$ parameter in comparison with the Basic method. This

suggests that, besides $Q50$, other explanatory variables are required for predicting reach water depth. Our analyses indicated that catchment size and geomorphic descriptors, especially $segSlope$, contributed well to our models. This suggests that reach water depth is also related to reach-scale features. In general, for the same discharge, rivers in small and steep catchments tend to be shallower. This is consistent with previous studies on downstream hydraulic geometry arguing that discharge information is not enough for predicting water depth. For example, Lee and Julien (2006) proposed equations of water depth based on hydraulic geometry relationships using variables describing bed sediment grain size or stream slope in addition to the discharge. Exponent f is largely unexplained in our analyses and no strong relationships with explanatory variables and similarities between both countries have been identified. New Zealand models of H performed less well than French models despite similar performance of $H50$ and f models. One possible explanation is that our New Zealand data set contained reaches with a broad range of depths in comparison to our French data set.

Reached-averaged velocity V is well estimated by Equation (7). Therefore, we predicted mean velocity with our models well. Globally, for both countries the Country-specific and Intercontinental models performed better than the Basic models, and French models were relatively more effective than the New Zealand models. These results are mainly the consequence of the H predictions because of the dependency of Equation (7) with W and H .

At-a-station exponents were predicted weakly and contained some bias. Our RF-based models, however, performed better than a model with constant average values of exponents (i.e. Basic method). Furthermore, these results revealed consistencies with theoretical analyses (e.g. Dingman, 2007; Ferguson, 1986) that argued that at-a-station exponents are mainly related to channel form and flow resistance rather than catchment scale attributes. It is also consistent with descriptive approaches as in Morel et al. (2019) who found that exponents are more related to local features and channel form, such as relative bedform submergence, fluvial pattern or ratio of reach-average median wetted width to bankfull width, than catchment scale attributes as used in our analyses.

Unexpectedly, the Intercontinental method almost performed better than the country-specific method despite restriction in available explanatory variables. That suggests that hydraulic characteristics can be well predicted with common and very general GIS variables such as catchment area, stream slope and hydrological descriptors. These results also demonstrate the potential generality of our models at international scale. This could also suggest that RF models

perform better when provided with larger data sets. This makes sense because many data points are needed to characterise flexible relationships and interactions that can be represented by an RF model.

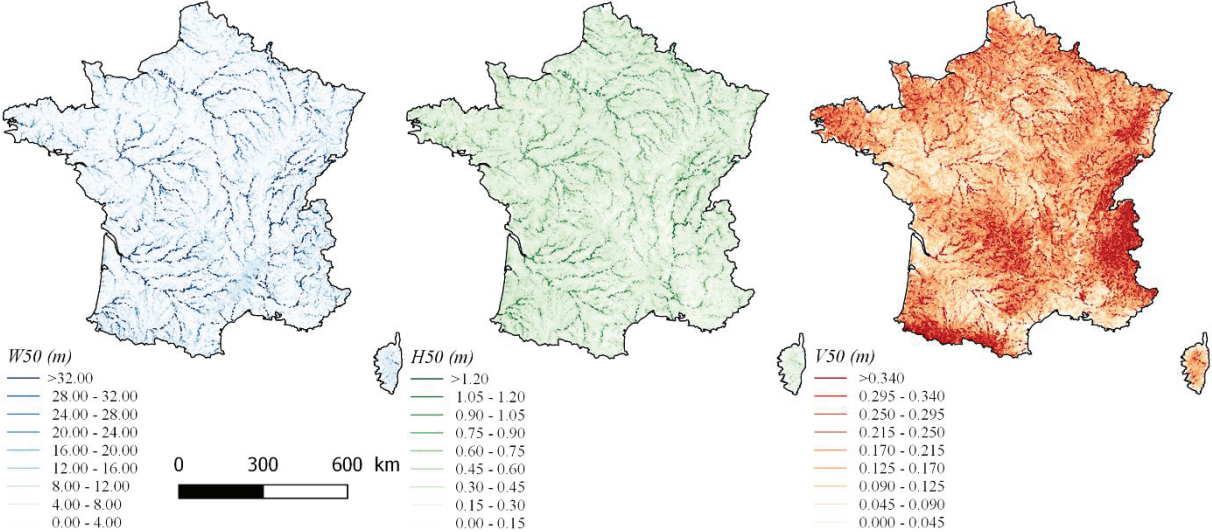


Figure 9: Predictions of reach-averaged wetted width, water depth and velocity at Q_{50} across French river network with the Country-Specific models.

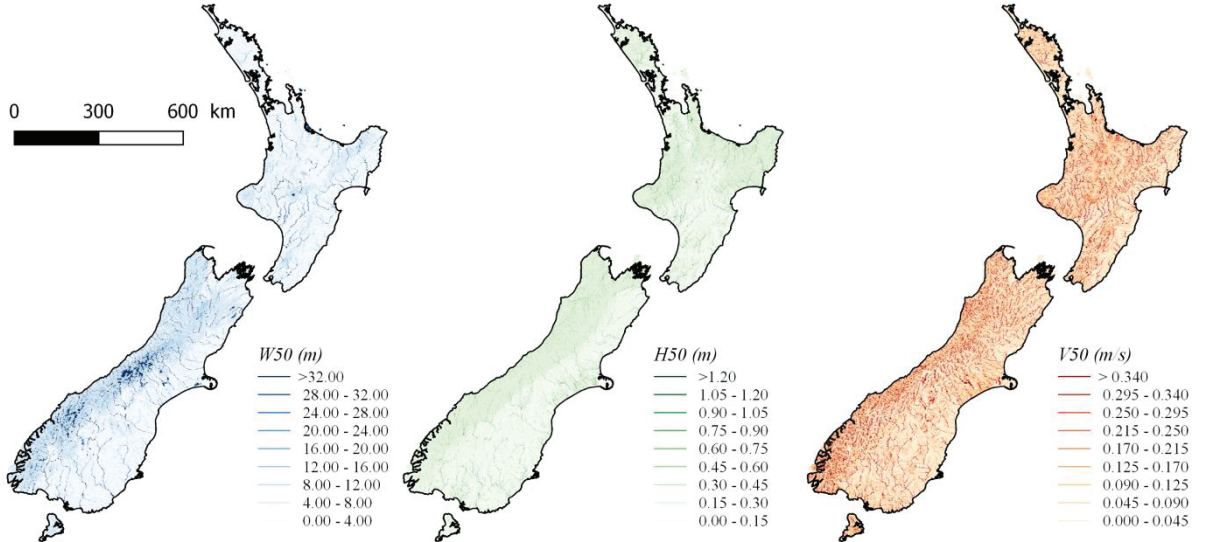


Figure 10: Predictions of reach-averaged wetted width, water depth and velocity at Q_{50} across New Zealand river network with the Country-Specific models.

Several limitations should be taken in account in our modelling approaches. First, hydraulic and flow measurements are subject to considerable uncertainty that may be a source of the overall model uncertainties. In particular, at-a-station hydraulic geometry is sensitive to observation uncertainties especially when stage-discharge relationships are fitted using observations at only a small number of discharges (Morel et al., 2019; Navratil and Albert, 2010). Uncertainties can also be related to a possible non-linearity in hydraulic-discharge relationships at some sites, although the at-a-station relationships are generally linear for the range of the studied flows (Navratil and Albert, 2010). Moreover, the hydraulic geometry relationships have their own uncertainties; especially the at-a-station hydraulic geometry which are not static and do change over time due to perturbations in river channel characteristics (Phillips, 1990, 1991). The use of reach-averaged hydraulic geometry in our study should smooth possible sampling errors (Stewardson, 2005) and reduce these uncertainties, and we attempted to reduce at-a-station hydraulic geometry uncertainties by selecting only reaches with contrasted surveyed flows. In addition, we selected reaches with *a priori* low morphological alteration. However all reaches (especially in Europe) were likely influenced by a long history of land and water uses (e.g., undocumented flow abstraction, groundwater withdrawals, change in land use and riparian vegetation, urbanisation of the catchment area, gravel mining, unknown in-channel modifications) and documenting these influences at the scale of our study would be challenging. We demonstrated that our results were comparable among groups of reaches with various degrees of hydrological alterations, suggesting some robustness to these undocumented potential alterations. Nevertheless, an improved knowledge of the alteration of morphologies may improve our understanding of hydraulic geometry. Furthermore, the explanatory variables derived from the GIS databases have their own, often large uncertainties (Lamouroux et al., 2014). For example, estimates of discharge statistics at ungauged sites in such databases have uncertainties around 100% for low discharge rates ($< 1 \text{ m}^3/\text{s}$; Lamouroux et al., 2014). It is unlikely that these uncertainties affect our main results given the large range of environmental gradients considered in our study; for example, median discharges in our reaches spans three orders of magnitude (Table 1). Nevertheless, we expect that reduced uncertainties in GIS databases will improve the models.

Random forest predictions can never fall outside the range of the training data (Booker and Whitehead, 2018). For this reason, predictions of our models beyond the range of the training data (i.e. 1-45 meters for wetted width and 0.09-1.20 meter for water depth) should not be

considered. However, the reaches involved in our study are representative of a large proportion of hydrographic river networks. For example, only 1.75% of the length of the French hydrographic network and 1.31% of New Zealand hydrographic network have Q_{50} values above the maximum observed in our data sets (Pella et al., 2012; Booker and Woods, 2014). Finally, our W , H and V models have been performed using reach measurements in a range of flows generally below Q_{50} . Consequently, these models cover frequently occurring flows and their ability to predict hydraulic characteristics at extremes flows is questionable.

5. Conclusions

Three alternative methods were tested for predicting reach-average wetted width, water depth and velocity across France and New Zealand river networks. These methods represent varying approaches to modelling the downstream and at-a-station parameters depending on explanatory variables availability and model complexity. Results from cross-validation tests indicated that predictive performances of RF-based methods performed better when predicting at unvisited sites. Overall, our methods did well at predicting downstream parameters, but were less efficient for at-a-station parameters. Best performing method will be used to derive the most accurate predictions of the hydraulic geometry across the river networks (Figure 9 and Figure 10). These national predictions will be useful for a wide range of national and/or catchment scale applications. For example, they could be used to link hydrological alterations into aquatic habitat alterations at broad scales (Miguel et al., 2016).

Acknowledgements

DJB's contribution was funded by NIWA's Environmental Flows Programme. The authors would like to thank NIWA and various NZ regional councils for collecting RHYHABSIM input files, the AFB (French Agency for Biodiversity) for supplying database of CARHYCE surveys and for funds, the Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse and the many catchment stakeholders who contributed to gather ESTIMHAB row data. Many thanks to Hervé Pella for assistance with GIS treatments.

Chapitre 5 : Application écologique des modèles de géométrie hydraulique : cas du bassin versant du Rhône

Dans ce chapitre, je présente une étude dans laquelle les modèles de géométrie hydraulique développés dans le chapitre précédent sont appliqués directement. Cette étude a pour but d'appréhender l'impact du changement climatique sur les populations piscicoles dans le bassin du Rhône. Ce chapitre se présente sous la forme d'un d'article (Article 4) dont la soumission est prévue dans la revue « *Global Change Biology* ».

5.1 Synthèse

Les changements climatiques modifieront fortement les régimes thermiques des réseaux hydrographiques et l'occurrence des événements hydrologiques extrêmes, y compris les débits d'étiages (Marx et al., 2018). La connaissance des conséquences écologiques de ces changements et de leur distribution spatiale dans les réseaux hydrographiques est nécessaire pour trouver de meilleurs compromis entre les usages de l'eau et l'état écologique. Cela est particulièrement nécessaire dans les grands bassins hydrographiques diversifiés, où les usages de l'eau sont variés et leurs distributions spatiales complexes.

Les modèles de distribution des espèces (*species distribution model*, SDM) prédisent la présence d'espèces dans les tronçons de cours d'eau à partir de descripteurs environnementaux à l'échelle de tronçon de cours d'eau et de bassin versant (Grenouillet et Comte, 2014). Ils ont été largement utilisés pour comprendre et prédire les effets du changement climatique sur la distribution spatiale des espèces à l'échelle de grands bassins versants. Ces modèles prédisent généralement l'occurrence des espèces étudiées (présence-absence) dans le réseau hydrographique.

Les modèles d'habitat hydraulique (*hydraulic habitat model*, HABM) couplent la modélisation hydraulique (largeur mouillée, hauteur d'eau, vitesse) du cours d'eau avec des modèles biologiques, dits de « préférences », qui prennent en compte les exigences écologiques des espèces aquatiques suivant leur stade de vie ou leur activité (Thames, 2003). Les HABMs sont généralement utilisés pour prédire les impacts des changements hydrologiques sur l'habitat physique des poissons. Ces modèles prédisent généralement des abondances d'espèces.

Nécessitant des mesures topographiques de tronçon détaillées, l'utilisation des HABMs restait jusqu'à récemment restreinte à l'échelle de quelques tronçons de cours d'eau. Toutefois, le développement des modèles de géométrie hydrauliques nationaux (chapitre 4) et l'utilisation de modèles d'habitat hydraulique statistiques simplifiés (Lamouroux and Capra, 2002) permet désormais d'étudier l'impact des altérations hydrologiques sur l'habitat hydraulique à l'échelle de grands bassins versants.

Afin d'appréhender l'impact des scénarios climatiques sur l'habitat aquatique du bassin du Rhône, cette étude propose une approche originale basée sur le couplage d'un modèle hydrologique distribué construit sur l'ensemble du bassin versant du Rhône (modèle J2000-Rhône, Branger et al., 2016), des modèles de géométrie hydraulique développés dans le chapitre 4, de SDM et de HABM. Les simulations ont été faites pour une période actuelle (de 1987 à 2012) et une période future (de 2075 à 2100) en se basant sur deux scénarios climatiques. Ces scénarios climatiques représentent un scénario pessimiste (augmentation continue des émissions de gaz à effet de serre) et un scénario modéré (les émissions de gaz à effet de serre se stabilisent à partir de 2050). Pour illustrer les impacts du changement climatique, les modèles SDM et HABM ont été développés pour trois espèces de poissons caractéristiques de différents types de rivières et ayant des exigences thermiques et hydrauliques contrastées : la truite commune, le barbeau fluviatile et le chabot, tous au stade adulte (Figure 5.1). Par ailleurs, cette étude s'est principalement intéressée aux débits d'étiage, ici le débit dépassé 95% du temps (Q_{95}). Les débits d'étiage ayant une influence sur la structure des peuplements dans les cours d'eau.

Les objectifs de cette étude sont 1) d'étudier la complémentarité des modèles SDM et HABM pour prédire les impacts écologiques du changement climatique ; 2) d'évaluer l'impact écologique à l'échelle d'un bassin, son hétérogénéité spatiale ainsi que ses incertitudes.

Les résultats montrent que le changement climatique peut entraîner des modifications importantes des débits d'étiages (réduction médiane de 38% pour le Q_{95} avec le scénario pessimiste) provoquant des changements majeurs dans la distribution géographique des espèces étudiées et des altérations importantes de l'habitat hydraulique (par exemple une altération médiane de 11% pour le barbeau fluviatile).

Malgré ces limites, principalement dues aux incertitudes de chaque modèle, notre approche montre l'intérêt de combiner les SDM et HABM pour améliorer les prévisions quant aux

impacts écologiques du changement climatique. L'utilisation des SDM permet notamment de contextualiser les impacts d'habitats hydrauliques. Autrement dit, les prédictions d'occurrences des espèces permettent d'étudier l'impact du changement hydrologique dans les régions où les espèces étudiées sont théoriquement présentes. En outre, cette étude montre que les impacts du changement climatique seront potentiellement forts et très hétérogènes au sein de grands bassins versants. Notre approche s'avère être un outil utile pour les gestionnaires de bassins versants car elle peut contribuer à identifier les meilleurs compromis entre les différents usages de l'eau et les impacts écologiques dans les régions où les impacts seront susceptibles d'être forts.



Figure 5.1 : a) Chabot; b) Truite commune; c) Barbeaux fluviatile (photographies fournies par N. Lamouroux).

Article 4

Catchment-scale applications of hydraulic habitat models: climate change effects on fish.

Catchment-scale applications of hydraulic habitat models: climate change effects on fish.

Maxime Morel¹, Hervé Pella¹, Flora Branger¹, Eric Sauquet¹, Gaël Grenouillet², Jessica Côte², Isabelle Braud¹, Nicolas Lamouroux¹

¹ INRAE, UR RiverLy, Villeurbanne, France

² Laboratoire Evolution & Diversité Biologique (EDB), UMR5174, CNRS, Toulouse, France

Approaches available for estimating the ecological impacts of climate change on aquatic communities in river networks range from correlative approaches applicable globally to detailed mechanistic models applicable locally. Among them, species distribution models have been used to predict changes in geographic distributions, which are largely driven by temperature patterns. More mechanistic hydraulic habitat models link hydraulic models of streams with biological models that reflect how organisms select microhabitat hydraulics. Habitat models are commonly used for predicting the impacts of flow alteration in local environmental flow studies. The simplification of hydraulic habitat models and an improved knowledge of hydraulic characteristics across river networks now enable the application of habitat models at the catchment scale. This methodological study proposes an original linkage of a distributed hydrological model, a model of stream hydraulics (hydraulic geometry model), a model of fish species distribution, and hydraulic habitat models for predicting the effects of climate change scenarios on fish in a large catchment in France (Rhône, present period: 1987 to 2012; future period: 2075 to 2100). Despite large local uncertainties, illustrative simulations showed that climate change may cause important changes in low flows (e.g. a median of 38% reduction for a pessimistic climate scenario), inducing major changes in species distributions and important alteration of fish habitat suitability (e.g. median change of 19% for sculpin (*Cottus gobio* L.) for a pessimistic scenario). The species distribution model and the hydraulic habitat model could predict opposite responses to climate change. Our results open many perspectives for taking into account habitat issues in quantitative water management at the catchment scale. They illustrate that the impacts of climate change may be very heterogeneous spatially, although their spatial distribution remains uncertain. They help us to discuss the complementarity of different modelling approaches for predicting the effects of climate change.

Keywords: catchment management; climate change; ecohydraulics; fish habitat; hydrological model; species distribution model

1. Introduction

Global and climatic changes will strongly alter thermal regimes in river networks and the occurrence of extreme hydrological events, including low flows. Knowledge of the ecological consequences of these changes and their spatial distribution in river networks is needed to find improved compromises between water uses and ecological status. This is particularly true in large, diverse river catchments, where water uses are varied and their spatial distribution complex.

A large spectrum of approaches has been used for predicting the impacts of climate change on aquatic communities in river networks. Approaches range from coarse ecological models applicable globally, to detailed ecological models based on mechanisms and generally applied locally. For example, models based on “species-discharge” relationships, e.g. correlations between species richness in catchments and discharge at catchment mouth, have been used to predict fish species loss globally (Xenopoulos et al., 2006; Iwasaki et al., 2012). The weakness of these large-scale correlative approaches is that their predictions can be influenced by non-causal correlations that make them unrealistic (Tedesco et al., 2013; Damiani et al., 2019). In particular, intercorrelations between catchment discharge, total and wetted areas, and temperature may influence large-scale predictions. At the other end of the spectrum, models of populations dynamics taking into account the effects of proximate habitat variables such as reach hydraulics or water temperature may well reflect observed annual changes in fish abundance (Bret et al., 2017) and provide predictions of the effects of climate change (Ayllón et al., 2019). However, such detailed, more mechanistic models may have a limited transferability and use input variables and calibration data that are not available at large scales.

Species distribution models (SDM) predict species occurrence in river reaches from reach- and catchment-scale environmental descriptors. They have been widely used to understand and predict the effects of climate change on species spatial distribution at the scale of large catchments. They have an intermediate position in the spectrum described above, because they take into account many reach-scale environmental factors that may influence species geographic distributions. These factors often include air temperature, a wide range of topographic and climatic data (e.g. slopes, catchment area, catchment use, rainfall), and

optionally coarse hydrologic or geomorphic information (e.g. hydro- or ecoregions). Therefore, SDM calibration with field data helps understanding the relative role of environmental predictors on observed species distribution, allowing to predict temporal changes in species distributions. For example, Comte and Grenouillet (2015) used SDM to show that the observed distributional shifts of fish species toward higher altitudes with warming was slower than expected according to isotherm shifts. Yet, the transferability of SDM across several catchments remains little tested, and these models may ignore key proximate habitat descriptors such as water temperature or microhabitat hydraulics (Gies et al., 2015). For these reasons, SDM have been mostly used for predicting the effects of warming rather than those of hydrological changes.

Hydraulic habitat models (HABM) link hydraulic models of stream reaches with biological models of hydraulic habitat selection by organisms (Tharme, 2003), to predict hydraulic habitat suitability for different fish species. Within the spectrum of approaches, they are closer to mechanistic approaches than SDM (Lamouroux et al., 2017). HABM are widely used for predicting the impacts of hydrological changes (e.g. due to water abstraction or diversion) on the physical habitat of aquatic organisms. They differ from SDM in several ways. First, they focus on marginal responses to hydraulic changes (current velocities, water depths) under low to medium discharge rates. Second, they are expected to predict changes in species abundance rather than species occurrence. Third, they are based on patterns of habitat selection observed at the microhabitat scale (e.g. a few m² for fish); they focus on the selection of microhabitats within reaches, which differ essentially by their hydraulic conditions but have comparable water temperature and physico-chemical quality. HABM have proved useful for predicting observed effects of water abstraction on species relative abundance (Lamouroux et al., 2015). However, they focus on the effects of physical alterations only and have been mostly applied for local environmental flow studies with available descriptions of hydraulics in stream reaches.

Bridging gaps between local mechanistic models and global ones, by refining global models or upscaling local ones, has been a long-lasting objective of ecologists (Peckarsky et al., 1997). Upscaling HABM at catchment to global scales is particularly attractive for predicting the ecological consequences of hydrological alterations while taking into account the effects of microhabitat hydraulics. Early upscaling attempts required important simplifications for describing microhabitat hydraulics at large scales (Singh and McConkey Broeren, 1989). Three important elements suggest that improved large-scale applications are now achievable. First,

improved descriptions of reach-scale hydraulics are available at large scales, based on the analysis of intercontinental hydraulic geometry data (Morel et al., 2020). Second, hydraulic habitat suitability for different species can be predicted from reach-scale hydraulics using simplified, statistical hydraulic habitat models (Lamouroux and Capra, 2002). Third, biological models of microhabitat selection by aquatic taxa have shown a high degree of generality among rivers and seasons (Lamouroux et al., 2013, for macroinvertebrates; Plichard et al., in press, for fish). These progresses enable to predict the sensitivity of aquatic habitats to water abstraction in large catchments (Snelder et al., 2011; Miguel et al., 2016) or globally (Damiani et al., 2019). This suggests that upscaling HABM for predicting the ecological consequences of climate change in large catchments is now possible.

The objective of this methodological study is to describe an original linkage of a distributed hydrological model, a model of stream reach hydraulics (hydraulic geometry model), a SDM and a HABM to predict the effects of climatic scenarios on fish distributions and habitats in a large catchment. We illustrate our methods with simulations in the Rhône catchment in France comparing a present period (1987 to 2012) and a future period (2075 to 2100) and based on two alternative climatic scenarios. We discuss how the different hydrological and ecological models involved can complement themselves for an improved prediction of the potential ecological impacts of climate change. We use our simulations to illustrate and discuss the potential magnitude of ecological impacts in a large catchment, their potential spatial heterogeneity and their uncertainty.

2. Material and methods

Study area

We applied our approach to the French part of the Rhône River basin, of approximately 86 000 km², due to the availability of a distributed hydrological model covering the catchment (Figure 1). The Rhône catchment has a very heterogeneous climate (mean annual rainfall between 620 and 2190 mm per year, mean air temperature between -1.5 and 14.7 °C) and geology. It contains several mountainous ranges (Alps, Jura, Cévennes, and Vosges) while the southern part of the catchment is mostly influenced by a Mediterranean climate. River flow regimes range from glacial or nival in the Alps (with low flows in winter and higher flows in spring) to Mediterranean (with dry summers and strong rainfall events in other seasons) (Sauquet et al., 2008). For example, the three examples of sub-catchments shown in Figure 1,

corresponding to a subdivision used by water managers, are dominated by different regimes: the Upper Isère sub-catchment is mostly influenced by snowmelt, the Doubs is pluvial, and the Durance sub-catchment combines snowmelt influences in the mountains and Mediterranean influences downstream.

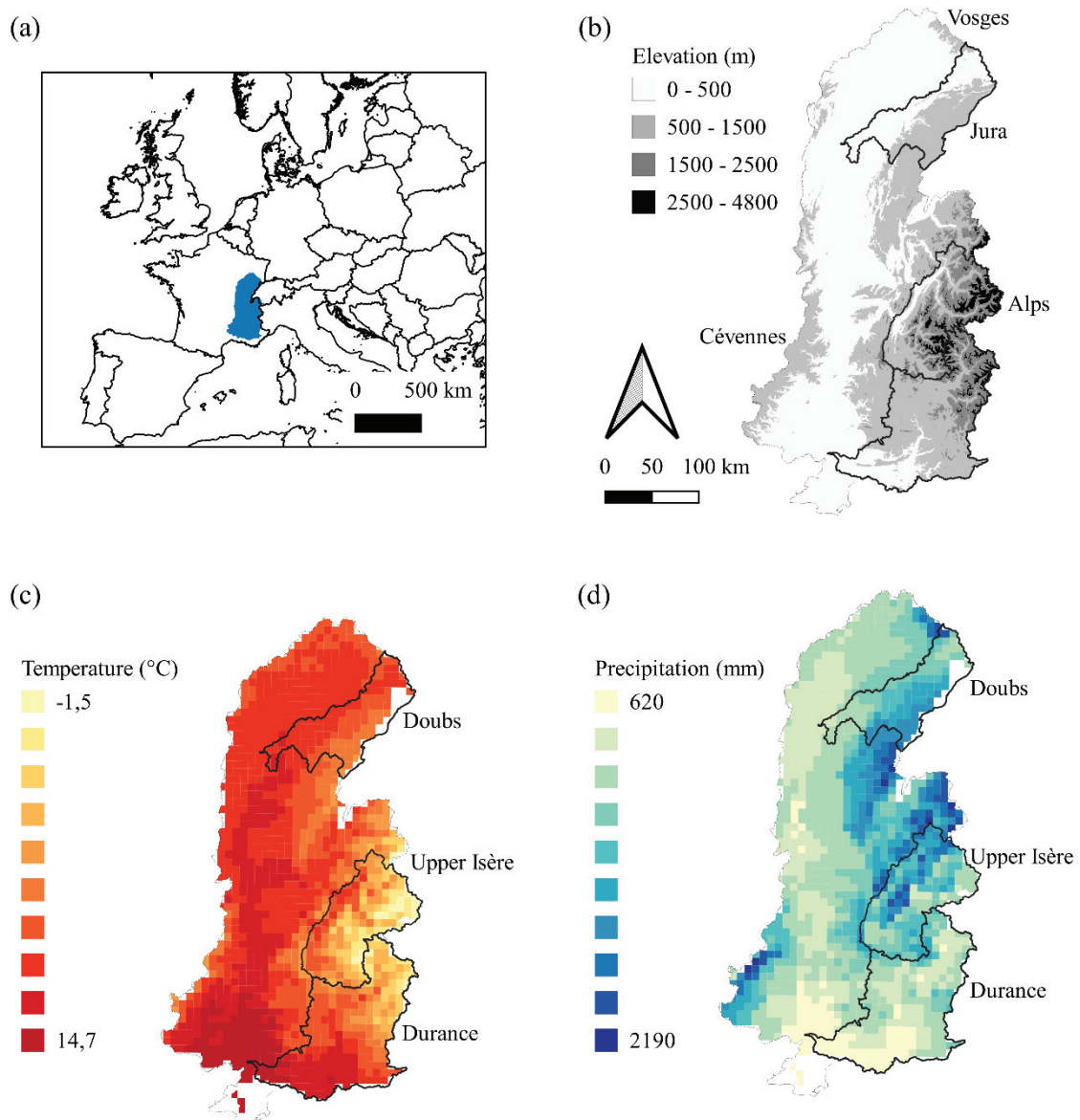


Figure 1: General location of the Rhône catchment in France (a). Elevation and hydrographic network (b). Mean air temperature (c) and precipitation (d) for the present period and locations of three sub-catchments used to describe our results.

Modelling framework

Our global approach (Figure 2) was to link a distributed hydrological model, a model of stream reach hydraulics (hydraulic geometry model), a SDM, and a HABM to predict possible effects of climate change on fish distribution and habitats in the Rhône catchment in France.

For simulations, we used a digital oriented theoretical hydrographic network (Réseau Hydrographique Théorique, RHT; Pella et al., 2012) comprising around 115,000 reaches across France, defined from upstream and downstream confluences and with an average length of 2.5 km. The hydrographic network of the RHT physically starts when catchment areas reach 2.5 km² (Pella et al., 2012). Consequently, the network represents well small first order streams compared to other large-scale hydrographic networks. Several environmental characteristics (Table 1) were estimated on this network (Pella et al., 2012) and were used as input variables in the modelling chain. These included estimations of catchment area, mean slope and elevation of the reach, cumulated length of the upstream river network, mean bed substrate size (Snelder et al., 2011) and interannual estimates of discharge statistics obtained by spatial extrapolations from gauging stations (Sauquet and Catalogne, 2011).

As an illustration of climate change impacts, we chose to develop SDM and HABM models for three European fish specific life stages, characteristics of different types of rivers and having contrasted thermal and hydraulic requirements (Lamouroux and Capra, 2002). The adult brown trout (*Salmo trutta* L.) is characteristic of small European headwaters, of high fishing interest, and is particularly sensitive to water temperature. It uses deep microhabitats and moderate water velocities. Adult sculpin (*Cottus gobio* L.) is present in lower elevations, requiring lower temperatures. It selects microhabitats with intermediate current velocities but shallower water depths. Adult barbel (*Barbus barbus* L.) is the typical species of larger, warmer streams (the “barbel” zone, Huet, 1959), and selects deeper and faster-flowing microhabitats than the two other species.

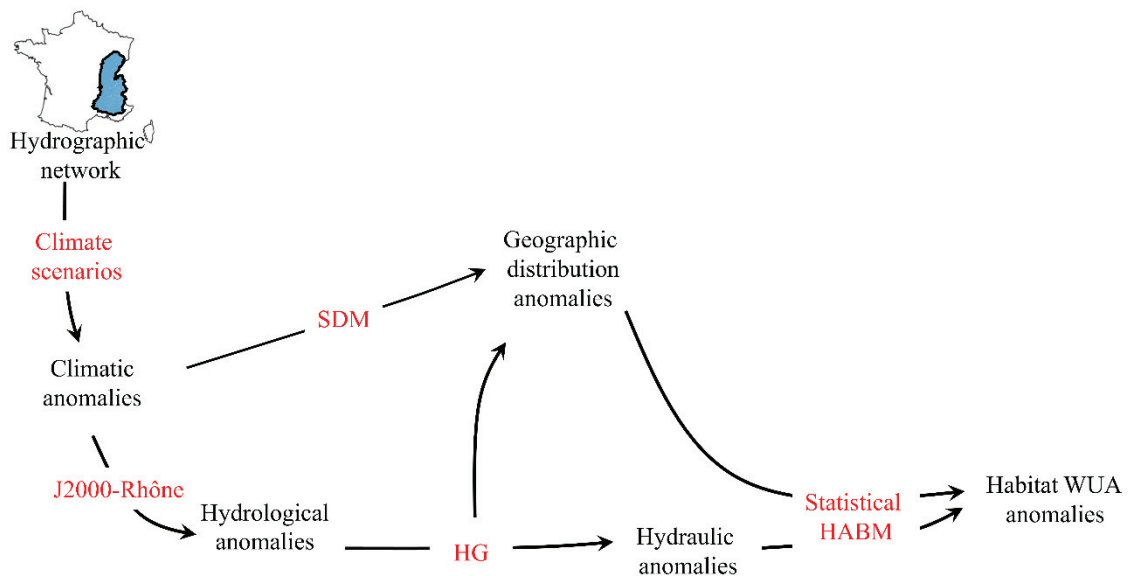


Figure 2: Graphical representation of the global logic of our study. Modelling steps are presented in red colour.

Climatic data

We extracted baseline climate data from the French near-surface Safran meteorological reanalysis (Quintana-Seguí et al., 2008; Vidal et al., 2010), which provides daily mean temperature and precipitation (at a resolution of 8 km x 8 km) over the study area during the present period considered here (1987 to 2012).

For the future climate (period 2075-2100), we considered two regional climate projections available from the CMPI5 dataset available on the DRIAS French portal (www.drias-climat.fr; Lémond et al., 2011). These two projections correspond to Representative Concentration Pathways RCP4.5 and RCP8.5 (Jouzel et al., 2014) and encompass contrasting future climate conditions; RCP 4.5 refers to an optimistic scenario (i.e. greenhouse gas emission declining around 2050 due to climate policy) and RCP 8.5 refers to a pessimistic scenario (greenhouse gas emission continuously increasing without explicit climate policy). They consist of daily temperature and precipitation time series, obtained from the “ARPEGE-Global” global climate model, dynamically downscaled by the “ALADIN” model, and bias-corrected with a quantile-quantile method.

The hydrological model of the catchment: J2000-Rhône

J2000-Rhône is a process-oriented, fully distributed hydrological model that was set up for the French part of the Rhône River basin with the objective of assessing the impact of climate change and water management scenarios on the availability of water resources (Branger et al., 2018). The J2000 model has been developed for implementing the European Water Framework Directive (Krause et al., 2006) and has been extensively used around the world (Fink et al., 2007; Branger et al., 2013; Nepal et al., 2014; Machado et al., 2016; Nepal, 2016; Firoz et al., 2018). J2000 represents the main hydrological processes in a simplified, yet physically sound way. It considers rain/snow partition and interception, evapotranspiration, snow accumulation and melting processes, infiltration in soils, surface runoff, groundwater recharge and routing in the hydrographic network. It is fully distributed and uses irregular Hydrological Response Units (HRUs) as elementary modelling units (Flügel, 1995). The version of J2000-Rhône used for the present study considers only natural hydrological processes, i.e. no anthropogenic features such as dam management operations, irrigation or drinking water uptakes.

J2000-Rhône was set up using a resampled ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) Digital Terrain Model with 200 m resolution, the Corine Land Cover land-use map from 2006 (<https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>), and the European Soil Database map (<https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/european-soil-database-v20-vector-and-attribute-data>). The model was run for the present and future periods using the above mentioned climate forcings, with prior 30-years initialization runs. To calibrate the model, a set of 217 stations was selected from the French national gauging network (<http://www.hydro.eaufrance.fr/>). Parameters were initially set according to prior information and the literature. The model was iteratively improved in order to better reproduce observed discharge rates while keeping the physical meaning of the parameters (Branger et al., 2016). J2000-Rhône provides correct predictions of observed daily discharges, with a median Nash-Sutcliffe efficiency (Nash and Sutcliffe, 1970) of 0.51 and a median Kling-Gupta efficiency (Gupta et al., 2009) of 0.57. The reproduction of low flows is also satisfactory with an average relative difference of 6% for the 90th percentile (daily discharge value that is exceeded 90% of the time).

J2000-Rhône provides daily discharge time series for present and future periods and for every reach of the hydrographic network. The hydrographic network used by J2000-Rhône was generated from the Digital Terrain Model during the HRU delineation process, and was much coarser than the detailed (but more realistic) RHT network used by the SDM and HABM

models. To extrapolate J2000-Rhône results on the RHT, we first associated each J2000-Rhône reach with its corresponding RHT reach, based on proximity and correspondence of upstream catchment areas. This allowed associating daily discharge data with most RHT reaches. For RHT reaches without correspondence, we extrapolated discharge data from the nearest RHT reach with correspondence and situated downstream. These extrapolations were made following a proportionality assumption, using the ratio of the median flow $Q50_{RHT}$ of the two reaches.

Because low flow hydraulics have been successfully used to predict changes in fish assemblage structure (Lamouroux and Olivier, 2015), we decided to model hydraulic habitat suitabilities of fish species at $Q95$, the daily discharge exceeded 95% of the time. Accordingly, we derived $Q95$ quantiles for the present and future periods. These will be noted $Q95_{pre}$ and $Q95_{fut}$ throughout (and similarly for other variables in Table 1). Hydrological relative anomalies ($\Delta Q95$, in %) were calculated as:

$$\Delta Q95 = \frac{Q95_{pre} - Q95_{fut}}{Q95_{pre}} \quad (1)$$

The hydraulic geometry model HG

Hydraulic translations of daily discharge data at each reach were made using the hydraulic geometry models of Morel et al. (2020). In brief, these models improve the classical hydraulic geometry relationships of Leopold and Maddock (1953). They are based on analyses of hydraulic data collected at the scale of stream reaches in 1327 reaches with limited morphological alteration in France and New Zealand. These models provide the best estimates of reach hydraulics at a given discharge rate in the absence of detailed field hydraulic measurements. They combine traditional formulations of “downstream hydraulic geometry” (spatial variations in wetted width $W50_{RHT}$ and water depth $H50_{RHT}$ at median flow $Q50_{RHT}$) and “at-a-reach hydraulic geometry” (temporal variations in wetted width W and water depth H with discharge rate Q). The resulting equations for predicting W and H are:

$$H = H50_{RHT} \times [Q/Q50_{RHT}]^f \quad (2)$$

$$W = W50_{RHT} \times [Q/Q50_{RHT}]^b \quad (3)$$

where exponents f and b are “at-a-station” hydraulic geometry exponents (Morel et al., 2020). Parameters of these models ($b, f, H50_{RHT}, W50_{RHT}$) were themselves statistically predicted from

several climatic, hydrologic, topographic, and land use descriptors available over the RHT (Morel et al., 2020).

Fish species distribution models SDM

We developed SDM to predict the probability of species occurrence in river reaches from reach- and catchment-scale environmental descriptors (see Table 1 for the input variables used). For this purpose, we used the methods of Grenouillet and Comte (2014) but updated their models for our three species and using our environmental descriptors. Input variables (listed in Table 1) included reach median width, distance to source and catchment area. They also included the average, over years of the period considered (present period for fitting the model, future period for predictions), of annual climatic variables: mean air temperature of the coldest and warmest quarters, temperature variability, cumulated precipitation of the wettest and driest quarters, and precipitation variability.

For fitting the model (present period), fish data were extracted from the electrofishing database of the French Biodiversity Office (BDMAP database, Baglinière, 2018). We selected 558 sites sampled at least twice from 1995 to 2005 in the Rhône catchment. Fish presence–absence data were related to the environmental variables using an ensemble modelling approach (Araújo et al., 2005) based on five different SDMs corresponding to different modelling techniques: generalized additive models, multivariate adaptive regression splines, classification and regression trees, random forest and generalized boosted trees. Models were calibrated on 70% of the database while the remaining 30% were used for evaluation and threshold optimisation. Predictive performances were evaluated using the “Area Under the Curve” (AUC) of a receiver operating characteristic plot (Fielding and Bell, 1997). To take into account the variability introduced by the modelling method, we followed the procedure applied in Marmion et al. (2009) by averaging the probabilities of occurrence (weighted by AUC values) predicted by the five SDMs. Models present high predictive performances with receiver-operating characteristic (ROC) values equal to 0.933 for sculpin, 0.982 for barbel and 0.995 for trout.

Predictions were made using the average climatic variables over years of the future period. We compared the predicted occurrence in current and future periods to identify the reaches where the species disappeared, appeared, was potentially present or definitely present. For this purpose, SDM predictions (probability of occurrence) were transformed into expected presence

or absence using species-specific threshold values maximizing the sum of sensitivity and specificity (Manel et al., 2001).

The statistical fish hydraulic habitat models HABM

We used the statistical HABM of Lamouroux and Capra (2002) for estimating hydraulic habitat suitability for our three fish species. These statistical habitat models predict the “Weighted Usable Area” (WUA) in the reach, at a given discharge rate, as a function of the hydraulic geometry of the reach (HG results) and an estimate of average particle size D . The weighted usable area is the product of the reach wetted surface and an habitat value that varies between zero and one, depending on the suitability of velocities and water depths in the reach for the species. In other words, the weighted usable area increases with both habitat quantity (wetted surface) and quality (habitat value). Here, we calculated WUA at $Q95$ for the present period and future periods, for brown trout, barbel and sculpin. A relative anomaly of habitat (ΔWUA , in %) is deduced :

$$\Delta WUA = \frac{WUA_{pre} - WUA_{fut}}{WUA_{pre}} \quad (4)$$

Estimating habitat alteration only makes sense where the species is potentially present. This is where our SDM and HABM complement themselves. Therefore, we calculated hydraulic habitat anomalies for each species only in reaches where SDM predicted their presence (in the present and/or future situation).

Partial uncertainty assessment

Large-scale hydrological, hydraulic and habitat simulations are influenced by a wide variety of uncertainties, which correspond to each step of the modeling procedure (Figure 2) and propagate through the modeling chain. These include, among others, uncertainties of climate scenarios (partly illustrated by our use of two RCP scenarios), uncertainties of the climatic and hydrological models in the present situation and under future scenarios, and uncertainties of the hydraulic translation of discharge values. Taking into account all sources of uncertainty in our simulations would be challenging if not impossible. For example, the uncertainties of hydrological alterations cannot be tested easily with field data, and their estimation obtained by running multiple hydrologic models would still be debatable.

However, elements on the uncertainties of large-scale simulations are needed for anticipating the reliability of these simulations at different spatial scales, and take them into account in management decisions (e.g. reduction of abstraction). Here, we choose to do a partial and rough assessment of uncertainties, by looking at the potential combined effect of selected sources of uncertainties ($Q95$, HG models), while not taking into account others (e.g., uncertainties on global climatic scenarios and on global J2000-Rhône structural hypotheses).

In practice, we run the model chain of Figure 2 while adding simultaneously random uncertainties ($n = 100$ repetitions) on $Q95_{pre}$ and $Q95_{fut}$ and on hydraulic geometry models. These random uncertainties were assumed independent and were drawn from assumptions on error distributions. For $Q95$ distribution error, we used the error distribution suggested by Lamouroux et al. (2014). Although this error distribution was initially developed for mean annual discharge in France (Lamouroux et al., 2014), the authors indicated how the error depended on discharge itself, justifying its use for other discharge statistics such as $Q95$. This choice of a discharge-dependent error makes sense for an application on the whole hydrographic network, that contains many small rivers with low discharge and high uncertainty on their values. This led us to consider a normal error around $\log(Q95)$ with a standard deviation of (Lamouroux et al., 2014):

$$\sigma_{\log(Q95)} = 0.244 \times Q95^{-0.235} \quad (5)$$

For errors on hydraulic geometry estimates, we used the data in Morel et al. (2019), which included leave-one-out-predictions of parameters $H50$, $W50$, f and b (Equations 2 and 3), and comparisons with field data. We retained factorial errors on these parameters with standard deviations:

$$\sigma_{\log(H50)} = 0.308 \quad (6)$$

$$\sigma_{\log(L50)} = 0.253 \quad (7)$$

$$\sigma_{\log(f)} = 0.499 \quad (8)$$

$$\sigma_{\log(b)} = 0.587 \quad (9)$$

Table 1: Description of the variables involved in this study and their use as input variable for the models. (-) refers to unitless variables.

Type of variable/ code	Variable definition (unit)	Input variables used for		
		HG	SDM	HABM
Reach characteristics	<i>D</i>			x
	$\overline{Q50_{RHT}}$	x		
	$\overline{H50_{RHT}}$	x		
	$\overline{W50_{RHT}}$	x		
	<i>b</i>	x		
	<i>f</i>	x		
Climatic variables				
	<i>Tcold</i>		x	
	<i>Twarm</i>		x	
	<i>Tvar</i>		x	
	<i>Pwet</i>		x	
	<i>Pdry</i>		x	
	<i>Pvar</i>		x	
J2000-Rhône results				
	$\overline{Q95}$			x
HG results				
	<i>H95</i>			x
	<i>W95</i>			x
SDM results				
	P_TRF			x
	P_BAF			x
	P_CHA			x
HABM results				
	WUA_{TRF}			
	WUA_{BAF}			
	WUA_{CHA}			

3. Results

Mean air temperature increases over the whole catchment for both scenarios, with high anomalies for RCP8.5 (i.e. mean anomaly of +4.3°C, Figure 3a) compared to RCP4.5 (mean anomaly of +2.4 °C, Figure 5a). Air temperature seems also to increase in greater extent in some regions (e.g. in Doubs or in Durance sub-catchment). Most of the anomalies of annual precipitation are moderately negative, except locally in the Alps where both scenarios suggest

increases and decreases (Figures 3b and 5b). Heterogeneity in the Alps highlights difficulties of the models to predict future climate in mountainous areas at the local scale.

Table 1: Statistics (first quartile, median and third quartile) of hydrological ($\Delta Q95$) and habitat (ΔWUA , for the three species) anomalies estimated on the whole Rhône catchment network and sub-catchments for both scenarios.

	$\Delta Q95$		$\Delta WUATRF$		$\Delta WUACHA$		$\Delta WUABAF$	
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
	1 st quart.;	1 st	1 st	1 st	1 st	1 st	1 st	1 st
	med.;	quart.;	quart.;	quart.;	quart.;	quart.;	quart.;	quart.;
	3 rd quart.	med.;	med.;	med.;	med.;	med.;	med.;	med.;
		3 rd	3 rd	3 rd	3 rd	3 rd	3 rd	3 rd
		quart.	quart.	quart.	quart.	quart.	quart.	quart.
Whole	-27.5;	-48.3;	-6.7;	-12.7;	-11.5;	-25.3;	-7.9;	-17.3;
Rhône	-16.0;	-38.6 ;	-0.7;	-3.9;	-7.3;	-19.1;	-4.3;	-11.3;
catchment	1.7	-18.8	0	0	-1.1	-11.1	-0.3	-6.8
Doubs	-40.1;	-64.1;	-12.6;	-18.8;	-15.4;	-30.4;	-14.2;	-28.1;
	-34.7;	-60.1;	-10.0;	-15.8;	-12.1;	-25.8;	-8.4;	-18.5;
	-30.4	-53.6	-7.4	-12.9	-8.3	-17.9	-5.6	-12.4
Upper	-0.1 ;	-19.5;	0 ;	-0.5;	-7.9;	-12.3;	-5.1;	-13.7;
Isère	22.3 ;	10.3;	0 ;	0;	-0.7;	-3.4;	5.1;	0;
	38.8	37.4	6.1	5.6	6.8	1.9	10.5	7.2
Durance	-22.1;	-41.7;	-2.4;	-7.1;	-6.7;	-17.5;	-7.6;	-15.5;
	-12.2;	-32.0;	0;	0;	-3.3;	-11.7;	-3.9;	-10.1;
	1.6	-6.6	0	0	1.2	0	-0.7	-5.1

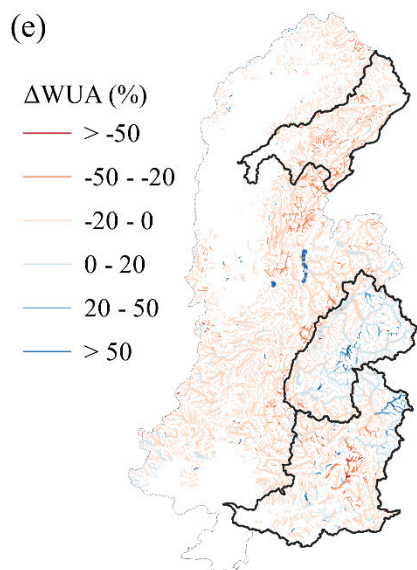
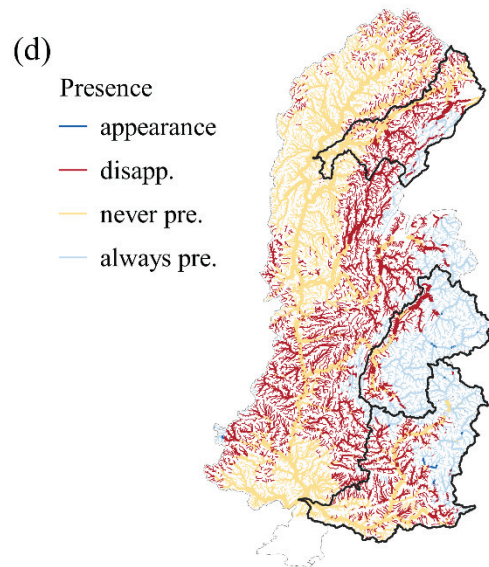
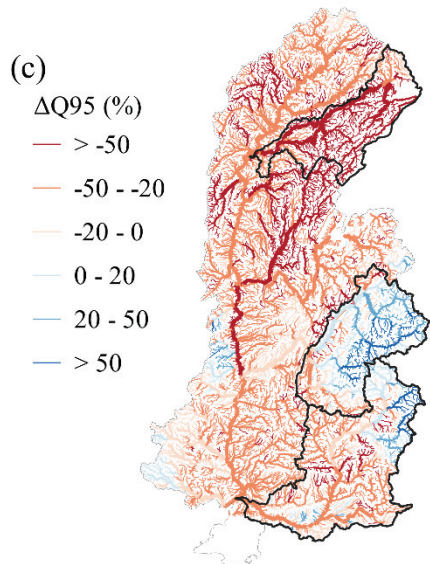
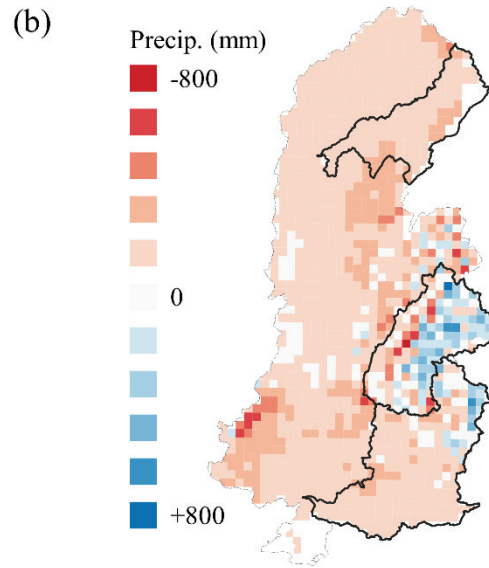
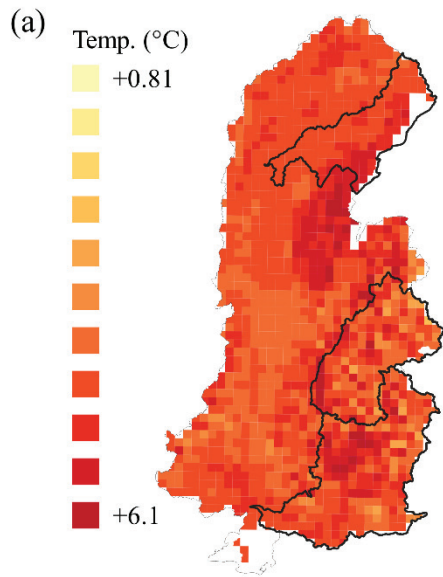
Spatial pattern of changes in the low flow characteristic $Q95$ is highly heterogeneous over the whole Rhône catchment in both scenarios (Table 1, Figures 3c and 5c). Some areas are negatively affected such the Northern part of the catchment (e.g. in Doubs sub-catchment where median diminution in $Q95$ is over 60% and 30%, under RCP8.5 and RCP4.5 respectively). Conversely, the Alps and a part of the Cévennes mountains demonstrate positive anomalies (e.g. a median increase of 10% and 22% in Upper Isère sub-catchment under RCP8.5 and RCP4.5, respectively). This contrasting spatial pattern may be due to changes in the main drivers of river flow regime. For example, in Jura, rivers are under karstic influences and experience severe low flows due to a limited groundwater storage. In such conditions, drier and warmer periods may generate more frequent and more severe droughts in summer. In the Alps, flow regime controlled by snowmelt may shift to pluvial regimes. Higher temperature will favour runoff processes causing higher discharges during the low flows period in winter (e.g. Milano et al., 2015).

SDMs predict important losses of geographical range for brown trout and sculpin under both scenarios. Brown trout could persist in the mountainous areas under RCP4.5 (Figures 3d and

5d). For sculpin, SDMs predict disappearance over the whole catchment under RCP8.5 with local exceptions in the Alps (Figure 4c). Under the moderate RCP4.5, sculpin should theoretically remain in Jura and locally in the Alps (Figure 6c). These results suggest that temperature is the main driver of both species distribution. Global warming forces them to shift to mountainous refuges. By contrast, barbel is currently present in the South, lower part of the catchment and should extend its distribution toward upstream reaches under both scenarios (Figures 4a and 6a).

Hydraulic habitat anomalies share spatial patterns mostly driven by hydrological anomalies under both scenarios (Figures 3, 4, 5 and 6). Similarly to ΔQ_{95} , ΔWUA values present locally important variations for the barbel and sculpin with high negative ΔWUA where Q_{95} decreases importantly (e.g. the median ΔWUA_{BAF} and ΔWUA_{CHA} equal -17.8% and -23.7%, respectively, in the Doubs catchment under RCP8.5) and moderate anomalies where ΔQ_{95} is low (e.g. median ΔWUA_{BAF} and ΔWUA_{CHA} equal 2.9% and 2.9%, respectively, in Upper Isère catchment under RCP8.5). Consequently, hydraulic habitats present more negative anomalies under RCP8.5 (Figures 4b and 4d) than under RCP4.5 (Figure 6b and 6d). Brown trout should be less impacted by hydrological changes than the two other species. For example, under pessimistic scenario, median ΔWUA_{TRF} , ΔWUA_{BAF} and ΔWUA_{CHA} equal -3.9%, -10.7% and -18.7% over whole catchment, respectively. These results suggest a lower sensitivity of brown trout to discharge changes compared to the two other species.

Uncertainty simulations indicate that the uncertainties concerning the alteration of hydraulic habitat are very high at the reach scale (Figure 7a). On the other hand, at the larger scale of sub-catchments, the differences in habitat alteration are less influenced by uncertainties. The difference between sub-catchment (for example between Upper Isère and Doubs sub-catchments with, respectively, median habitat alteration of 5.5% and -20.3% for WUA_{BAF} and scenario RCP 8.5) remain evident when uncertainties are propagated (Figure 7b).



0 50 100 km



Strahler order

1-2

3-4

>4

Figure 3: Estimated anomalies under scenario RCP 8.5, of mean temperature (a) and precipitation (b), relative anomalies of Q_{95} (c), and change in theoretical presence of brow trout (i.e. appearance, disappearance, never present, always present) (d), WUA_{TRF} (e).

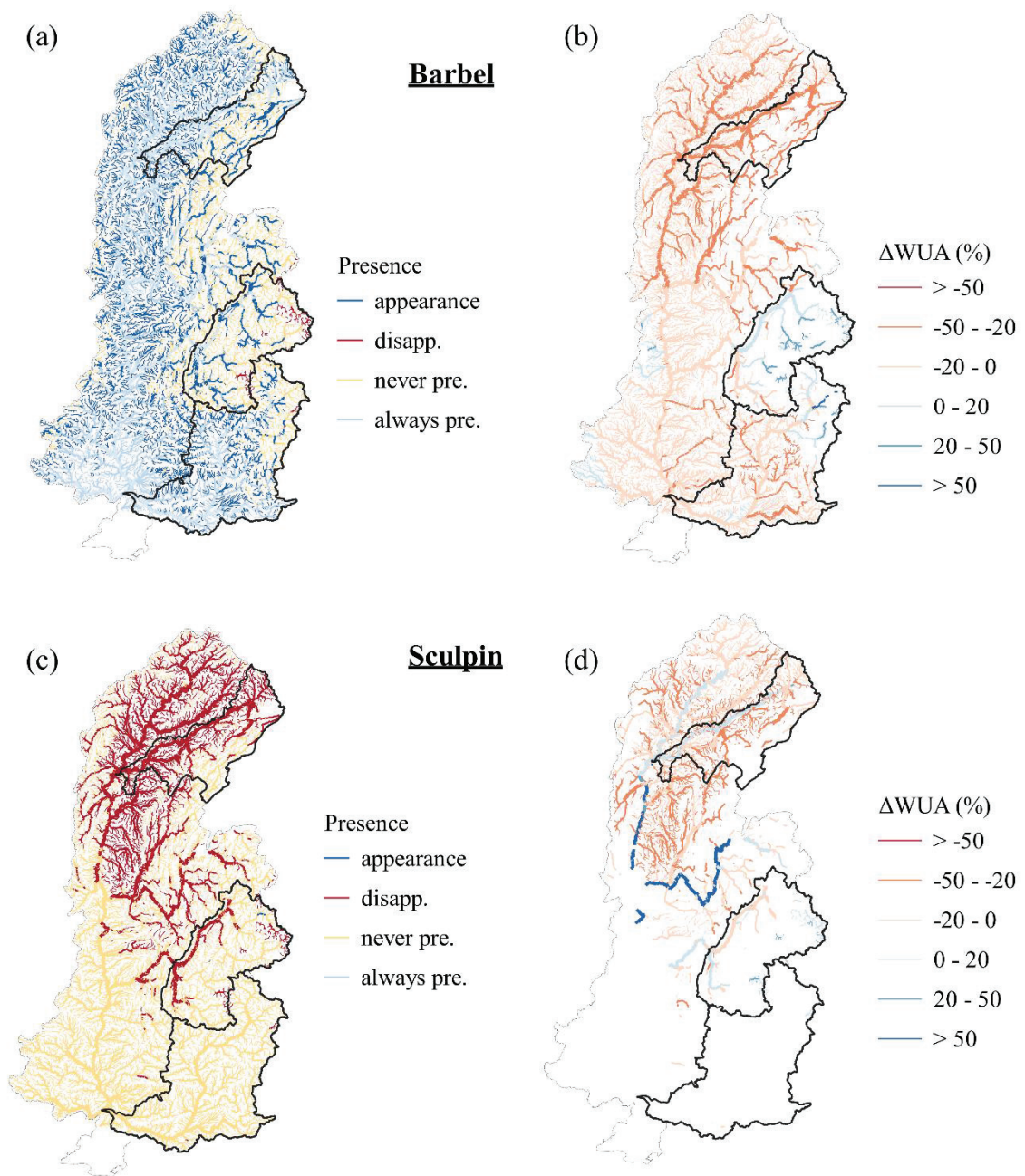
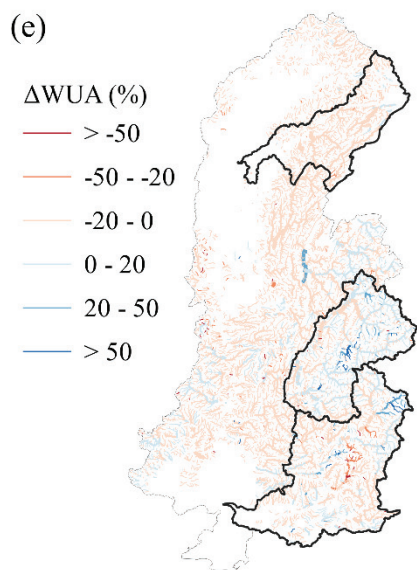
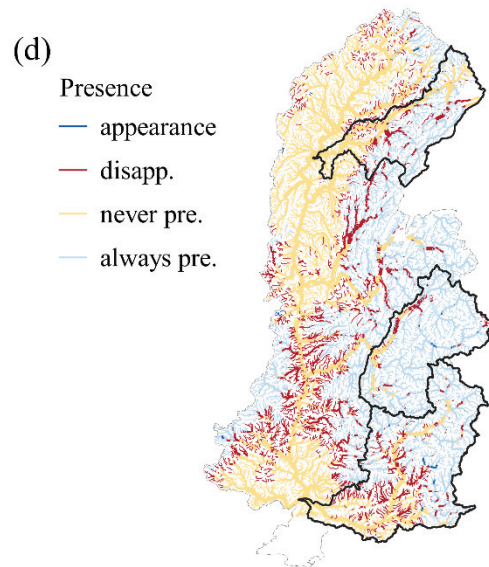
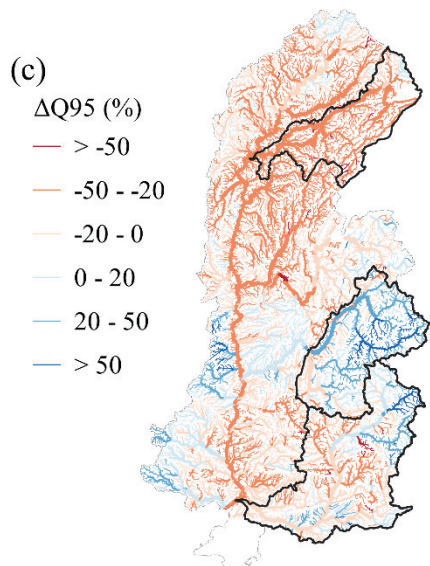
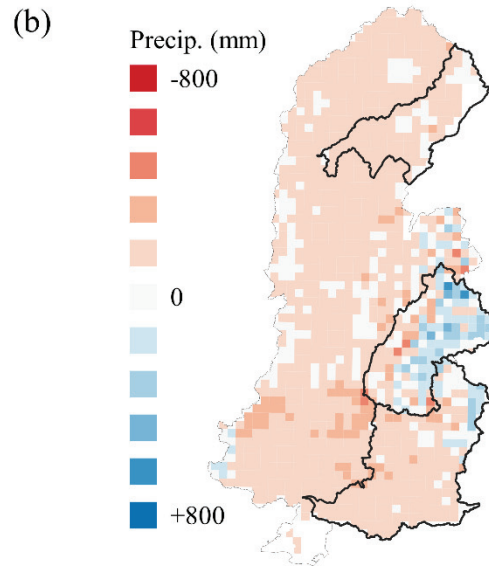
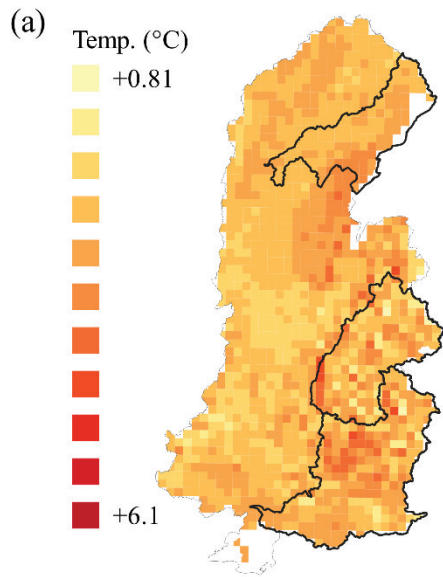


Figure 4: Change in theoretical presence and habitat anomalies of barbell (a, b) and sculpin (c, d) under scenario RCP 8.5.



0 50 100 km



Strahler order

1-2

3-4

>4

Figure 5: Estimated anomalies under climate scenario RCP 4.5, of mean temperature (a) and precipitation (b), relative anomalies of Q95 (c), and change in theoretical presence of brow trout (d), WUA_{TRF} (e).

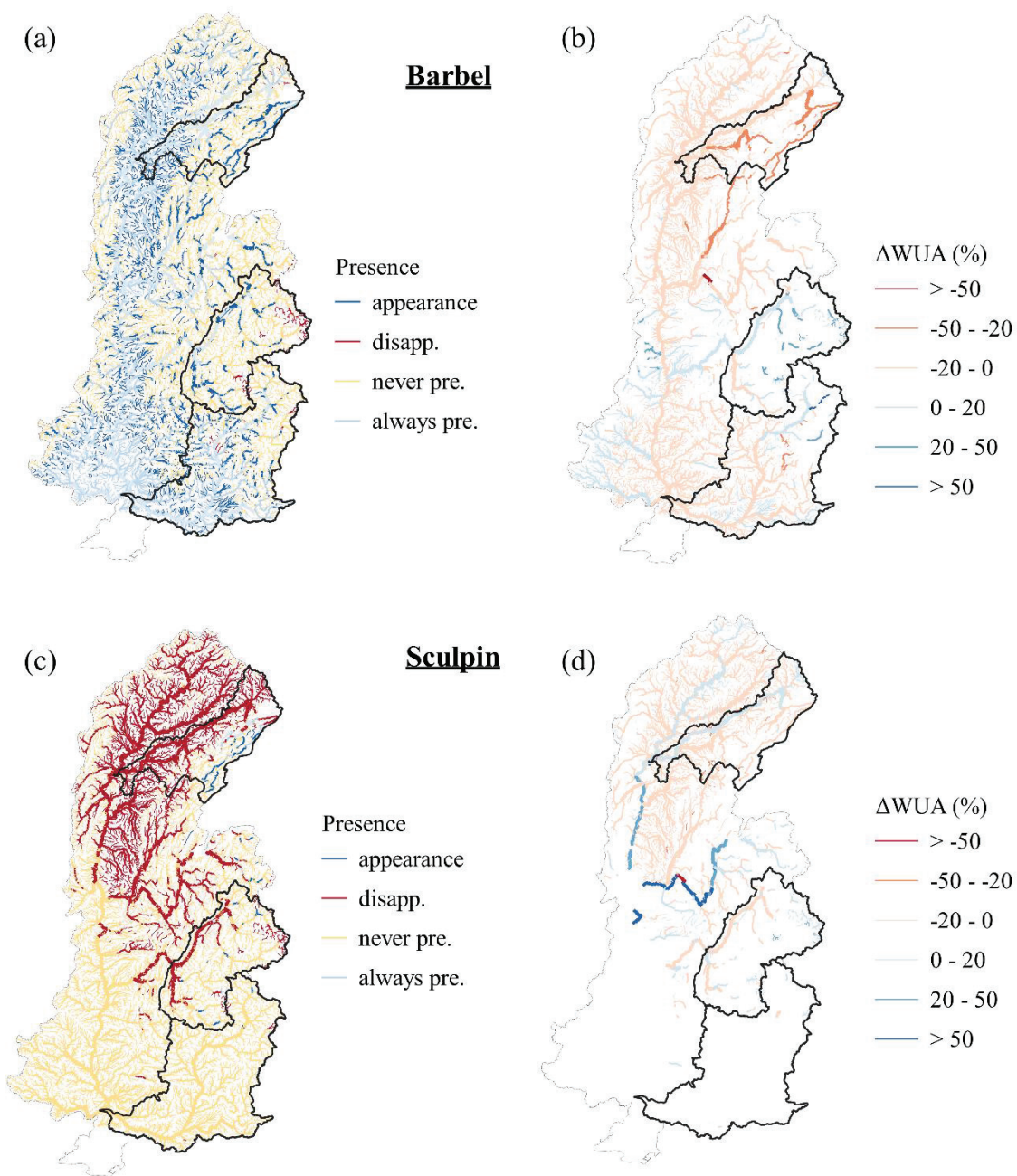


Figure 6: Change in theoretical presence and habitat anomalies of barbell (a, b) and sculpin (c, d) under scenario RCP 4.5.

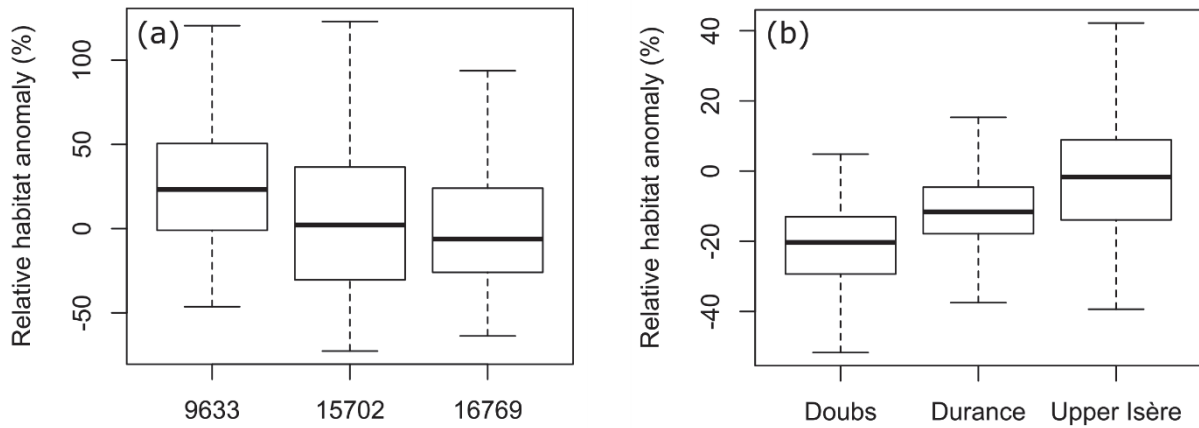


Figure 7: Uncertainties of relative alterations, here ΔWUA_{BAF} for climate scenario RCP 8.5, estimated (a) at reach-scale, and (b) at sub-catchment scale. The habitat alterations estimated over three randomly selected reaches (a) are difficult to differentiate after propagation of uncertainties (the box plots correspond to $n = 100$ alteration values). Inversely, the habitat alterations estimated over the three sub-catchments (b) remain stable and differentiable after propagation of uncertainties (the box plots correspond to median values of $n = 100$ alteration values corresponding to each reach of the sub-catchments).

4. Discussion

Our results demonstrate that SDM and HABM simulations can provide very different information, with SDM results essentially driven by temperature and HABM results by river flow, and with different expressions depending on species. Results show that climate change will induce a double penalty for sculpin and brown trout: SDMs show that these species should have strong reduction in geographic distribution and HABMs show that their hydraulic habitat suitabilities should be also reduced within their geographic distribution. However, the expected impacts are less dramatic for brown trout, which can find thermal refugees in the Alps, and whose hydraulic suitability is less reduced in medium to large streams. This is consistent with the preference of adult trout for lower velocities than sculpin: in medium to large streams, discharge reductions can generate more suitable hydraulic conditions.

SDM and HABM projections are clearly opposite for barbel. SDM results reflect that warming should extend their distribution, whereas HABM indicate that discharge reductions should decrease their hydraulic habitat suitability. Barbel is a rheophilic species typically using fast-flowing and deep microhabitats, and is known to be strongly affected by discharge reductions (Lamouroux and Olivier, 2015). It is therefore likely that discharge reductions will prevent the extension of this species in many cases, even if temperature becomes more favourable. These differences support the need of further combining SDM and HABM simulations.

In our study, we combined SDM and HABM by making simulations of habitat suitabilities only where the species likely occurs. This has a strong influence on results: for example, decrease in sculpin habitat suitability mostly concerns the North of the catchment because the sculpin occurs less in the South. This demonstrates the importance of putting habitat simulations in a wider ecological context, which was not always done in previous approaches of the same type (Damiani et al., 2019). In the future, we can imagine narrowing further the gap between SDM and HABM, for example by including more proximate hydraulic descriptors (HG and HABM results) as input variables of SDMs, as well other parameters such as water temperature (Beaufort et al., 2016) or even nutrient fluxes (Dupas et al., 2013). In particular, water temperature modelling is attractive in these approaches because temperature may be locally heterogeneous in the hydrographic network, with the influence of tributaries, groundwater sources or shading (Beaufort et al., 2020). This local heterogeneity may help fish assemblage to adapt to global warming. Further combinations of these modelling approaches will contribute to provide more realistic projections at the large catchment to global scales.

Although based on a single distributed hydrologic model, and although our partial uncertainty analysis shows that any reach-scale interpretation would be dangerous, our results illustrate that climate change may have very heterogeneous local expressions in the future. For example, as opposed to the Upper-Isère sub-catchment, the Doubs sub-catchment seems to be more affected by climate change. This illustrates that adaptations to climate change will need to be rapid, context-dependent and local.

Our work remains a methodological exercise at this stage, because catchment-scale modelling exercises inevitably suffer from many limits. Although we have tried to address uncertainty issues, they were not fully accounted for. In particular, there are identified biases of the SAFRAN reanalysis used as climate forcing during the present period, in particular in mountainous regions where precipitation can be significantly underestimated. A way forward would be to use other reanalysis products more suited to mountain areas such as SPAZM (Gottardi et al., 2012). Moreover, it is well known that climate projections present a high level of uncertainty, that is enhanced by the use of chained of models (global climate model, runs with different initial conditions, disaggregation and bias correction methods, catchment hydrological models), and thus provide also quite uncertain hydrological outputs (i.e. discharge in reaches). The recommended strategy to avoid this (or at least to assess the level of uncertainty associated with the hydrological outputs) is to perform multiple simulations, including several

hydrological models (Vidal et al., 2016). SDM and HBM models also have their strong uncertainties, as well as their input variables themselves. These could be further investigated, e.g. by analysing the differences between the various SDM submodels, or developing HABM models for specific size classes that may differ in their habitat selection.

Conclusion

Despite these limits, our approach demonstrates the interest of combining SDM and HABM for improved predictions of the ecological effects of climate change. Repeating such simulations with various hydrological models is needed, for managers to assess the potential solutions they can implement (e.g., changes in water abstraction, conservation of thermal refugia, barrier removals for facilitating species resilience). Because the impacts of climate change will be obviously heterogeneous within large catchments, our approach can contribute to identify improved compromises between water uses and ecological impacts in regions (such as the Doubs sub-catchment) where these impacts will likely be strong.

Chapitre 6 : Conclusion et perspectives des travaux de thèse

6.1 Conclusion générale

Les relations de géométrie hydraulique peuvent être utilisées comme un outil permettant la quantification et la prédiction des variations spatiales et temporelles des caractéristiques hydrauliques moyennes des tronçons à travers le réseau hydrographique. C'est un outil largement utilisé dans les études environnementales et en ingénierie pour la gestion quantitative des débits ou de la température de l'eau dans les bassins versants par exemple. Ces applications tendent à croître dans un contexte de changement climatique et d'augmentation des pressions anthropiques. Cependant, les relations de géométrie hydraulique présentent des variations entre les tronçons qui sont peu comprises, particulièrement pour les relations de géométrie hydraulique stationnelle. Cela se traduit par l'utilisation de modèles « moyen » par défaut qui, lorsqu'ils sont généralisés présentent une large gamme d'incertitudes. Mes travaux de thèse ont cherché à répondre à ces problématiques.

En effet, j'ai assemblé un jeu de données unique de géométrie hydraulique stationnelle et longitudinale à l'échelle du tronçon provenant du plus de 1000 tronçons collectés dans des cours d'eau diversifiés et à travers plusieurs continents. Ces données ont été reliées à de nombreuses variables explicatives. Dans le chapitre 3, j'ai quantifié les relations entre les exposants de géométrie hydraulique stationnelle (b et f) et proposé plusieurs modèles de géométrie hydraulique stationnelle statistiques basés sur la disponibilité des variables explicatives à partir de données françaises. J'ai également testé la généralité des relations observées en utilisant des données de géométrie hydraulique stationnelle provenant de diverses régions géographiques (France, Nouvelle-Zélande, Royaume-Uni) et estimées de manières différentes (à partir d'observations sur le terrain seulement et à partir de modèles numériques calés à un ou plusieurs débits). J'ai aussi testé la cohérence des résultats observés avec les attentes théoriques de la géométrie hydraulique stationnelle. Dans le chapitre 4, j'ai saisi l'opportunité de proposer des modèles statistiques de géométrie hydraulique, combinant les approches stationnelle et longitudinale, en me basant sur un très grand nombre de données en France et en Nouvelle-Zélande. Finalement, dans le chapitre 5, j'ai proposé un cas d'application de ces modèles pour quantifier l'impact écologique du changement climatique dans le bassin versant du Rhône. Les

modèles de géométrie hydraulique sont alors directement intégrés dans une chaîne de couplage de plusieurs modèles (modèles climatiques, hydrologiques, d'habitats physiques).

Dans un premier temps, les résultats du chapitre 3 montrent qu'il est possible de prédire la géométrie hydraulique stationnelle. Les exposants b et f sont fortement reliés à des variables explicatives généralement locales et pouvant facilement être estimées à partir de mesures sur le terrain ou d'analyses d'images aériennes. Ces résultats montrent que les variations de l'exposant de largeur b sont particulièrement bien expliquées par des variables décrivant la forme du chenal et suggèrent une influence avec les apports sédimentaires du bassin versant. L'exposant de hauteur f est moins bien expliqué mais semblerait être lié à la résistance à l'écoulement. Le nombre de Froude apparaît être une variable majeure pour prédire les exposants b et f suggérant une forte influence de la forme longitudinale du chenal.

Par ailleurs, j'ai montré la généralité des relations de géométrie hydraulique stationnelle. En effet, les relations observées entre les exposants de géométrie hydraulique stationnelle et les variables hydrauliques (nombre de Froude, ratio de largeur mouillée sur la largeur plein bord) sont très similaires entre différents jeux de données indépendants et intercontinentaux. Cela montre également que ces relations sont cohérentes avec les attentes théoriques concernant la géométrie hydraulique stationnelle.

Dans un deuxième temps, les modèles combinant la géométrie hydraulique stationnelle et longitudinale construits dans le chapitre 4 montrent qu'il est possible de prédire de manière satisfaisante les caractéristiques hydrauliques en tout point du réseau hydrographique et à tout débit. Ces modèles présentent de bonnes performances pour prédire la géométrie hydraulique longitudinale mais des performances plus faibles pour la géométrie hydraulique stationnelle. Par ailleurs, les modèles intercontinentaux sont aussi performants que les modèles nationaux et les paramètres de géométrie hydraulique présentent des similitudes dans leurs réponses aux variables explicatives soulignant encore la généralité des relations de géométrie hydraulique.

Les modèles développés présentent des performances nettement supérieures aux anciens modèles. Plus concrètement, en France, les prédictions nationales des caractéristiques hydrauliques des cours d'eau ont été mises à jour dans la base de données RHT en utilisant les nouveaux modèles et remplacent ainsi les anciennes estimations de géométrie hydraulique provenant des modèles d'Estimkart (Lamouroux et al., 2010). La comparaison des données observées avec les prédictions d'Estimkart et les prédictions des nouveaux modèles (Figure

6.1.) montrent que les nouvelles prédictions sont sensiblement meilleures. La mise à jour de la base de données a dû toutefois prendre en compte la gamme de validité des prédictions des forêts aléatoires utilisées dans mes travaux (cf. chapitre 4). Par exemple, les modèles ne peuvent pas prédire les largeurs mouillées au-delà de 40 m (Figure 6.2). Dans ce cas précis, les anciennes prédictions d'Estimkart ont été conservées.

Enfin, les résultats du chapitre 5 montrent l'intérêt de poursuivre les exercices de couplages des modèles de géométrie hydraulique pour des études à large échelle. En effet, l'application des modèles de géométrie hydraulique a permis de traduire les altérations de débits en altérations d'habitat sur l'ensemble du réseau hydrographique rhodanien avec succès. Ces modèles de géométrie hydraulique présentent alors un potentiel considérable d'amélioration des outils de gestion des bassins versants. En effet, ces modèles peuvent renseigner sur les conditions physiques de l'habitat, le transport des contaminants, les flux de nutriments, le dépôt de sédiments fins et la température de l'eau.

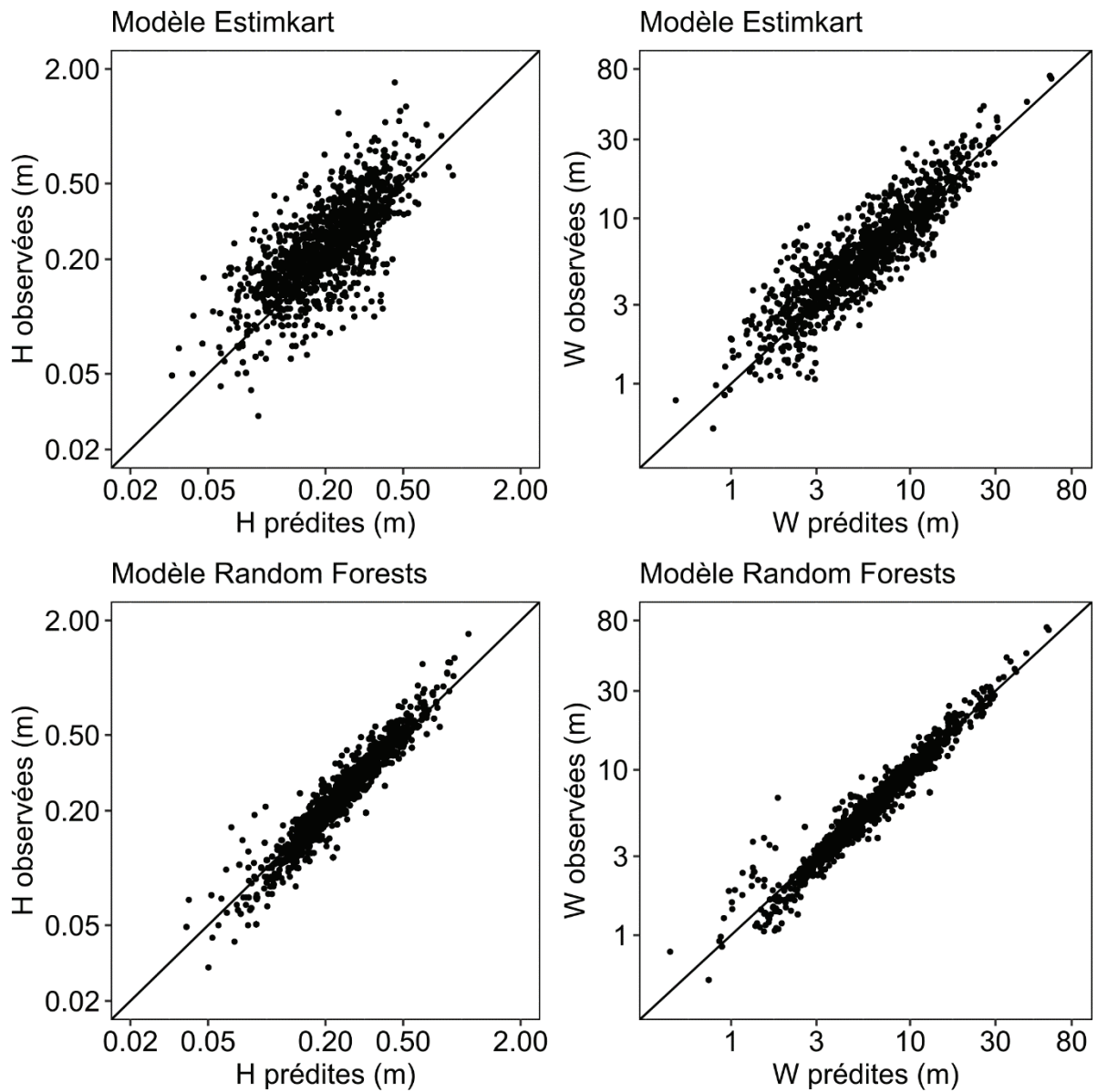


Figure 6.1 : Comparaisons des valeurs observées de hauteurs d'eau (H) et largeurs mouillées (W) moyennes au débit de mesure en France avec les prédictions des modèles Estimkart et les nouveaux modèles conçus en utilisant les approches statistiques de type « forêts aléatoires » (*Random Forests*).

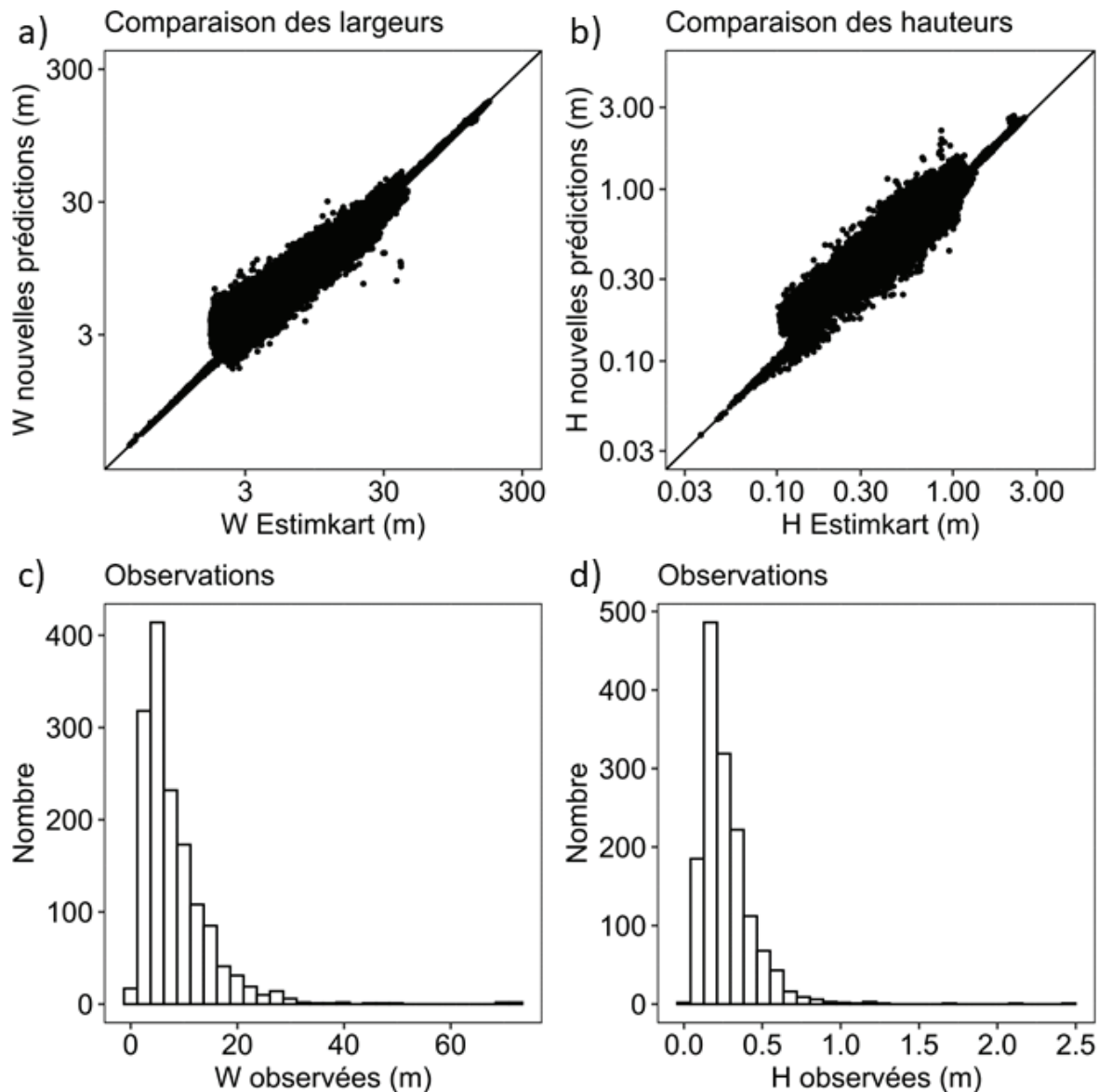


Figure 6.2 : Comparaison des largeurs mouillées (W) et hauteurs d'eau (H) moyennes au module interannuel prédites par les nouveaux modèles français (axe des y) avec les estimations basiques disponibles dans le réseau RHT actuel provenant des modèles Estimkart (axe des x). Notons que les prévisions sont cohérentes jusqu'à des largeurs de l'ordre de 40 m ; au-delà les forêts aléatoires prédisent une largeur constante et sont moins fiables. Ceci est dû à la gamme de calibration des modèles présentés dans (c) et (d). (c) et (d) présentent les distributions des largeurs et hauteurs d'eau observées au débit de mesure au sein des données utilisées pour les modèles français. Les prédictions en dehors de la gamme de calibration ne doivent pas être pris en considération, dans ce cas précis, les anciennes estimations des modèles Estimkart ont été conservées.

6.2 Limites des travaux et perspectives d'améliorations

Comme évoqué dans le chapitre 2, bien que sensiblement meilleures que les modèles moyens, les modèles développés dans mes travaux présentent inévitablement des incertitudes. Pour les réduire au maximum, j'ai essentiellement utilisé dans ces travaux des données de géométrie

hydraulique à l'échelle du tronçon de cours d'eau qui sont plus robustes face aux erreurs de mesures (Stewardson, 2005 ; Navratil et Albert, 2010). Des efforts ont également été faits afin de filtrer au mieux les données utilisées en supprimant les données aberrantes (cf. chapitre 2). Toutefois, les données proviennent de sources multiples avec de nombreux opérateurs qui ont renseigné les données de manières diverses et il est ainsi inévitable de garder un certain nombre d'erreur dans le jeu de donnée d'entrée qui explique un part des incertitudes à la sortie des modèles. Un travail supplémentaire sur l'amélioration des données permettrait certainement de gagner en précision des modèles.

Par ailleurs, une part des incertitudes des relations de géométrie hydraulique peut être associée aux altérations anthropiques des tronçons. Dans ces travaux, j'ai effectué une pré-sélection des données sur des critères d'altérations morphologiques et hydrologiques. Néanmoins, la notion de cours d'eau « naturel » ne présentant aucune altération est discutable, particulièrement en France où historiquement les cours d'eau et les bassins versants ont connu de nombreux aménagements pouvant affecter la morphologie actuelle du chenal (Dufour et Piégay, 2009). Dans le chapitre 4, les analyses des performances des modèles selon plusieurs groupes de tronçons aux degrés d'altérations différents n'ont pas montré de différences importantes. Toutefois, une meilleure connaissance de l'importance et du type d'altération des tronçons étudiés dans le jeu de données permettrait d'améliorer la compréhension de la géométrie hydraulique.

6.3 Perspectives générales

Un premier champ de perspective possible est l'amélioration des modèles par l'acquisition de nouvelles variables explicatives candidates qui n'ont pas été prises en compte dans ces travaux. A l'échelle du tronçon, une meilleure description des différentes formes de résistance à l'écoulement pourrait améliorer la modélisation de la géométrie hydraulique stationnelle et particulièrement de l'exposant f . L'influence des formes de résistance est encore peu comprise en raison probablement de variables trop simplificatrices. Les formes de résistance à l'écoulement sont nombreuses et leurs descriptions à l'échelle du tronçon peuvent s'avérer complexes d'autant plus que leurs effets sont très variables localement (Rice and Church, 1996). Ces formes de résistance comprennent, par exemple, les embâcles (bois mort par exemple), la forme du lit, la présence de rochers, les chutes, les berges ou bien même la sinuosité du cours d'eau. Durant mes travaux de thèse, j'ai réalisé des mesures pour décrire la résistance à l'écoulement sur une quinzaine de tronçons de cours d'eau. Ces mesures décrivent, notamment,

les dimensions de chute d'eau, la forme longitudinale du cours d'eau, les proportions de faciès d'écoulement, la granulométrie du cours d'eau, les variations de pente du lit ainsi que les pentes des berges et leurs compositions. Le travail d'analyse des données collectées n'a pas encore été réalisé car il n'était pas central par rapport à la problématique générale de la thèse. Toutefois une perspective à court terme serait d'analyser les liens entre les exposants de géométrie hydraulique stationnelle et les différents descripteurs de résistance à l'écoulement ainsi que les interactions entre ceux-ci. Des travaux complémentaires sont également attendus pour trouver de méthodes de descriptions simples des autres formes de résistance à l'échelle du tronçon telles que les embâcles ou les effets des berges. Une meilleure quantification de la résistance dans les tronçons de cours d'eau permettrait *in fine* de mieux comprendre les relations entre les exposants b et f et celle-ci.

En complément, les récentes avancées en matière de télédétection ont montré qu'il est possible d'informer des indicateurs hydromorphologiques de bassins versants ou de tronçons (Piégay et al., 2020). Cela offre de nombreuses opportunités d'amélioration des modèles en utilisant des variables décrivant mieux les processus d'apports sédimentaires des bassins versants (par exemple, Cavalli et al., 2013 ; Crema et Cavalli, 2018), qui apparaissent fortement influencer l'exposant de géométrie hydraulique stationnelle b , ou alors les formes de rugosité au sein du chenal (Vázquez et al., 2017). Par ailleurs, l'acquisition de données issues de la télédétection et traitées à des échelles régionales permet désormais de caractériser certains indicateurs sur presque l'ensemble de réseau hydrographique à l'échelle régionale. Par exemple, Michez et al. (2017) ont caractérisé la végétation rivulaire sur une grande partie du réseau hydrographique en Belgique à partir de données LIDAR et photogrammétriques. Demarchi et al., (2017) ont développé une méthode basée sur des données LIDAR et d'images aériennes pour caractériser des indicateurs hydromorphologiques similaires à Widerkehr (2012) (style fluvial, la largeur de la bande active) sur le réseau hydrographique de la région de Piémont en Italie. La généralisation et l'application de ces approches à l'échelle nationale offrirait des opportunités importantes pour les modèles construits dans le chapitre 4. En effet, l'ajout de variables explicatives telles que la végétation rivulaire, le style fluvial ou la largeur de la bande active, disponibles à large échelle, pourrait potentiellement améliorer les modèles.

Enfin, les résultats du chapitre 5 ouvre un champ de perspectives concernant l'application des modèles de géométrie hydraulique dans un contexte de gestion des bassins versants. En effet, les modèles construits sont facilement utilisables et présentent un large potentiel d'applications.

Dans ce chapitre, j'ai montré l'intérêt de coupler ces modèles avec des modèles hydrologiques afin de traduire les informations de débits en caractéristiques hydrauliques. Ces nouveaux modèles de géométrie hydraulique sont par ailleurs actuellement utilisés par Clarisse Judes dans sa thèse qui porte sur l'étude de la réponse des organismes aquatiques face aux éclusées des barrages hydroélectriques. Les éclusées se caractérisent par des variations significatives et brusques du débit en aval des barrages. Les modèles de géométrie hydrauliques permettent de traduire ces variations de débits en variations des conditions hydrauliques (vitesses, hauteurs) puis en variations d'habitat physique pour les organismes étudiés en couplant avec des modèles d'habitat hydraulique.

De manière générale, de nombreuses études environnementales à l'échelle de bassin versants nécessitent des estimations précises des caractéristiques hydrauliques dans le réseau hydrographique comme pour, par exemple, modéliser les flux d'éléments pathogènes (Whelan et al., 1999). Plusieurs études environnementales ont utilisé les anciennes prédictions de géométrie hydraulique provenant d'Estimkart pour modéliser l'altération de l'habitat dans le bassin de la Seine (Miguel et al., 2016) ou le flux d'azote dans le réseau hydrographique français (Dupas et al., 2013). Il est ainsi envisageable de revisiter ces études en utilisant les nouvelles prédictions de géométrie hydraulique issues des travaux de thèse.

A titre d'exemple d'utilisation des résultats de cette thèse, on pourrait également penser aux travaux d'amélioration du modèle de température de l'eau T-NET (Beaufort et al., 2016, thèse de Hanieh Seyedhashemi) qui cherchent à améliorer le modèle T-NET en prenant en compte des informations concernant les effets anthropiques (présence de barrages par exemple). Jusqu'à présent, ces modèles de température utilisent les anciens modèles de géométrie hydraulique Estimkart (Lamouroux et al., 2010) pour traduire les débits en caractéristiques hydrauliques dans le bassin versant de la Loire. L'utilisation des nouvelles estimations de géométrie hydrauliques permettrait plus que probablement d'améliorer le modèle T-NET (Figure 6.3).

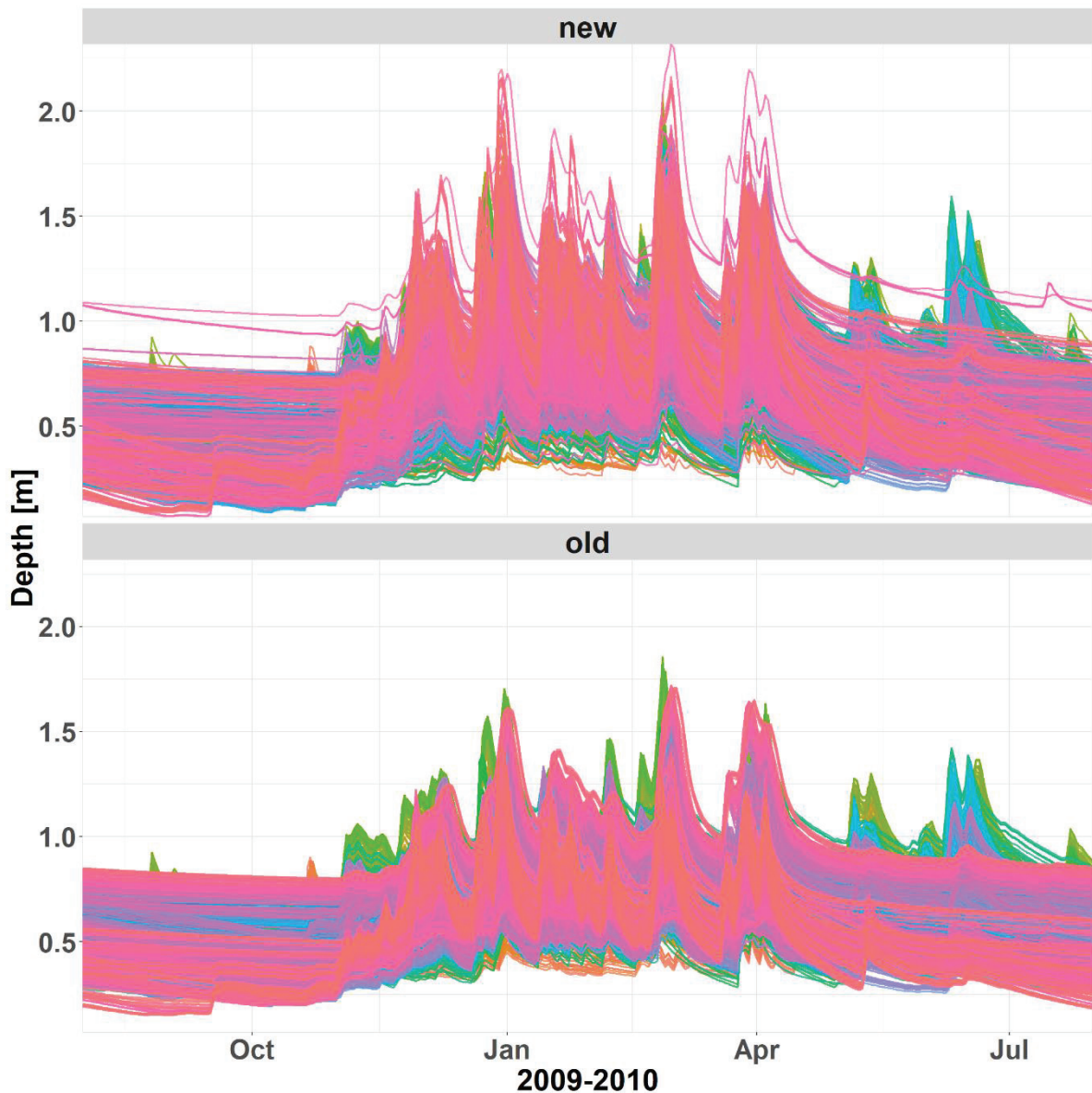


Figure 6.3: Variations de la hauteur d'eau moyenne (Depth) des tronçons de cours d'eau de rang de Strahler 5 dans le bassin versant de la Loire (chaque couleur représente un tronçon) pour l'année hydrologique 2009-2010. Un modèle hydrologique fournit des chroniques de débits sur l'ensemble du réseau hydrographique du bassin versant de la Loire. Ces débits sont ensuite traduits en caractéristiques hydrauliques en utilisant les nouveaux modèles « new » ou les anciens modèles Estimkart « old » (figure fournie par Hanieh Seyedhashemi). Les variations de hauteurs d'eau semblent mieux représentées avec les nouvelles prédictions permettant potentiellement une meilleure modélisation de la température.

Références bibliographiques

- Aberle, J., Smart, G.M., 2003. The influence of roughness structure on flow resistance on steep slopes. *Journal of Hydraulic Research* 41, 259–269.
<https://doi.org/10.1080/00221680309499971>
- Araújo, M.B., Whittaker, R.J., Ladle, R.J., Erhard, M., 2005. Reducing uncertainty in projections of extinction risk from climate change. *Global Ecology and Biogeography* 14, 529–538. <https://doi.org/10.1111/j.1466-822X.2005.00182.x>
- Ashmore, P., Sauks, E., 2006. Prediction of discharge from water surface width in a braided river with implications for at-a-station hydraulic geometry. *Water Resources Research* 42.
<https://doi.org/10.1029/2005wr003993>
- Ayllón, D., Railsback, S.F., Harvey, B.C., García Quirós, I., Nicola, G.G., Elvira, B., Almodóvar, A., 2019. Mechanistic simulations predict that thermal and hydrological effects of climate change on Mediterranean trout cannot be offset by adaptive behaviour, evolution, and increased food production. *Science of The Total Environment* 693, 133648.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133648>
- Baglinière, E., 2018. Données ONEMA BDMAP 1966/2012. UMS PatriNat (OFB-CNRS-MNHN), Paris. <https://doi.org/10.15468/huwyq6>
- Bakker, M., Costa, A., Silva, T.A., Stutenbecker, L., Girardclos, S., Loizeau, J.-L., Molnar, P., Schlunegger, F., Lane, S.N., 2018. Combined Flow Abstraction and Climate Change Impacts on an Aggrading Alpine River. *Water Resources Research* 54, 223–242.
<https://doi.org/10.1002/2017WR021775>
- Bates, B.C., 1990. A statistical log piecewise linear model of at-a-station hydraulic geometry. *Water Resources Research* 26, 109–118. <https://doi.org/10.1029/WR026i001p00109>
- Baudoin, J.-M., Boutet-Berry, L., Cagnant, M., Gob, F., Kreutzenberger, K., Lamand, F., Malavoi, J.R., Marmonier, P., Pénil, C., Rivière, C., Sadot, M., Tamisier, V., Tual, M., 2017. Carhyce - Caractérisation hydromorphologique des cours d'eau. Protocole de recueil de données hydromorphologiques à l'échelle de la station sur les cours d'eau prospectables à pied (Technical report). Agence française pour la biodiversité (AFB).

- Beaufort, A., Moatar, F., Curie, F., Ducharne, A., Bustillo, V., Thiéry, D., 2016. River temperature modelling by Strahler order at the regional scale in the Loire river basin, France. *River Research and Applications* 32, 597–609. <https://doi.org/10.1002/rra.2888>
- Beaufort, A., Moatar, F., Sauquet, E., Loicq, P., Hannah, D.M., 2020. Influence of landscape and hydrological factors on stream–air temperature relationships at regional scale. *Hydrological Processes* 34, 583–597. <https://doi.org/10.1002/hyp.13608>
- Bertrand, M., Liébault, F., 2019. Active channel width as a proxy of sediment supply from mining sites in New Caledonia. *Earth Surface Processes and Landforms* 44, 67–76. <https://doi.org/10.1002/esp.4478>
- Bieger, K., Rathjens, H., Allen, P.M., Arnold, J.G., 2015. Development and Evaluation of Bankfull Hydraulic Geometry Relationships for the Physiographic Regions of the United States. *J Am Water Resour Assoc* 51, 842–858. <https://doi.org/10.1111/jawr.12282>
- Billi, P., Preciso, E., Salemi, E., 2014. Rhythmic roughness elements and channel morphology of gravel bed rivers. *Zeitschrift für Geomorphologie* 58, 337–366. <https://doi.org/10.1127/0372-8854/2013/0127>
- Bjerklie, D.M., Lawrence Dingman, S., Vorosmarty, C.J., Bolster, C.H., Congalton, R.G., 2003. Evaluating the potential for measuring river discharge from space. *Journal of Hydrology* 278, 17–38. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00129-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00129-X)
- Bjerklie, D.M., Moller, D., Smith, L.C., Dingman, S.L., 2005. Estimating discharge in rivers using remotely sensed hydraulic information. *Journal of Hydrology* 309, 191–209. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.11.022>
- Booker, D.J., 2016. Generalized models of riverine fish hydraulic habitat. *Journal of Ecohydraulics* 1, 31–49. <https://doi.org/10.1080/24705357.2016.1229141>
- Booker, D.J., 2010. Predicting wetted width in any river at any discharge. *Earth Surface Processes and Landforms* 35, 828–841. <https://doi.org/10.1002/esp.1981>
- Booker, D.J., Acreman, M.C., 2007. Generalisation of physical habitat–discharge relationships. *Hydrology and Earth System Sciences* 11, 141–157. <https://doi.org/10.5194/hess-11-141-2007>

Booker, D.J., Dunbar, M.J., 2008. Predicting river width, depth and velocity at ungauged sites in England and Wales using multilevel models. *Hydrological Processes* 22, 4049–4057. <https://doi.org/10.1002/hyp.7007>

Booker, D.J., Whitehead, A.L., 2018. Inside or outside: quantifying extrapolation across river networks. *Water Resources Research* 54, 6983–7003. <https://doi.org/10.1029/2018WR023378>

Booker, D.J., Woods, R.A., 2014. Comparing and combining physically-based and empirically-based approaches for estimating the hydrology of ungauged catchments. *Journal of Hydrology* 508, 227–239. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.007>

Bovee, K.D., 1982. A guide to stream habitat analysis using the Instream Flow Incremental Methodology. IFIP No. 12 (Federal Government Series No. 82/26), FWS/OBS. U.S. Fish and Wildlife Service.

Branger, F., Gouttevin, I., Tilman, F., Cipriani, T., Barachet, C., Montginoul, M., Le Gros, C., Sauquet, E., Braud, I., 2016. Modélisation hydrologique distribuée du Rhône: rapport final.

Branger, F., Gouttevin, I., Tilmant, F., Cipriani, T., Barachet, C., Montginoul, M., Le Gros, C., Sauquet, E., Braud, I., Leblois, E., 2018. A distributed hydrological model to assess the impact of global change on water resources in the Rhône catchment. Presented at the I.S.RIVERS 2018, Lyon, France.

Branger, F., Kermadi, S., Jacqueminet, C., Michel, K., Labbas, M., Krause, P., Kralisch, S., Braud, I., 2013. Assessment of the influence of land use data on the water balance components of a peri-urban catchment using a distributed modelling approach. *Journal of Hydrology* 505, 312–325. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.09.055>

Bravard, J.P., Petit, F., 1997. Les cours d'eau: dynamique du système fluvial. Armand Colin, Paris.

Breiman, L., 2001. Random Forests. *Machine Learning* 45, 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>

Bret, V., Capra, H., Gouraud, V., Lamouroux, N., Piffady, J., Tissot, L., Rivot, E., 2017. Understanding inter-reach variation in brown trout (*Salmo trutta*) mortality rates using a hierarchical Bayesian state-space model. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 74, 1612–1627. <https://doi.org/10.1139/cjfas-2016-0240>

Castro, J.M., Jackson, P.L., 2001a. Bankfull Discharge Recurrence Intervals and Regional Hydraulic Geometry Relationships: Patterns in the Pacific Northwest, Usa1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 37, 1249–1262. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2001.tb03636.x>

Castro, J.M., Jackson, P.L., 2001b. Bankfull Discharge Recurrence Intervals and Regional Hydraulic Geometry Relationships: Patterns in the Pacific Northwest, Usa1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 37, 1249–1262. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2001.tb03636.x>

Cavalli, M., Trevisani, S., Comiti, F., Marchi, L., 2013. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. *Geomorphology, Sediment sources, source-to-sink fluxes and sedimentary budgets* 188, 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.05.007>

Chow, V.T., 1959. *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill Civil Engineering Series.

Church, M., Zimmermann, A., 2007. Form and stability of step-pool channels: Research progress. *Water Resources Research* 43. <https://doi.org/10.1029/2006wr005037>

Cleveland, W., 1981. LOWESS: a program for smoothing scatterplots by robust locally weighted regression. *The American Statistician* 35. <https://doi.org/10.2307/2683591>

Close, M.E., Abraham, P., Humphries, B., Lilburne, L., Cuthill, T., Wilson, S., 2016. Predicting groundwater redox status on a regional scale using linear discriminant analysis. *Journal of Contaminant Hydrology* 191, 19–32. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2016.04.006>

Copeland, R., Soar, P., Thorne, C., 2005. Channel-Forming Discharge and Hydraulic Geometry Width Predictors in Meandering Sand-Bed Rivers, in: *Impacts of Global Climate Change, Proceedings*. Presented at the Proceedings 2005 World Water and Environmental Resources Congress: Impacts of Global Change, pp. 1–12. [https://doi.org/10.1061/40792\(173\)568](https://doi.org/10.1061/40792(173)568)

Crema, S., Cavalli, M., 2018. SedInConnect: a stand-alone, free and open source tool for the assessment of sediment connectivity. *Computers & Geosciences* 111, 39–45. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.10.009>

Cutler, D.R., Edwards, T.C., Beard, K.H., Cutler, A., Hess, K.T., Gibson, J., Lawler, J.J., 2007. Random Forests for Classification in Ecology. *Ecology* 88, 2783–2792.
<https://doi.org/10.1890/07-0539.1>

Damiani, M., Lamouroux, N., Pella, H., Roux, P., Loiseau, E., Rosenbaum, R.K., 2019. Spatialized freshwater ecosystem life cycle impact assessment of water consumption based on instream habitat change modeling. *Water Research* 163, 114884.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.114884>

Daughney, C.J., Morgenstern, U., van der Raaij, R., Reeves, R.R., 2010. Discriminant analysis for estimation of groundwater age from hydrochemistry and well construction: application to New Zealand aquifers. *Hydrogeol J* 18, 417–428.
<https://doi.org/10.1007/s10040-009-0479-2>

David, G.C.L., Wohl, E., Yochum, S.E., Bledsoe, B.P., 2010. Controls on at-a-station hydraulic geometry in steep headwater streams, Colorado, USA. *Earth Surface Processes and Landforms* 35, 1820–1837. <https://doi.org/10.1002/esp.2023>

De Rose, R.C., Stewardson, M.J., Harman, C., 2008. Downstream hydraulic geometry of rivers in Victoria, Australia. *Geomorphology* 99, 302–316.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.11.008>

Demarchi, L., Bizzi, S., Piégay, H., 2017. Regional hydromorphological characterization with continuous and automated remote sensing analysis based on VHR imagery and low-resolution LiDAR data. *Earth Surface Processes and Landforms* 42, 531–551.
<https://doi.org/10.1002/esp.4092>

Dingman, S.L., 2007. Analytical derivation of at-a-station hydraulic-geometry relations. *Journal of Hydrology* 334, 17–27. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.09.021>

Dingman, S.L., Afshari, S., 2018. Field verification of analytical at-a-station hydraulic-geometry relations. *Journal of Hydrology* 564, 859–872.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.07.020>

Dolédec, S., Lamouroux, N., Fuchs, U., Mériçoux, S., 2007. Modelling the hydraulic preferences of benthic macroinvertebrates in small European streams. *Freshwater Biology* 52, 145–164. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2006.01663.x>

- Doll, B.A., Wise-Frederick, D.E., Buckner, C.M., Wilkerson, S.D., Harman, W.A., Smith, R.E., Spooner, J., 2002. Hydraulic Geometry Relationships for Urban Streams Throughout the Piedmont of North Carolina. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 38, 641–651. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2002.tb00986.x>
- Dong, T.Y., Nittrouer, J.A., Czapiga, M.J., Ma, H., McElroy, B., Il'icheva, E., Pavlov, M., Chalov, S., Parker, G., 2019. Roles of Bank Material in Setting Bankfull Hydraulic Geometry as Informed by the Selenga River Delta, Russia. *Water Resources Research* 55, 827–846. <https://doi.org/10.1029/2017WR021985>
- Dray, S., Dufour, A.B., Chessel, D., 2007. The ade4 package-II: two-table and K-table methods. *R News* 7, 47–52.
- Dufour, S., Piégay, H., 2009. From the myth of a lost paradise to targeted river restoration: forget natural references and focus on human benefits. *River Research and Applications* 25, 568–581. <https://doi.org/10.1002/rra.1239>
- Dupas, R., Curie, F., Gascuel-Oudou, C., Moatar, F., Delmas, M., Parnaudeau, V., Durand, P., 2013. Assessing N emissions in surface water at the national level: Comparison of country-wide vs. regionalized models. *Science of the Total Environment* 443, 152–162. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.10.011>
- Eaton, B.C., 2013. Hydraulic geometry: Empirical investigations and theoretical approaches, in: Shroder, J.F. (Ed.), *Treatise on Geomorphology*. Academic Press, San Diego, pp. 313–329. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00243-8>
- Ellis, N., Smith, S.J., Pitcher, C.R., 2012. Gradient forests: calculating importance gradients on physical predictors. *Ecology* 93, 156–168. <https://doi.org/10.1890/11-0252.1>
- Faustini, J.M., Kaufmann, P.R., Herlihy, A.T., 2009. Downstream variation in bankfull width of wadeable streams across the conterminous United States. *Geomorphology* 108, 292–311. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.02.005>
- Ferguson, R., 2010. Time to abandon the Manning equation? *Earth Surface Processes and Landforms* 35, 1873–1876. <https://doi.org/10.1002/esp.2091>
- Ferguson, R.I., 1986. Hydraulics and hydraulic geometry. *Progress in Physical Geography* 10, 1–31. <https://doi.org/10.1177/030913338601000101>

Fielding, A.H., Bell, J.F., 1997. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environmental Conservation* 24, 38–49.

<https://doi.org/10.1017/S0376892997000088>

Fink, M., Krause, P., Kralisch, S., Bende-Michl, U., Flügel, W.-A., 2007. Development and application of the modelling system J2000-S for the EU-water framework directive, in: *Advances in Geosciences*. Presented at the Large-scale hydrological modelling and the European Union water policies - 10th Workshop on Large-Scale Hydrological Modelling, Potsdam, Germany, 9–10 November 2006, Copernicus GmbH, pp. 123–130.

<https://doi.org/10.5194/adgeo-11-123-2007>

Firoz, A.B.M., Nauditt, A., Fink, M., Ribbe, L., 2018. Quantifying human impacts on hydrological drought using a combined modelling approach in a tropical river basin in central Vietnam. *Hydrology and Earth System Sciences* 22, 547–565. <https://doi.org/10.5194/hess-22-547-2018>

Flügel, W.-A., 1995. Delineating hydrological response units by geographical information system analyses for regional hydrological modelling using PRMS/MMS in the drainage basin of the River Bröl, Germany. *Hydrological Processes* 9, 423–436.

<https://doi.org/10.1002/hyp.3360090313>

Friedman, J.H., Meulman, J.J., 2003. Multiple additive regression trees with application in epidemiology. *Statistics in Medicine* 22, 1365–1381. <https://doi.org/10.1002/sim.1501>

Genuer, R., Poggi, J.-M., Tuleau-Malot, C., 2015. VSURF: An R Package for Variable Selection Using Random Forests. *The R Journal* 7, 19–33.

Genuer, R., Poggi, J.-M., Tuleau-Malot, C., 2010. Variable selection using random forests. *Pattern Recognition Letters* 31, 2225–2236. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2010.03.014>

Gies, M., Sondermann, M., Hering, D., Feld, C.K., 2015. Are species distribution models based on broad-scale environmental variables transferable across adjacent watersheds? A case study with eleven macroinvertebrate species. *Fundamental and Applied Limnology* 63–97.

<https://doi.org/10.1127/fal/2014/0600>

Ginot, V., 1998. Logiciel EVHA. Évaluation de l'habitat physique des poissons en rivière (version 2.0.). Guide de l'utilisateur. Cemagref Lyon BEA/LHQ et Ministère de l'Environnement, Direction de l'Eau, Paris, France.

Girard, V., 2013. Modèles d'habitat statistiques comme outils d'aide à la gestion des débits des rivières insulaires tropicales : Guadeloupe, Martinique, Mayotte, Réunion. (Ph.D. Thesis). Université Claude Bernard - Lyon I.

Girard, V., Lamouroux, N., Mons, R., 2014. Modeling point velocity and depth statistical distributions in steep tropical and alpine stream reaches. *Water Resources Research* 50, 427–439. <https://doi.org/10.1002/2013wr013894>

Gleason, C.J., 2015. Hydraulic geometry of natural rivers: A review and future directions. *Progress in Physical Geography* 39, 337–360. <https://doi.org/10.1177/0309133314567584>

Gob, F., Bilodeau, C., Thommeret, N., Belliard, J., Albert, M.-B., Tamisier, V., Baudoin, J.-M., Kreutzenberger, K., 2014. A tool for the characterisation of the hydromorphology of rivers in line with the application of the European Water Framework Directive in France (CARHYCE). *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 20, 57–72. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.10497>

Gonzalez, R.L., Pasternack, G.B., 2015. Reenvisioning cross-sectional at-a-station hydraulic geometry as spatially explicit hydraulic topography. *Geomorphology* 246, 394–406. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.06.024>

Goodwin, P., 2004. Analytical solutions for estimating effective discharge. *Journal of Hydraulic Engineering* 130, 729–738. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2004\)130:8\(729\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:8(729))

Gottardi, F., Obled, C., Gailhard, J., Paquet, E., 2012. Statistical reanalysis of precipitation fields based on ground network data and weather patterns: Application over French mountains. *Journal of Hydrology* 432–433, 154–167. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.02.014>

Grenouillet, G., Comte, L., 2014. Illuminating geographical patterns in species' range shifts. *Global Change Biology* 20, 3080–3091. <https://doi.org/10.1111/gcb.12570>

- Griffiths, G.A., 2003. Downstream hydraulic geometry and hydraulic similitude. *Water Resources Research* 39. <https://doi.org/10.1029/2002WR001485>
- Grimaldi, S., Li, Y., Walker, J.P., Pauwels, V.R.N., 2018. Effective Representation of River Geometry in Hydraulic Flood Forecast Models. *Water Resources Research* 54, 1031–1057. <https://doi.org/10.1002/2017WR021765>
- Gupta, H.V., Kling, H., Yilmaz, K.K., Martinez, G.F., 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology* 377, 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- Haddadchi, A., Booker, D.J., Measures, R.J., 2018. Predicting river bed substrate cover proportions across New Zealand. *CATENA* 163, 130–146. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.12.014>
- Hammer, T.R., 1972. Stream channel enlargement due to urbanization. *Water Resources Research* 8, 1530–1540. <https://doi.org/10.1029/WR008i006p01530>
- He, L., Wilkerson, G.V., 2011. Improved Bankfull Channel Geometry Prediction Using Two-Year Return-Period Discharge. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 47, 1298–1316. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2011.00567.x>
- Hey, R.D., Thorne, C.R., 1986. Stable channels with mobile gravel beds. *Journal of Hydraulic Engineering-Asce* 112, 671–689.
- Hogan, D.L., Church, M., 1989. Hydraulic Geometry in Small, Coastal Streams: Progress Toward Quantification of Salmonid Habitat. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 46, 844–852. <https://doi.org/10.1139/f89-106>
- Holmes, M.G.R., Young, A.R., Gustard, A., Grew, R., 2002a. A region of influence approach to predicting flow duration curves within ungauged catchments. *Hydrology and Earth System Sciences* 6, 721–731. <https://doi.org/10.5194/hess-6-721-2002>
- Holmes, M.G.R., Young, A.R., Gustard, A., Grew, R., 2002b. A new approach to estimating Mean Flow in the UK. *Hydrology and Earth System Sciences* 6, 709–720. <https://doi.org/10.5194/hess-6-709-2002>

- Hornik, K., Stinchcombe, M., White, H., 1989. Multilayer feedforward networks are universal approximators. *Neural Networks* 2, 359–366. [https://doi.org/10.1016/0893-6080\(89\)90020-8](https://doi.org/10.1016/0893-6080(89)90020-8)
- Hoyle, J.T., Kilroy, C., Hicks, D.M., Brown, L., 2017. The influence of sediment mobility and channel geomorphology on periphyton abundance. *Freshwater Biology* 62, 258–273. <https://doi.org/10.1111/fwb.12865>
- Huang, H.Q., Nanson, G.C., 1998. The influence of bank strength on channel geometry: an integrated analysis of some observations. *Earth Surface Processes and Landforms* 23, 865–876. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199810\)23:10<865::AID-ESP903>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199810)23:10<865::AID-ESP903>3.0.CO;2-3)
- Huang, H.Q., Nanson, G.C., 1997. Vegetation and channel variation; A case study of four small streams in southeastern Australia. *Geomorphology* 18, 237–249. [https://doi.org/10.1016/s0169-555x\(96\)00028-1](https://doi.org/10.1016/s0169-555x(96)00028-1)
- Huang, H.Q., Warner, R.F., 1995. The multivariate controls of hydraulic geometry: A causal investigation in terms of boundary shear distribution. *Earth Surface Processes and Landforms* 20, 115–130. <https://doi.org/10.1002/esp.3290200203>
- Huet, M., 1959. Profiles and Biology of Western European Streams as Related to Fish Management. *Transactions of the American Fisheries Society* 88, 155–163. [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(1959\)88\[155:PABOWE\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1959)88[155:PABOWE]2.0.CO;2)
- Iwasaki, Y., Ryo, M., Sui, P., Yoshimura, C., 2012. Evaluating the relationship between basin-scale fish species richness and ecologically relevant flow characteristics in rivers worldwide. *Freshwater Biology* 57, 2173–2180. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2012.02861.x>
- Jouzel, J., Ouzeau, G., Déqué, M., Jouini, M., Planton, S., Vautard, R., Vrac, M., 2014. Le climat de la France au XXIème siècle. Scénarios régionalisés – Édition 2014 pour la métropole 94et les régions d’outre-mer. Ministère de l’Ecologie, du Développement Durable et de l’Energie.
- Jowett, I.G., 1998. Hydraulic geometry of New Zealand rivers and its use as a preliminary method of habitat assessment. *Regulated Rivers-Research & Management* 14, 451–466. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1099-1646\(1998090\)14:5<451::aid-rrr512>3.3.co;2-t](https://doi.org/10.1002/(sici)1099-1646(1998090)14:5<451::aid-rrr512>3.3.co;2-t)

- Jowett, I.G., 1993. A method for objectively identifying pool, run, and riffle habitats from physical measurements. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* 27, 241–248. <https://doi.org/10.1080/00288330.1993.9516563>
- Jowett, I.G., 1989. RHYHABSIM: river hydraulic and habitat simulation. A computer manual. *New Zealand Freshwater Fisheries Miscellaneous Report (New Zealand)*. no. 49.
- Jowett, I.G., Hayes, J.W., Duncan, M.J., 2008. A guide to instream habitat survey methods and analysis. *NIWA Science and Technology Series No. 54*, Wellington, N.Z.
- Knighton, A.D., 1998. *Fluvial Forms and Processes*. Edward Arnold, London, UK.
- Kolberg, F.J., Howard, A.D., 1995. Active channel geometry and discharge relations of us piedmont and midwestern streams - the variable exponent model revisited. *Water Resources Research* 31, 2353–2365. <https://doi.org/10.1029/95wr01348>
- Krause, P., Bäse, F., Bende-Michl, U., Fink, M., Flügel, W., Pfennig, B., 2006. Multiscale investigations in a mesoscale catchment – hydrological modelling in the Gera catchment, in: *Advances in Geosciences*. Presented at the Integration of hydrological models on different spatial and temporal scales - 9th Workshop on Large-scale Hydrological Modelling, Copernicus GmbH, Freudenstadt, Germany, pp. 53–61. <https://doi.org/10.5194/adgeo-9-53-2006>
- Lamouroux, N., 2008. Hydraulic geometry of stream reaches and ecological implications., in: Habersack H., Piégay H., Rinaldi M. (Eds.), *Gravel Bed Rivers 6: From Process Understanding to the Restoration of Mountain Rivers*. *Developments in Earth Surface Processes*, pp. 661–675.
- Lamouroux, N., 2002. Estimhab: estimating instream habitat quality changes associated with hydraulic river management. *Shareware & User's guide*. Cemagref Lyon - Onema.
- Lamouroux, N., 1998. Depth probability distributions in stream reaches. *J. Hydraul. Eng.* 124(2), 224–227.
- Lamouroux, N., Capra, H., 2002. Simple predictions of instream habitat model outputs for target fish populations. *Freshwater Biology* 47, 1543–1556. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2002.00879.x>

Lamouroux, N., Hauer, C., Stewardson, M.J., LeRoy Poff, N., 2017. Chapter 13 - Physical habitat modeling and ecohydrological tools, in: Horne, A.C., Webb, J.A., Stewardson, M.J., Richter, B., Acreman, M. (Eds.), *Water for the Environment*. Academic Press, pp. 265–285. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803907-6.00013-9>

Lamouroux, N., Mériçoux, S., Dolédec, S., Snelder, T.H., 2013. Transferability of Hydraulic Preference Models for Aquatic Macroinvertebrates. *River Research and Applications* 29, 933–937. <https://doi.org/10.1002/rra.2578>

Lamouroux, N., Olivier, J.-M., 2015. Testing predictions of changes in fish abundance and community structure after flow restoration in four reaches of a large river (French Rhône). *Freshwater Biology* 60, 1118–1130. <https://doi.org/10.1111/fwb.12324>

Lamouroux, N., Pella, H., Snelder, T.H., Sauquet, E., Lejot, J., Shankar, U., 2014. Uncertainty models for estimates of physical characteristics of river segments over large areas. *Journal of the American Water Resources Association* 50, 1–13. <https://doi.org/10.1111/jawr.12101>

Lamouroux, N., Pella, H., Venderbecq, A., Sauquet, E., Lejot, J., 2010. ESTIMKART 2.0 : une plate-forme de modèles écohydrologiques pour contribuer à la gestion des cours d'eau à l'échelle des bassins français. Cemagref – Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse – Onema.

Lamouroux, N., Poff, N.L., Angermeier, P.L., 2002. Intercontinental convergence of stream fish community traits along geomorphic and hydraulic gradients. *Ecology* 83, 1792–1807. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2002\)083\[1792:ICOSFC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2002)083[1792:ICOSFC]2.0.CO;2)

Lamouroux, N., Souchon, Y., 2002. Simple predictions of instream habitat model outputs for fish habitat guilds in large streams. *Freshwater Biology* 47, 1531–1542. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2002.00880.x>

Lamouroux, N., Souchon, Y., Herouin, E., 1995. Predicting velocity frequency distributions in stream reaches. *Water Resources Research* 31, 2367–2375. <https://doi.org/10.1029/95WR01485>

Lamouroux, N., Statzner, B., Fuchs, U., Kohmann, F., Schmedtje, U., 1992. An unconventional approach to modeling spatial and temporal variability of local shear stress in

stream segments. *Water Resources Research* 28, 3251–3258.

<https://doi.org/10.1029/92WR01761>

Leathwick, J.R., Overton, J.M., McLEOD, M., 2003. An environmental domain classification of New Zealand and its use as a tool for biodiversity management. *Conservation Biology* 17, 1612–1623. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2003.00469.x>

Lee, J.-S., Julien, P.Y., 2006. Downstream hydraulic geometry of alluvial channels. *Journal of Hydraulic Engineering* 132, 1347–1352. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2006\)132:12\(1347\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:12(1347))

Lémond, J., Dandin, Ph., Planton, S., Vautard, R., Pagé, C., Déqué, M., Franchistéguy, L., Geindre, S., Kerdoncuff, M., Li, L., Moisselin, J.M., Noël, T., Tourre, Y.M., 2011. DRIAS: a step toward Climate Services in France. *Advances in Science and Research* 6, 179–186. <https://doi.org/10.5194/asr-6-179-2011>

Leopold, L.B., Maddock, T., 1953. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications (USGS Numbered Series No. 252), Professional Paper. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.

Leopold, L.B., Wolman, M.G., Miller, J.P., 1964. *Fluvial processes in geomorphology*. Dover Publications, Inc., New York, NY.

Liébault, F., Lallias-Tacon, S., Cassel, M., Talaska, N., 2013. Long profile responses of alpine braided rivers in SE France. *River Research and Applications* 29, 1253–1266. <https://doi.org/10.1002/rra.2615>

Limerinos, J.T., 1970. Determination of the Manning coefficient from measured bed roughness in natural channels. US Government Printing Office Washington, DC.

Machado, A.R., Wendland, E., Krause, P., 2016. Hydrologic Simulation for Water Balance Improvement in an Outcrop Area of the Guarani Aquifer System. *Environ. Process.* 3, 19–38. <https://doi.org/10.1007/s40710-016-0128-4>

Maddock, I., 1999. The importance of physical habitat assessment for evaluating river health. *Freshwater Biology* 41, 373–391. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.1999.00437.x>

- Malavoi, J.R., Souchon, Y., 2002. Description standardisée des principaux faciès d'écoulement observables en rivière : clé de détermination qualitative et mesures physiques. *Bull. Fr. Pêche Piscic.* 357–372. <https://doi.org/10.1051/kmae:2002040>
- Malcolm, I.A., Gibbins, C.N., Soulsby, C., Tetzlaff, D., Moir, H.J., 2012. The influence of hydrology and hydraulics on salmonids between spawning and emergence: implications for the management of flows in regulated rivers. *Fisheries Management and Ecology* 19, 464–474. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2400.2011.00836.x>
- Manel, S., Williams, H.C., Ormerod, S.J., 2001. Evaluating presence–absence models in ecology: the need to account for prevalence. *Journal of Applied Ecology* 38, 921–931. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2664.2001.00647.x>
- Marmion, M., Parviainen, M., Luoto, M., Heikkinen, R.K., Thuiller, W., 2009. Evaluation of consensus methods in predictive species distribution modelling. *Diversity and Distributions* 15, 59–69. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2008.00491.x>
- Marx, A., Kumar, R., Thober, S., Rakovec, O., Wanders, N., Zink, M., Wood, E.F., Pan, M., Sheffield, J., Samaniego, L., 2018. Climate change alters low flows in Europe under global warming of 1.5, 2, and 3 °C. *Hydrology and Earth System Sciences* 22, 1017–1032. <https://doi.org/10.5194/hess-22-1017-2018>
- Mérigoux, S., Lamouroux, N., Olivier, J.-M., Dolédec, S., 2009. Invertebrate hydraulic preferences and predicted impacts of changes in discharge in a large river. *Freshwater Biology* 54, 1343–1356. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2008.02160.x>
- Michez, A., Piégay, H., Lejeune, P., Claessens, H., 2017. Multi-temporal monitoring of a regional riparian buffer network (>12,000 km) with LiDAR and photogrammetric point clouds. *Journal of Environmental Management, Piégay & Lamouroux “Enlarging spatial and temporal scales for biophysical diagnosis and sustainable river management”* 202, 424–436. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.034>
- Miguel, C., Lamouroux, N., Pella, H., Labarthe, B., Flipo, N., Akopian, M., Belliard, J., 2016. Altération d'habitat hydraulique à l'échelle des bassins versants: impacts des prélèvements en nappe du bassin Seine-Normandie. *La Houille Blanche* 65–74. <https://doi.org/10.1051/lhb/2016032>

- Milano, M., Reynard, E., Bosshard, N., Weingartner, R., 2015. Simulating future trends in hydrological regimes in Western Switzerland. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 4, 748–761. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.10.010>
- Millar, R.G., 2000. Influence of bank vegetation on alluvial channel patterns. *Water Resources Research* 36, 1109–1118. <https://doi.org/10.1029/1999wr900346>
- Milly, P.C.D., Dunne, K.A., Vecchia, A.V., 2005. Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature* 438, 347–350. <https://doi.org/10.1038/nature04312>
- Mohamoud, Y.M., Parmar, R.S., 2006. Estimating Streamflow and Associated Hydraulic Geometry, the Mid-Atlantic Region, Usa. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 42, 755–768. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2006.tb04490.x>
- Morel, M., Booker, D.J., Gob, F., Lamouroux, N., 2020. Intercontinental predictions of river hydraulic geometry from catchment physical characteristics. *Journal of Hydrology* 582, 124292. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124292>
- Morel, M., Tamisier, V., Pella, H., Booker, D.J., Navratil, O., Piégay, H., Gob, F., Lamouroux, N., 2019. Revisiting the drivers of at-a-station hydraulic geometry in stream reaches. *Geomorphology* 328, 44–56. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.12.007>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., Veith, T. L., 2007. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE* 50, 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Nanson, R.A., Nanson, G.C., Huang, H.Q., 2010. The hydraulic geometry of narrow and deep channels; evidence for flow optimisation and controlled peatland growth. *Geomorphology* 117, 143–154. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.11.021>
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10, 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Navratil, O., 2005. Débit de pleins bords et géométrie hydraulique : une description synthétique de la morphologie des cours d'eau pour relier le bassin versant et les habitats aquatiques (Ph.D. Thesis). Grenoble INPG.

- Navratil, O., Albert, M.B., 2010. Non-linearity of reach hydraulic geometry relations. *Journal of Hydrology* 388, 280–290. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.05.007>
- Navratil, O., Albert, M.-B., Hérouin, E., Gresillon, J.-M., 2006. Determination of bankfull discharge magnitude and frequency: comparison of methods on 16 gravel-bed river reaches. *Earth Surface Processes and Landforms* 31, 1345–1363. <https://doi.org/10.1002/esp.1337>
- Nepal, S., 2016. Impacts of climate change on the hydrological regime of the Koshi river basin in the Himalayan region. *Journal of Hydro-environment Research* 10, 76–89. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2015.12.001>
- Nepal, S., Krause, P., Flügel, W.-A., Fink, M., Fischer, C., 2014. Understanding the hydrological system dynamics of a glaciated alpine catchment in the Himalayan region using the J2000 hydrological model. *Hydrological Processes* 28, 1329–1344. <https://doi.org/10.1002/hyp.9627>
- Parasiewicz, P., Dunbar, M.J., 2001. Physical habitat modelling for fish - a developing approach. *Large Rivers* 12, 239–268. <https://doi.org/10.1127/lr/12/2001/239>
- Park, C.C., 1977. World-wide variations in hydraulic geometry exponents of stream channels: An analysis and some observations. *Journal of Hydrology* 33, 133–146. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(77\)90103-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(77)90103-2)
- Peckarsky, B.L., Cooper, S.D., McIntosh, A.R., 1997. Extrapolating from Individual Behavior to Populations and Communities in Streams. *Journal of the North American Benthological Society* 16, 375–390. <https://doi.org/10.2307/1468025>
- Pella, H., Lejot, J., Lamouroux, N., Snelder, T., 2012. Le réseau hydrographique théorique (RHT) français et ses attributs environnementaux. *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 18, 317–336. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.9933>
- Phillips, J.D., 1991. Multiple modes of adjustment in unstable river channel cross-sections. *Journal of Hydrology* 123, 39–49. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(91\)90067-R](https://doi.org/10.1016/0022-1694(91)90067-R)
- Phillips, J.D., 1990. The instability of hydraulic geometry. *Water Resources Research* 26, 739–744. <https://doi.org/10.1029/WR026i004p00739>

Piégay, H., Alber, A., Slater, L., Bourdin, L., 2009. Census and typology of braided rivers in the French Alps. *Aquatic Sciences* 71, 371. <https://doi.org/10.1007/s00027-009-9220-4>

Piégay, H., Arnaud, F., Belletti, B., Bertrand, M., Bizzi, S., Carbonneau, P., Dufour, S., Liébault, F., Ruiz-Villanueva, V., Slater, L., 2020. Remotely sensed rivers in the Anthropocene: state of the art and prospects. *Earth Surface Processes and Landforms* 45, 157–188. <https://doi.org/10.1002/esp.4787>

Piégay, H., Darby, S.E., Mosselman, E., Surian, N., 2005. A review of techniques available for delimiting the erodible river corridor: a sustainable approach to managing bank erosion. *River Research and Applications* 21, 773–789. <https://doi.org/10.1002/rra.881>

Piégay, H., Vaudor, L., 2016. Statistics and fluvial geomorphology, in: *Tools in Fluvial Geomorphology*. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 476–506.
<https://doi.org/10.1002/9781118648551.ch21>

Polvi, L.E., Wohl, E., Merritt, D.M., 2014. Modeling the functional influence of vegetation type on streambank cohesion. *Earth Surface Processes and Landforms* 39, 1245–1258.
<https://doi.org/10.1002/esp.3577>

Quintana-Seguí, P., Le Moigne, P., Durand, Y., Martin, E., Habets, F., Baillon, M., Canellas, C., Franchisteguy, L., Morel, S., 2008. Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables: Validation of the SAFRAN Analysis over France. *J. Appl. Meteor. Climatol.* 47, 92–107.
<https://doi.org/10.1175/2007JAMC1636.1>

R Core Team, 2017. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

Rawlins, B.G., Clark, L., Boyd, D.S., 2014. Using air photos to parameterize landscape predictors of channel wetted width. *Earth Surface Processes and Landforms* 39, 605–613.
<https://doi.org/10.1002/esp.3469>

Reid, D.E., Hickin, E.J., Babakaiff, S.C., 2010. Low-flow hydraulic geometry of small, steep mountain streams in southwest British Columbia. *Geomorphology* 122, 39–55.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.05.012>

Rhoads, B.L., 1991. A Continuously Varying Parameter Model of Downstream Hydraulic Geometry. *Water Resources Research* 27, 1865–1872. <https://doi.org/10.1029/91WR01363>

- Rhodes, D.D., 1977. B-f-m diagram - graphical representation and interpretation of at-a-station hydraulic geometry. *American Journal of Science* 277, 73–96.
- Rice, S., Church, M., 1996. Bed material texture in low order streams on the Queen Charlotte Islands, British Columbia. *Earth Surface Processes and Landforms* 21, 1–18.
[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199601\)21:1<1::AID-ESP506>3.0.CO;2-F](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199601)21:1<1::AID-ESP506>3.0.CO;2-F)
- Richards, K.S., 1973. Hydraulic geometry and channel roughness; a non-linear system. *Am J Sci* 273, 877–896. <https://doi.org/10.2475/ajs.273.10.877>
- Ridenour, G.S., 2001. Interbasin consistency of hydraulic geometry and its relationships with basin morphology and hydrology. *Water International* 26, 569–577.
<https://doi.org/10.1080/02508060108686958>
- Ridenour, G.S., Giardino, J.R., 1995. Logratio linear modelling of hydraulic geometry using indices of flow resistance as covariates. *Geomorphology* 14, 65–72.
[https://doi.org/10.1016/0169-555X\(95\)00018-Z](https://doi.org/10.1016/0169-555X(95)00018-Z)
- Ridenour, G.S., Giardino, J.R., 1994. Methodology: Discriminant function analysis of compositional data: An example from hydraulic geometry. *Physical Geography* 15, 481–492.
<https://doi.org/10.1080/02723646.1994.10642530>
- Riis, T., Biggs, B.J.F., 2003. Hydrologic and hydraulic control of macrophyte establishment and performance in streams. *Limnology and Oceanography* 48, 1488–1497.
<https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.4.1488>
- Roberts, C.R., 1989. Flood frequency and urban-induced channel change : Some British examples. Presented at the Floods, hydrological, sedimentological and geomorphological implications. Workshop, joint meeting of the BGRG and the British Hydrological Society, pp. 57–82.
- Russell, K.L., Vietz, G.J., Fletcher, T.D., 2018. Urban catchment runoff increases bedload sediment yield and particle size in stream channels. *Anthropocene* 23, 53–66.
<https://doi.org/10.1016/j.ancene.2018.09.001>
- Sauquet, E., Catalogne, C., 2011. Comparison of catchment grouping methods for flow duration curve estimation at ungauged sites in France. *Hydrology and Earth System Sciences* 15, 2421–2435. <https://doi.org/10.5194/hess-15-2421-2011>

- Sauquet, E., Gottschalk, L., Krasovskaia, I., 2008. Estimating mean monthly runoff at ungauged locations: an application to France. *Hydrology Research* 39, 403–423. <https://doi.org/10.2166/nh.2008.331>
- Schmadel, N.M., Neilson, B.T., Heavilin, J.E., 2015. Spatial considerations of stream hydraulics in reach scale temperature modeling. *Water Resources Research* 51, 5566–5581. <https://doi.org/10.1002/2015WR016931>
- Schumm, S.A., 1963. A tentative classification of alluvial river channels an examination of similarities and differences among some Great Plains rivers (No. 477). U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/cir477>
- Seo, I.W., Cheong, T.S., 1998. Predicting Longitudinal Dispersion Coefficient in Natural Streams. *Journal of Hydraulic Engineering* 124, 25–32. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1998\)124:1\(25\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1998)124:1(25))
- Singh Krishan P., Broeren Sally McConkey, 1989. Hydraulic Geometry of Streams and Stream Habitat Assessment. *Journal of Water Resources Planning and Management* 115, 583–597. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1989\)115:5\(583\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1989)115:5(583))
- Singh, V.P., Yang, C.T., Deng, Z.Q., 2003. Downstream hydraulic geometry relations: 1. Theoretical development. *Water Resources Research* 39. <https://doi.org/10.1029/2003WR002484>
- Smith, L.C., Isacks, B.L., Bloom, A.L., Murray, A.B., 1996. Estimation of discharge from three braided rivers using synthetic aperture radar satellite imagery: potential application to ungauged basins. *Water Resources Research* 32, 2021–2034. <https://doi.org/10.1029/96WR00752>
- Smith, L.C., Pavelsky, T.M., 2008. Estimation of river discharge, propagation speed, and hydraulic geometry from space: Lena River, Siberia. *Water Resources Research* 44. <https://doi.org/10.1029/2007WR006133>
- Snelder, T., Booker, D., Lamouroux, N., 2011. A method to assess and define environmental flow rules for large jurisdictional regions. *Journal of the American Water Resources Association* 47, 828–840. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2011.00556.x>

- Snelder, T.H., Biggs, B.J.F., 2002. Multiscale River Environment Classification for Water Resources Management1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 38, 1225–1239. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2002.tb04344.x>
- Snelder, T.H., Lamouroux, N., Pella, H., 2011. Empirical modelling of large scale patterns in river bed surface grain size. *Geomorphology* 127, 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.12.015>
- Snelder, T.H., Pella, H., Wasson, J.-G., Lamouroux, N., 2008. Definition procedures have little effect on performance of environmental classifications of streams and rivers. *Environmental Management* 42, 771–788. <https://doi.org/10.1007/s00267-008-9188-1>
- Soar, P.J., Thorne, C.R., 2001. Channel Restoration Design for Meandering Rivers. Coastal and Hydraulics Laboratory, US Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg.
- Statzner, B., Gore, J.A., Resh, V.H., 1988. Hydraulic stream ecology: Observed patterns and potential applications. *Journal of the North American Benthological Society* 7, 307–360. <https://doi.org/10.2307/1467296>
- Stewardson, M., 2005. Hydraulic geometry of stream reaches. *Journal of Hydrology* 306, 97–111. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.09.004>
- Stewardson, M.J., Datry, T., Lamouroux, N., Pella, H., Thommeret, N., Valette, L., Grant, S.B., 2016. Variation in reach-scale hydraulic conductivity of streambeds. *Geomorphology* 259, 70–80. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.02.001>
- Stewardson, M.J., McMahon, T.A., 2002. A stochastic model of hydraulic variations within stream channels. *Water Resources Research* 38, 8-1-8-. <https://doi.org/10.1029/2000WR000014>
- Tedesco, P.A., Oberdorff, T., Cornu, J.-F., Beauchard, O., Brosse, S., Dürr, H.H., Grenouillet, G., Leprieur, F., Tisseuil, C., Zaiss, R., Hugueny, B., 2013. A scenario for impacts of water availability loss due to climate change on riverine fish extinction rates. *Journal of Applied Ecology* 50, 1105–1115. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12125>

- Tharme, R.E., 2003. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River Research and Applications* 19, 397–441. <https://doi.org/10.1002/rra.736>
- Thayer, J.B., 2017. Downstream Regime Relations for Single-Thread Channels. *River Research and Applications* 33, 182–186. <https://doi.org/10.1002/rra.3053>
- Thompson, D.M., 2001. Random controls on semi-rhythmic spacing of pools and riffles in constriction-dominated rivers. *Earth Surface Processes and Landforms* 26, 1195–1212. <https://doi.org/10.1002/esp.265>
- Tukey, J.W., 1977. *Exploratory Data Analysis*. Pearson, Reading, Massachusetts.
- Vachtman, D., Laronne, J.B., 2013. Hydraulic geometry of cohesive channels undergoing base level drop. *Geomorphology* 197, 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.04.039>
- 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 (Technical report)*.
- Vapnik, V.N., 1998. *Statistical learning theory, Adaptive and learning systems for signal processing, communications, and control*. Wiley, New York.
- Vaughan, A.A., Belmont, P., Hawkins, C.P., Wilcock, P., 2017. Near-Channel Versus Watershed Controls on Sediment Rating Curves. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 122, 1901–1923. <https://doi.org/10.1002/2016JF004180>
- Vázquez-Tarrío, D., Borgniet, L., Liébault, F., Recking, A., 2017. Using UAS optical imagery and SfM photogrammetry to characterize the surface grain size of gravel bars in a braided river (Vénéon River, French Alps). *Geomorphology* 285, 94–105. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.01.039>
- Vermeulen, L.C., van Hengel, M., Kroeze, C., Medema, G., Spanier, J.E., van Vliet, M.T.H., Hofstra, N., 2019. Cryptosporidium concentrations in rivers worldwide. *Water Research* 149, 202–214. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.10.069>

Vidal, J.-P., Hingray, B., Magand, C., Sauquet, E., Ducharme, A., 2016. Hierarchy of climate and hydrological uncertainties in transient low-flow projections. *Hydrology and Earth System Sciences* 20, 3651–3672. <https://doi.org/10.5194/hess-20-3651-2016>

Vidal, J.-P., Martin, E., Franchistéguy, L., Habets, F., Soubeyroux, J.-M., Blanchard, M., Baillon, M., 2010. Multilevel and multiscale drought reanalysis over France with the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological suite. *Hydrology and Earth System Sciences* 14, 459–478. <https://doi.org/10.5194/hess-14-459-2010>

Whelan, M.J., Gandolfi, C., Bischetti, G.B., 1999. A simple stochastic model of point source solute transport in rivers based on gauging station data with implications for sampling requirements. *Water Research* 33, 3171–3181. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00026-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00026-3)

Wiederkehr, E., 2012. Apport de la géomatique pour une caractérisation physique multi-échelle des réseaux hydrographiques. Elaboration d'indicateurs appliqués au bassin du Rhône. (Ph.D. Thesis). Ecole normale supérieure de Lyon - ENS Lyon, Lyon.

Wiederkehr, E., Dufour, S., H., P., 2012. Caractérisation physique du réseau hydrographique du bassin du Rhône à partir d'outils géomatiques : éléments pour définir des priorités en matière d'intervention à large échelle. Presented at the I.S.RIVERS 2012, Lyon, France.

Wilkerson, G.V., Kandel, D.R., Perg, L.A., Dietrich, W.E., Wilcock, P.R., Whiles, M.R., 2014. Continental-scale relationship between bankfull width and drainage area for single-thread alluvial channels. *Water Resources Research* 50, 919–936. <https://doi.org/10.1002/2013WR013916>

Williams, G.P., 1978. Hydraulic geometry of river cross sections; theory of minimum variance (USGS Numbered Series No. 1029), Professional Paper. U.S. Govt. Print. Off.,.

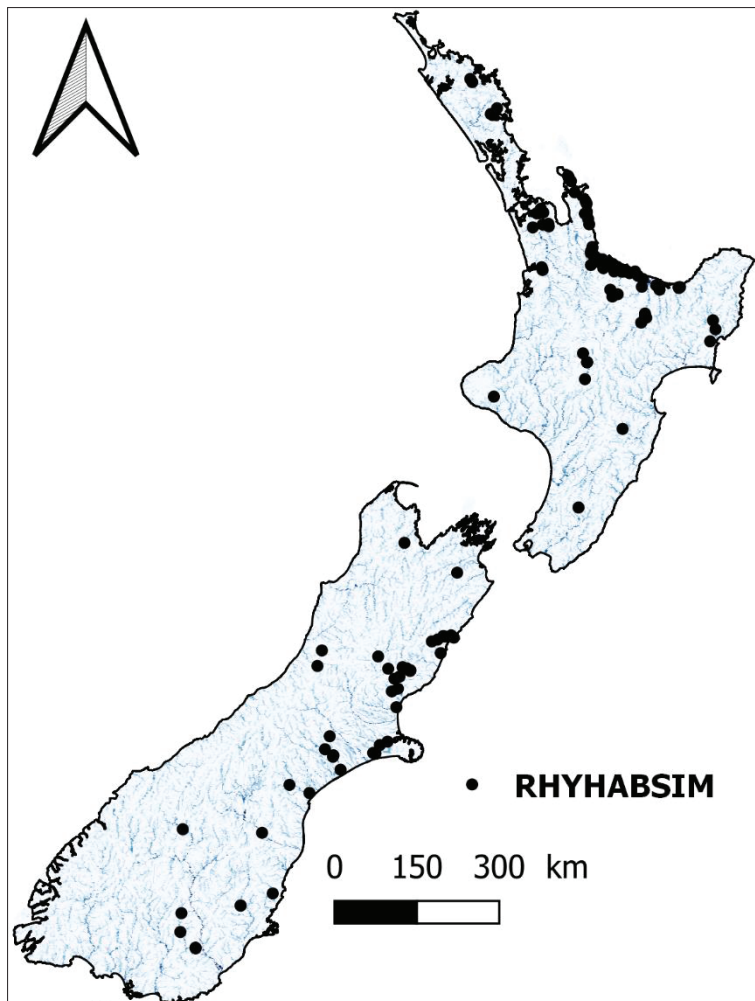
Wohl, E., David, G.C.L., 2008. Consistency of scaling relations among bedrock and alluvial channels. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 113. <https://doi.org/10.1029/2008JF000989>

Wohl, E., Kuzma, J.N., Brown, N.E., 2004. Reach-scale channel geometry of a mountain river. *Earth Surface Processes and Landforms* 29, 969–981. <https://doi.org/10.1002/esp.1078>

- Wohl, E.E., Wilcox, A., 2005. Channel geometry of mountain streams in New Zealand. *Journal of Hydrology* 300, 252–266. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.06.006>
- Wolman, M.G., 1954. A method of sampling coarse river-bed material. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 35, 951–956. <https://doi.org/10.1029/TR035i006p00951>
- Wolter, C., Buijse, A.D., Parasiewicz, P., 2016. Temporal and Spatial Patterns of Fish Response to Hydromorphological Processes. *River Research and Applications* 32, 190–201. <https://doi.org/10.1002/rra.2980>
- Woodsmith, R.D., Buffington, J.M., 1996. Multivariate geomorphic analysis of forest streams: implications for assessment of land use impacts on channel condition. *Earth Surface Processes and Landforms* 21, 377–393. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199604\)21:4<377::AID-ESP546>3.0.CO;2-2](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199604)21:4<377::AID-ESP546>3.0.CO;2-2)
- Xenopoulos, M.A., Lodge, D.M., 2006. Going with the Flow: Using Species–Discharge Relationships to Forecast Losses in Fish Biodiversity. *Ecology* 87, 1907–1914. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2006\)87\[1907:GWTFUS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2006)87[1907:GWTFUS]2.0.CO;2)
- Yochum, S.E., Bledsoe, B.P., David, G.C.L., Wohl, E., 2012. Velocity prediction in high-gradient channels. *Journal of Hydrology* 424–425, 84–98. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.12.031>
- Yochum, S.E., Bledsoe, B.P., Wohl, E., David, G.C.L., 2014. Spatial characterization of roughness elements in high-gradient channels of the Fraser Experimental Forest, Colorado, USA. *Water Resources Research* 50, 6015–6029. <https://doi.org/10.1002/2014WR015587>
- Yu, B., Wolman, M.G., 1987. Some dynamic aspects of river geometry. *Water Resources Research* 23, 501–509. <https://doi.org/10.1029/WR023i003p00501>
- Zuur, A.F., Ieno, E.N., Elphick, C.S., 2010. A protocol for data exploration to avoid common statistical problems. *Methods in Ecology and Evolution* 1, 3–14. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2009.00001.x>

Annexes

Annexe 1 : Localisation des données de géométrie hydraulique au tronçon en Nouvelle-Zélande.



Annexe 2 : Localisation des données de géométrie hydraulique au tronçon au Royaume-Uni.

