

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/354859187>

CARHYCE : Consolidation scientifique des connaissances et des modèles d'évaluation pour la caractérisation hydromorphologique des cours d'eau de métropole et d'Outre-mer

Technical Report · September 2021

CITATIONS

0

READS

68

7 authors, including:



Frederic Gob

Université de Paris 1 Panthéon-Sorbonne

59 PUBLICATIONS 538 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Fraudin Camille

University of Liège

1 PUBLICATION 0 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Karl Kreutzenberger

French biodiversity agency (OFB)

15 PUBLICATIONS 79 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Nathalie Thommeret

Conservatoire National des Arts et Métiers

34 PUBLICATIONS 187 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



The demonstration sites network for hydromorphological restoration of rivers [View project](#)



SEDIMER project [View project](#)



CARHYCE : Consolidation scientifique des connaissances et des modèles d'évaluation pour la caractérisation hydromorphologique des cours d'eau de métropole et d'Outre-mer

Rapport scientifique. Convention de coopération OFB / CNRS 2018 – 2020

Gob Frédéric¹, Thommeret Nathalie², Bilodeau Clélia³, Fraudin Camille¹, Kreutzenberger Karl⁴

Août 2021

¹ : Université Paris 1 Panthéon Sorbonne – Laboratoire de Géographie Physique, UMR 8591

² : Conservatoire National des Arts et Métiers, École Supérieure des Géomètres et Topographes

³ : Université de Paris – Laboratoire Dynamiques sociales et recomposition des espaces, UMR 7533

⁴ : Office français de la biodiversité – Direction générale, Service Eau et Milieux Aquatiques, attaché auprès du Pôle R&D « Migrateurs amphihalins » OFB-INRAE-Institut Agro-UPPA

❖ Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier chaleureusement les services territoriaux de l'Office français de la biodiversité et les partenaires d'Outre-mer pour leur important apport à l'acquisition et à la consolidation des jeux de données et des résultats (indicateurs de qualité des milieux *etc.*) qu'ils permettent d'obtenir ; ainsi que pour leur contribution dans les réflexions techniques et scientifiques menées sur le projet Carhyce

❖ Auteurs

Frédéric GOB

Maître de Conférences (Université Paris 1 Panthéon Sorbonne - Laboratoire de Géographie Physique, UMR 8591),
frederic.gob@univ-paris1.fr

Nathalie THOMMERET

Maître de Conférences (Conservatoire National des Arts et Métiers - École Supérieure des Géomètres et Topographes, Laboratoire GEF),
nathalie.thommeret@lecnam.net

Clélia BILODEAU

Maître de Conférences (Université de Paris - Laboratoire Dynamiques sociales et recomposition des espaces, UMR 7533),
clelia.bilodeau@u-paris.fr

Camille FRAUDIN

Stagiaire (Université Paris 1 Panthéon Sorbonne - Laboratoire de Géographie Physique, UMR 8591)

Karl KREUTZENBERGER

Chargé de mission « Migrateurs amphihalins et hydromorphologie » (Office français de la biodiversité - Direction générale, *attaché auprès* du pôle R&D « Migrateurs amphihalins dans leur environnement », OFB - INRAE - Institut Agro - UPPA, Service « Eau et Milieux Aquatiques »),
karl.kreutzenberger@ofb.gouv.fr

❖ Citation :

Gob F., Thommeret N., Bilodeau C., Fraudin C. et Kreutzenberger K. (2021). Carhyce : Consolidation scientifique des connaissances et des modèles d'évaluation pour la caractérisation hydromorphologique des cours d'eau de métropole et d'Outre-mer. Rapport scientifique CNRS (LGP - LADYSS) / Université Paris 1 Panthéon Sorbonne / ESGT / OFB, 75 pages + annexes.

Droits d'usage : Accès libre

Niveau géographique : France entière

Couverture géographique : Métropole, Départements et régions d'outre-mer

Niveau de lecture : Professionnels, experts

SOMMAIRE

| | |
|--|-----------|
| I. Introduction | 7 |
| II. Acquisition des données Carhyce : évolution, exploitation et perspectives | 9 |
| II.1 Préambule..... | 9 |
| II.2 Fonctionnement et mise à jour des données de l'Interface d'Exploitation des Données (IED) | 12 |
| II.3 Etat des lieux des données disponibles..... | 14 |
| II.3.1 Répartition spatiale des stations Carhyce acquises depuis 2009 | 14 |
| II.3.2 Caractéristiques hydromorphologiques des stations Carhyce | 16 |
| II.4 Modèles de référence hydromorphologiques régionaux et mise en place d'un référentiel d'évaluation version 2.0 | 20 |
| II.4.1 Description des modèles..... | 20 |
| II.4.2 Cas des HER sans modèle disponible | 27 |
| II.4.3 Création de modèles de référence hydromorphologiques pour la Guyane | 29 |
| II.4.4 Comparaison entre premier et deuxième passages | 40 |
| III. Interprétation de l'Indicateur Morphologique Global (IMG) | 45 |
| III.1 Préambule..... | 45 |
| III.2 Comparaison du <i>Morphological Quality Index</i> et de l'IMG Carhyce | 45 |
| III.2.1 Principes du MQI | 45 |
| III.2.2 Les paramètres considérés dans le MQI..... | 47 |
| III.2.3 Comparaison du MQI et de l'IMG Carhyce dans le Massif central..... | 50 |
| III.2.4 Comparaison du MQI et de l'IMG Carhyce à l'échelle de l'ensemble de la banque de données Carhyce..... | 60 |
| III.3 Eléments pour la lecture et l'interprétation de l'Indicateur Morphologique Global | 65 |
| IV. Les potentialités du Lidar pour la caractérisation hydromorphologique | 69 |
| V. Bibliographie | 72 |
| VI. Annexes | 76 |
| VI.1 Comparaisons des référentiels..... | 76 |
| VI.1.1 Largeur à pleins bords | 76 |
| VI.1.2 Profondeur à pleins bords..... | 79 |
| VI.1.3 Surface de la section mouillée à pleins bords | 82 |
| VI.1.4 Pente de la ligne d'eau | 85 |
| VI.1.5 Profondeur des mouilles | 88 |
| VI.1.6 Rapport largeur/profondeur à pleins bords..... | 91 |
| VI.2 Récapitulatif des données et méthodes utilisées pour le calcul du MQI (Fraudin, 2020)..... | 95 |
| VI.3 Notes et périmètres de cadrage visant la consolidation des modèles d'évaluation Carhyce pour le calcul de l'Indicateur morphologique global (IMG) en métropole et en Guyane | 99 |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1 : Evolution du nombre d'opérations Carhyce disponibles depuis janvier 2009 (métropole) | 10 |
| Figure 2 : Représentation simplifiée du processus de mise à jour..... | 12 |
| Figure 3 : Les Hydroécocorégions (HER) en France métropolitaine (<i>d'après Wasson et al., 2002</i>) | 14 |
| Figure 4 : Répartition des stations Carhyce (sans distinction) et stations Carhyce dites « de référence » sur le territoire français métropolitain, par HER (à gauche). Nombre d'opérations Carhyce (total, en gris, et de référence, en vert) sur le territoire français métropolitain, par HER (à droite)..... | 15 |
| Figure 5 : Répartition des stations Carhyce (sans distinction) et stations Carhyce de référence pour les Départements et régions d'outre-mer (DROM) | 15 |
| Figure 6 : Distribution des principaux paramètres descripteurs des stations Carhyce présents dans l'IED..... | 16 |
| Figure 7 : Distribution des principales caractéristiques des stations Carhyce par HER | 17 |
| Figure 8 : Distribution des principales caractéristiques des stations Carhyce par HER (suite) | 19 |
| Figure 9 : Représentation des modèles d'évaluation Carhyce respectivement pour les paramètres <i>largeur mouillée à pleins bords</i> (en haut) et <i>profondeur à pleins bords</i> (en bas) 21 | |
| Figure 10 : Exemple de deux HER pour lesquelles les modèles « profondeur des mouilles » et « rapport L/P » ne sont pas significatifs (Référentiel v2.0)..... | 24 |
| Figure 11 : Distribution des exposants b des relations $y=ax^b$ dans laquelle x est la taille du bassin versant et y est l'un des paramètres suivants : largeur, section mouillée ou profondeur maximum à pleins bords, profondeur des mouilles ou rapport L/P à pleins bords (Référentiel v2.0) | 24 |
| Figure 12 : Boite de dispersion des résidus standardisés pour deux variables (profondeur des mouilles et rapport L/P) pour plusieurs HER (Référentiel v2.0)..... | 25 |
| Figure 13 : Relations entre la <i>p-value</i> et le nombre de stations de références considérées dans la construction des modèles L_{pb} , L/P et profondeur des mouilles (Référentiel v2.0).... | 25 |
| Figure 14 : Station Carhyce de Villard Sallet 2 dans l'HER « Alpes Internes » et présentant une valeur d'IMG supérieure à 8 essentiellement dûe à une faible profondeur des mouilles et une faible pente (photo : Google streetview 2021) | 26 |
| Figure 15 : Modèles <i>largeur</i> et <i>profondeur</i> à pleins bords inter-régionaux intégrant les HER sans modèles | 28 |
| Figure 16 : Débits moyen mensuels de L'Approuague à Saut Athanase (données calculées sur la période 1991 – 2003 ; Montfort et Ruf, 2005) | 31 |
| Figure 17 : Impacts directs et indirects de l'activité d'orpaillage avec A. Destruction du lit du cours d'eau et du corridor riverain ; B. Mise en place des voies de communication pour l'accès au site ; C. Panache turbide liée à l'activité minière sur un site à l'amont (DEAL Guyane)..... | 34 |
| Figure 18 : Surfaces travaillées par l'activité minière en 2006 et linéaires impactés par cette activité (Laperche <i>et al.</i> , 2008)..... | 35 |
| Figure 19 : Un flat alluvionnaire guyanais non réhabilité, visité en juin 2019 (K. Kreutzenberger)..... | 36 |

| | |
|--|----|
| Figure 20 : Représentation des modèles d'évaluation hydromorphologiques Carhyce en Guyane, respectivement pour les paramètres <i>largeur</i> et <i>profondeur à pleins bords</i> (Référentiel v2.0) | 39 |
| Figure 21 : Différences de valeurs entre les premiers et deuxièmes passages. Valeurs brutes sur les histogrammes (le trait rouge pointillé correspond à la moyenne). Valeurs en pourcentage sur les boîtes de dispersion (les valeurs atypiques ne sont pas représentées) | 41 |
| Figure 22 : Comparaison de modèles de largeurs à pleins bords construits par HER à partir des 1 ^{er} et 2 ^{ème} passages, pour les mêmes stations de référence des HER « Pyrénées », « Tables Calcaires », « Alpes Internes » et « Armoricaïn » | 43 |
| Figure 23 : Comparaison de modèles de profondeurs à pleins bords construits par HER à partir des 1 ^{er} et 2 ^{ème} passages, pour les mêmes stations de référence des HER « Massif central Nord », « Massif central sud », « Jura - Préalpes du nord », « Landes » | 44 |
| Figure 24 : Schéma des différentes phases d'analyse du MQI (traduit de Rinaldi <i>et al.</i> , 2014) | 46 |
| Figure 25 : Localisation des stations Carhyce prospectées dans le Massif Central Nord | 51 |
| Figure 26 : Valeurs d'IMG des stations prospectées dans le Massif Central Nord, dont les valeurs se situent entre 0 et 1 (Référentiel v1.0) | 53 |
| Figure 27 : Valeurs d'IMG des stations prospectées dans le Massif Central Nord, dont les valeurs se situent entre 1 et 5 (Référentiel v1.0) | 53 |
| Figure 28 : Valeurs d'IMG des stations prospectées dans le Massif Central Nord, dont les valeurs se situent entre 6 et 7 (Référentiel v1.0) | 54 |
| Figure 29 : Valeurs d'IMG des stations prospectées dans le Massif Central Nord, dont les valeurs se situent entre 5,5 à 9,87 (Référentiel v1.0) | 55 |
| Figure 30 : Comparaison des valeurs de MQI et d'IMG (Référentiel v1.0) des stations prospectées dans le Massif central nord | 58 |
| Figure 31 : Distribution des valeurs d'IMG (Référentiel v1.0) selon leur classe de MQI | 58 |
| Figure 32 : Synthèse des paramètres considérés pour le calcul du MQI et origine des données utilisées (<i>d'après</i> Rinaldi <i>et al.</i> , 2013) | 62 |
| Figure 33 : Courbe d'occurrence du MQI des stations de référence et de non référence | 63 |
| Figure 34 : Comparaison des IMG et du MQI pour l'ensemble du jeu de données | 63 |
| Figure 35 : Comparaison des IMG et du MQI entre stations références et non références .. | 64 |
| Figure 36 : A. Comparaison des valeurs d'IMG pour les opérations sur stations de référence et les opérations sur stations indifférenciées (nombre d'opérations : 3237 dont 531 références) ; B. Comparaison des valeurs d'IMG pour les opérations sur stations de référence, indifférenciées et/ou altérées (nombre d'opérations : 3237 dont 531 références et 479 altérées) | 66 |
| Figure 37 : Distribution des valeurs d'IMG pour les stations de cas références, indifférenciés et altérés | 67 |
| Figure 38 : Comparaison des niveaux obtenus sur le site du Gardon par deux différentes méthodes : le calcul automatique à partir des courbures longitudinales et le calcul guidé par des points de terrain | 70 |
| Figure 39 : Exemple d'application de la méthode mise en œuvre dans le cadre du stage de N. Fermen (2021) | 71 |

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 1 : Détails des mises à jour réalisées depuis janvier 2019 | 13 |
| Tableau 2 : Nombre d'opérations et caractéristiques médianes des HER | 18 |
| Tableau 3 : Modèles de référence hydromorphologiques Carhyce et valeurs des différents paramètres (Référentiel v2.0) | 22 |
| Tableau 4 : Paramètres des modèles de référence hydromorphologiques interrégionaux | 27 |
| Tableau 5 : Principales caractéristiques de la Guyane | 29 |
| Tableau 6 : Plan et quelques caractéristiques des stations de Guyane échantillonnées avec le protocole Carhyce entre 2014 et 2019 | 38 |
| Tableau 7 : Comparaison des classes granulométriques (Wentworth) du diamètre médian (D_{50}) des particules présentes sur les seuils lors des 1 ^{ère} et 2 ^{ème} application du protocole ... | 42 |
| Tableau 8 : Récapitulatif des différents éléments de délimitation d'un cours d'eau | 48 |
| Tableau 9 : Récapitulatif des différents éléments du MQI par rapport à la fonctionnalité, l'artificialité et l'ajustement du/des chenal(aux) d'un cours d'eau | 49 |
| Tableau 10 : Classification de la qualité hydromorphologique des cours d'eau selon le MQI | 50 |
| Tableau 11 : Caractéristiques principales des cours d'eau prospectés | 51 |
| Tableau 12 : Détails du calcul des scores MQI des quinze stations étudiées | 56 |
| Tableau 13 : Des données IPR utilisées pour l'automatisation de l'évaluation MQI | 61 |

I. Introduction

Fruit de la convention de coopération entre l'Office français de la biodiversité (OFB) et le Laboratoire de Géographie Physique (LGP) du CNRS, ce rapport synthétise les principaux développements et résultats obtenus, pour la métropole et l'outre-mer, pour la période 2018 – 2020, concernant l'exploitation et la valorisation du projet national Carhyce (CAractérisation HYdromorphologique des Cours d'Eau). Cette étude poursuit les travaux des conventions CNRS – OFB précédentes (Gob *et al.*, 2014, 2015 ; Tamisier *et al.*, 2017a,b) et dégage les perspectives pour la convention de coopération 2021 – 2023.

Le cadre européen

La Directive-cadre sur l'eau (DCE, 2000) et sa traduction dans la loi française (LEMA, 2006) définissent le contexte en matière de politique de l'eau. Elles impliquent une gestion globale et intégrée des milieux et écosystèmes aquatiques pour atteindre un « bon état écologique ». Cet objectif est défini sur la base de la situation des communautés biologiques et des caractéristiques physico-chimiques de l'eau mais pas uniquement. Les conditions hydrologiques et la morphologie des cours d'eau sont considérées comme les facteurs de contrôle, ou « supports », de la biodiversité aquatique au travers des habitats qu'elles contribuent à mettre en place. S'y ajoutent les conditions en matière de continuité des rivières, traduites par le thème de la « continuité écologique » dans la gouvernance française. S'intéressant tant à la forme des lits fluviaux, qu'aux sédiments qu'ils transportent, à la structure ou composition des berges ou encore à la qualité des corridors rivulaires végétalisés, l'ensemble est ainsi représenté par 3 grands éléments de qualité DCE (EQ) multi-compartiments (i-e Hydrologie, Continuité de la rivière, Morphologie), lesquels se déclinent en 9 à 10 paramètres élémentaires (selon contexte, métropole vs outre-mer) : [Hydrologie] Quantité (1), Dynamique (2), Connexion avec la nappe - Eaux souterraines (3) / [Continuité de la rivière] Continuité biologique (amphihalins / potamodromes, 4 & 5), Continuité sédimentaire (6), Continuité latérale (7) / [Morphologie] Variation de la largeur et de la profondeur des lits (Géométrie hydraulique, 8), Structure et substrat des lits (9), Structure des rives (10).

Des enjeux écologiques et environnementaux en lien avec l'aménagement du territoire

Fleuves, rivières et ruisseaux sont en effet des milieux vivants se façonnant autour des eaux et des sédiments qu'ils transportent, et qui transforment leurs lits ; créant ainsi des habitats riches et diversifiés pour la flore et la faune. Or, les processus et les caractéristiques naturelles des cours peuvent se voir influencés voire altérés par les usages et activités humaines, exerçant alors des pressions (sous-entendues anthropiques), pesant sur leur bon fonctionnement. Certaines pressions, par exemple celles générées par les ouvrages sur cours d'eau, sont concomitantes à de potentielles altérations sur plusieurs éléments de qualité et/ou plusieurs paramètres élémentaires, rencontrées en même temps. Elles requièrent donc une attention et une priorisation particulières. Au dernier rapportage, près de 50 % des masses d'eau sont en risque de non atteinte du bon état pour un problème d'hydromorphologie.

Un cadre réglementaire général incluant, par cycle et par bassin, des programmes de surveillance et des rapports d'états des eaux

Réglementairement, l'analyse des conditions hydromorphologiques des cours d'eau est rendue nécessaire pour la définition du très bon état (écologique), pour justifier de la non dégradation de l'état existant (cette règle est transcrite en droit français aux articles L. 212-1 IV 4° et R. 212-13 du code de l'environnement) ou encore inscrite en tant qu'exigence dans les programmes de mesures, afin d'atteindre l'état écologique requis. Plus particulièrement, l'article 8 et l'annexe V de la DCE fixent les règles du contrôle des éléments de qualité hydromorphologiques sur les sites du programme de surveillance : « *Les États membres veillent à ce que soient établis des programmes de surveillance de l'état des eaux afin de dresser un tableau cohérent et complet de l'état des eaux au sein de chaque district hydrographique. [...]* ». Notons qu'en France, le programme de surveillance et le rapport d'état des eaux de chaque bassin implique entre autres le Réseau de Contrôle de Surveillance (RCS), le Réseau de Référence Pérenne (RRP) et le Réseau de Contrôle Opérationnel (RCO). L'arrêté prescriptif du 6 décembre 2018 (abrogeant celui du 25 janvier 2010) établissant le programme de surveillance de l'état des eaux en application de l'article R. 212-22 du code de l'environnement fixe lui les méthodes et protocoles mis en œuvre en fonction des réseaux/enjeux. L'arrêté du 27 juillet 2018 (modifiant l'arrêté du 25 janvier 2010) fixe quant à lui les méthodes et critères d'évaluation de l'état écologique, de l'état chimique et du potentiel écologique des eaux de surface pris en application des articles R. 212-10, R. 212-11 et R. 212-18 du code de l'environnement.

Initiée dès 2008, pour une stabilisation et une standardisation étendue de 2013 à 2017 (version finale maquettée du protocole), le projet Carhyce est un dispositif comprenant (i) un protocole standardisé d'acquisition de données hydromorphologiques appliquée par différents opérateurs aux stations des réseaux DCE (RCS, RCO, RRP) ainsi qu'à certains projets d'aménagement ou de restauration de cours d'eau (par ex. Suivis scientifiques minimaux, SSM) ; et (ii) une démarche composée d'algorithmes de calcul et d'évaluation réalisés à partir des données collectées sur le terrain, permettant la production de différentes métriques, indices ou indicateurs de diagnostic du (dys)fonctionnement hydromorphologique des cours d'eau ou de suivi lié à leur restauration. Une banque de production de données a ainsi été constituée et rendue accessible en ligne dès 2011 (<https://carhyce.eaufrance.fr/>, enrichie chaque année depuis), laquelle alimente depuis 2017 un portail spécifique, issu de la coopération LGP – OFB, permettant de fournir métriques, indices et indicateurs : l'Interface d'Exploitation des Données Carhyce ou IED (<https://lgp.cnrs.fr/carhyce>). Le dispositif Carhyce, pérenne et permanent (généralement un suivi par cycle de gestion de 6 ans pour chaque station a minima) est inscrit au titre de l'arrêté du 6 décembre 2018 (abrogeant celui du 25 janvier 2010) établissant le programme de surveillance de l'état des eaux. Ce projet a par ailleurs fait l'objet d'un programme de consolidation mené entre 2019 et 2020 ([voir annexe VI.3](#)), à l'initiative conjointe des Directions régionales de l'Office français de la biodiversité, du CNRS et des partenaires institutionnels de Guyane pour ce territoire (Office de l'eau et Direction de l'environnement, de l'aménagement et du logement – DEAL – en coordination et financement d'une maîtrise d'œuvre exercée par les bureaux d'études Téléos, ONIKHA et la Fédération départementale pour la pêche et la protection des milieux aquatiques du Doubs).

Les indicateurs issus du projet permettent d'étayer l'analyse des liens « pressions – risques d'impact » des plateformes d'analyse globale comme le Système relationnel d'audit de l'hydromorphologie des cours d'eau (métropole) ou encore le Référentiel hydromorphologique ultramarin (Outre-mer). Notamment, le protocole permet de construire 6 modèles d'évaluation d'écart aux références, par Hydroécocorégion (HER), de la géométrie hydraulique préfigurant un « Indicateur morphologique global » (ou IMG). Cet indicateur complète l'élément de qualité DCE « Morphologie de la rivière » pour le paramètre « Variation de la largeur et de la profondeur des lits ». Également, les données relatives à la ripisylve et aux substrats (tailles) présentes dans le jeu de données Carhyce permettent de compléter ce même élément de qualité pour les paramètres « Structure des rives » et « Structure et substrats des lits ».

Dans ce rapport, il est tout d'abord proposé d'établir un état des lieux des données disponibles à l'issue des 4 mises à jour et des optimisations réalisées depuis le début de l'année 2019 au sein de l'Interface d'Exploitation des Données Carhyce (IED). Est présentée ensuite la nouvelle version du référentiel d'analyse dit « Référentiel v2.0 » basée sur les relevés récents d'une large majorité des stations de référence (au sens du fonctionnement hydromorphologique)¹. Est proposée également une clé d'interprétation de l'Indicateur morphologique global (IMG) grâce à une comparaison avec le *Morphological quality index* (MQI), un indicateur morphologique utilisé en Italie. Enfin, cette étude conclut sur quelques éléments de réflexions sur les potentialités et perspectives du Lidar pour la caractérisation hydromorphologique des cours d'eau.

II. Acquisition des données Carhyce : évolution, exploitation et perspectives

II.1 Préambule

La *Figure 1* renseigne la densification du nombre d'opérations réalisées depuis 2009, première année de bancarisation des données. Nous sommes ainsi passés de 230 opérations en 2009 à près de 1700 en 2014 puis à plus de 3550 en avril 2021.

Ces données ont été acquises sur le terrain d'abord et surtout lors d'opérations menées par les services territoriaux de l'OFB mais également par l'entremise de structures publiques ou privées, maîtrises d'œuvre ou d'ouvrage, telles que les Agences ou offices de l'eau, des syndicats de rivière ou encore des bureaux d'études. Cette croissance est tout à fait remarquable et a permis de constituer une base de données unique en son genre. Sa richesse et ses qualités ont ainsi été saluées lors de sa présentation au colloque de l'*International Society for River Science* (ISRS) à Vienne en septembre 2019.

¹ Les modèles reposant sur les données Carhyce s'appuient sur différents principes théoriques. Des modèles de la morphologie des lits en fonction des caractéristiques de leur bassin versant sont construits à partir d'un jeu de stations considérées comme ayant subi peu ou pas d'altération hydromorphologique, et donc considérées comme « références » au sens du fonctionnement hydromorphologique. Ces modèles sont dits de « référence » et peuvent alors être utilisés comme outil d'évaluation pour déterminer « l'état » hydromorphologique d'une portion ou d'un tronçon de rivière, quantifier un écart à une situation normale ou de référence et ainsi évaluer le poids de ces altérations physiques sur les biocénoses. (Tamisier *et al.*, 2017a,b)

En février 2021, la banque de production Carhyce (<https://carhyce.eaufrance.fr>) comptabilise 3550 opérations sur 2326 stations (ou tronçons) correspondant à 1676 cours d'eau de France métropolitaine et d'outre-mer. De ces données sont tirés plus d'une centaine de paramètres décrivant le fonctionnement hydromorphologique ; lesquels sont calculés et rendus disponibles à tous les opérateurs et gestionnaires via l'IED (<https://lqp.cnrs.fr/carhyce>).

Outre les moyens de diffusion courants (portails techniques, communications ciblées, diffusion à la demande, *etc.*), *Researchgate.net* est également utilisé pour la diffusion des rapports et des publications scientifiques liés au projet Carhyce : plus de 6000 consultations ont été constatées depuis 2014 pour près de 2000 téléchargements des différents documents.

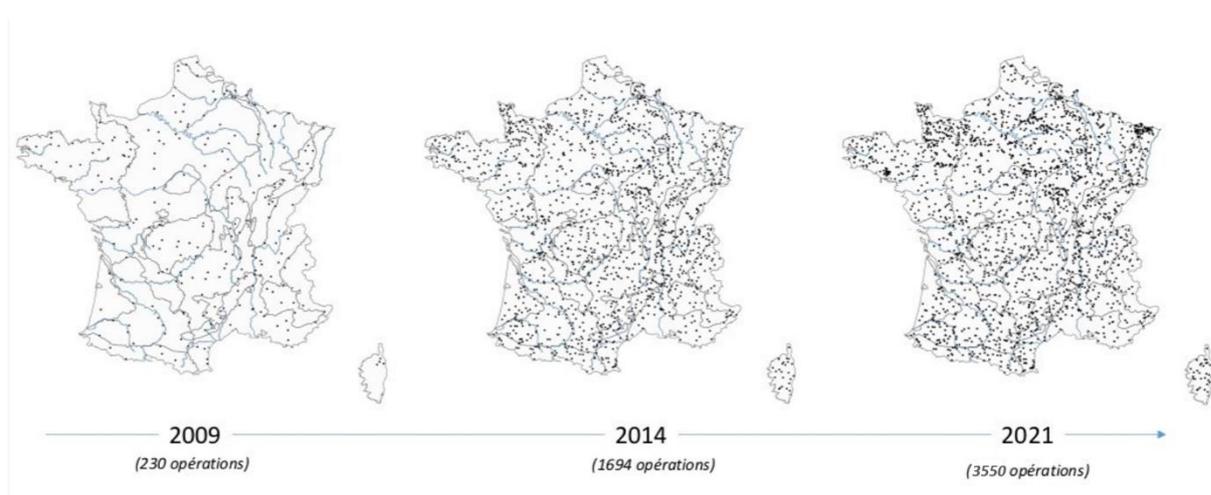


Figure 1 : Evolution du nombre d'opérations Carhyce disponibles depuis janvier 2009 (métropole)

Au-delà des rapports des conventions scientifiques (Gob *et al.*, 2014 ; Tamisier *et al.*, 2017a,b), les données Carhyce ont fait directement ou indirectement l'objet d'une exploitation dans au moins huit articles scientifiques publiés dans des revues internationales, ainsi que d'un chapitre d'ouvrage dédié à la définition de références environnementales (présentés ici par ordre chronologique puis de nom):

- Gob F., Bilodeau C., Thommeret N., Belliard J., Albert M-B., Tamisier V., Baudoin J-M., Kreutzenberger K., 2014. Un outil de caractérisation hydromorphologique des cours d'eau pour l'application de la DCE en France (CARHYCE). *Géomorphologie, relief, processus, environnement*, 1, pp. 57-72
- Stewardson M., Datry T., Lamouroux N., Pella H., Thommeret N., Valette L., Grant S., 2016. Variation in reach-scale hydraulic conductivity of streambeds, *Geomorphology*, 259, pp. 70-80
- Colas F., Baudoin J-M., Gob F., Tamisier V., Valette L., Kreutzenberger K., Lambrigot D., Chauvet E., 2017. Scale dependency in the hydromorphological control of a stream ecosystem functioning. *Water Research*, 113, p 1-14
- Bizzi B., Piégay H., Demarchi L., Van de Bund W., Weissteiner C.J., Gob F., 2018. LiDAR-based fluvial remote sensing to assess 50–100-year human-driven channel changes at a regional level: The case of the Piedmont Region, Italy. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44 (2), pp. 471-489

- 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, pp. 44-56
- Dézerald O., Mondy C.P., Dembski S., Kreutzenberger K., Reyjol Y., Chandesris A., Valette L., Brosse S., Toussaint A., Belliard J. Merg M.L. & Usseglio-Polatera P. (2020) – A diagnosis-based approach to assess specific risks of river degradation in a multiple pressure context: insights from fish communities. *Science of the Total Environment*, 734: 139467
- Gob F., Thommeret N., Bilodeau C., Tamisier V., 2020. La difficile production des normes et de modèles de référence : comment définir des cours d'eau de qualité ? In Dufour S., Lespez L. (eds), *Géographie de l'environnement. La Nature au temps de l'Anthropocène*, Armand Colin, Paris, pp. 225-237
- Morel M., Booker D.J., Gob F., Lamouroux N., 2020. Intercontinental predictions of river hydraulic geometry from catchment physical characteristics. *Journal of Hydrology*, 582, pp. 124292
- Morel M., Booker D.J., Gob F., Lamouroux N., 2020. Consistent Theoretical and Empirical Predictions of at- a- Station Hydraulic Geometry Exponents in Stream Reaches. *Water Resources Research*, 56 (10), pp. 16

Le projet Carhyce est par ailleurs nommément cité et/ou socle de réflexion ou d'évaluation des travaux suivants (présentés ici par ordre chronologique puis de nom) :

- Delannoy R. (2015) – Evaluer l'efficacité des opérations de restauration des cours d'eau : comment mettre à profit les retours d'expérience ? ; Thèse de doctorat de l'Université Paris-Diderot Paris 7
- European Commission (2018) – River Hydromorphological Assessment and Monitoring Methodologies – FINAL REPORT
- Jugie M. (2018) - Trajectoire hydrogéomorphologique d'un petit cours d'eau périurbain francilien : aménagement, "désaménagement" ? ; Thèse de doctorat de l'Université de Paris 1 Panthéon-Sorbonne
- Rolan-Meynard M., Vivier A., Reyjol Y., Boutet-Berry L., Bouchard J., Mangeot P., Navarro L., Melun G., Moreira-Pellet B., Bramard M., Le Bihan M., Magand C., Leurent T., Vigneron T., Cagnant M., Bourrain X., Morel A., Kreutzenberger K. (2019) - Guide pour l'élaboration de suivis d'opérations de restauration hydromorphologique en cours d'eau. Agence française pour la biodiversité. Collection Guides et protocoles. 189 pages

II.2 Fonctionnement et mise à jour des données de l'Interface d'Exploitation des Données (IED)

L'IED a été créé sous *R* à l'aide du logiciel *R studio* et du package *R Shiny* (<https://shiny.rstudio.com/>), ceci lors de la convention OFB – CNRS précédente (Tamisier et al., 2017a). Cette application n'est pas directement connectée à la banque de données Carhyce : une extraction de cette dernière est réalisée deux fois par an, en sortie de période de terrain à l'automne puis au printemps suivant après la période hivernale de reprise de données de l'année écoulée.

Ces données sont alors traitées puis intégrées dans l'IED dans le cadre d'une mise à jour officielle, communiquée aux différents acteurs, tous les six mois. La mise à jour de la base de données repose sur quatre grandes étapes, réalisées principalement par le biais de scripts *R* :

1. Calcul des variables hydromorphologiques pour chacune des opérations ;
2. Calcul des variables de contexte dans un module spatialisé : « GéoCarhyce » (ici réalisée avec *ArcGIS pro*) ;
3. Calcul des modèles de référence régionaux ;
4. Calcul des différentes métriques, indices (dont *scores granulométriques et ripisylve*), des écarts aux modèles de référence et *in fine* de l'Indicateur morphologique global (IMG).

A la suite de ces étapes, l'ensemble des données, scripts et résultats de calcul composant l'IED sont transférés sur un serveur du Laboratoire de Géographie Physique (serveur *Linux*), permettant la mise en ligne des résultats (Figure 2).

Rappelons que Tamisier et al. (2017a,b) détaillent les bases de conception, de calcul et de mises en œuvre des différentes variables, modèles, indices ou indicateurs.

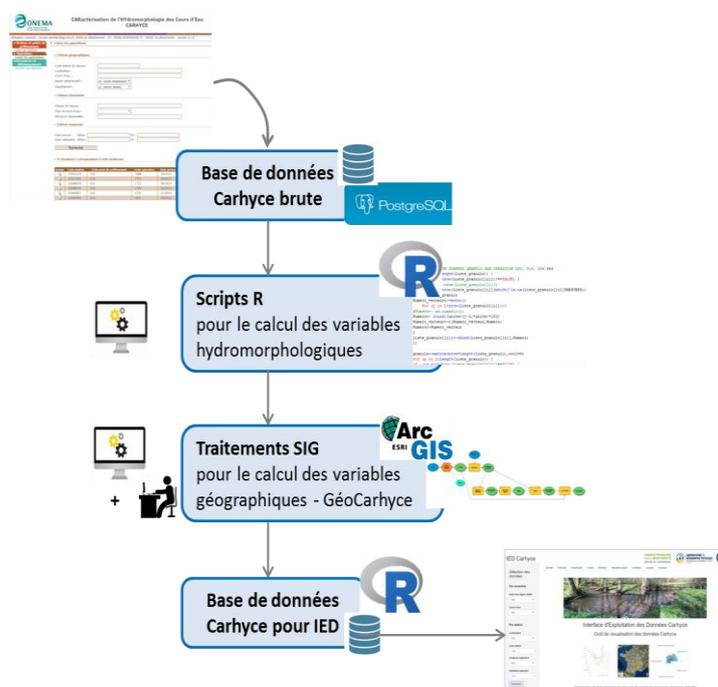


Figure 2 : Représentation simplifiée du processus de mise à jour

Depuis 2019, 5 mises à jour de l'IED ont été réalisées. Pour celles-ci, 906 nouvelles opérations ont été vérifiées (*Tableau 1*) puis ensuite ajoutées au registre des opérations disponibles.

Une mise à jour s'effectue sur une quinzaine de jours environ. La majorité du processus est automatisé via des scripts *R*, et est dès lors assez rapide, surtout pour des jeux de données de 200 à 250 nouvelles opérations en moyenne. Les étapes les plus chronophages, et restant difficiles à anticiper malgré les contrôles et la formation des opérateurs, concernent :

- i) la vérification des données, qu'elles soient nouvelles ou actualisées sur des opérations, points de prélèvement et/ou stations déjà existantes, et
- ii) pour les nouvelles stations collectées, leur bon positionnement sur le réseau hydrographique ainsi qu'au sein du bassin versant extrait du MNT (BD Alti 25 m, IGN).

Les erreurs de saisie ou de bon positionnement des stations, fréquentes depuis la dernière campagne de requalification des données Carhyce menée par l'OFB en 2018, grèvent généralement les étapes de calcul. Sans les diverses vérifications préalables, un certain nombre d'opérations ne pourraient être intégrées en l'état à l'IED, sous peine de produire des résultats d'évaluation faux pour chaque opération concernée, ou pire, d'insérer des données douteuses ou incorrectes dans ce qui fondent même les modèles d'évaluation, régionalisés et donc agrégateurs de multiples opérations (cas notamment de l'IMG).

C'est ainsi qu'en janvier 2021, un travail important de vérification et de correction a été réalisé, notamment pour passer à l'utilisation des nouvelles opérations sur stations de référence (deuxième passage, « Référentiel v2.0 ») au sein des modèles. A ces mises à jour métier s'ajoutent également des mises à jour de l'architecture et des composants de l'IED. Ainsi, en janvier 2020, ont été mis à jour le serveur de production (*Ubuntu, Linux*) et tous les packages *R* ; ce qui a permis la correction d'un certain nombre de bugs et anomalies récurrents dans l'ergonomie et le bon fonctionnement de l'outil.

| Mise à jour | Date | Nouvelles opérations | Nombre total d'opérations | Remarque |
|-------------|--|----------------------|---------------------------|---|
| 1 | Janvier 2019 | 245 | 2889 | |
| 2 | Juillet 2019 | 181 | 3070 | |
| 3 | Janvier 2020 | 201 | 3271 | Mise à jour serveur Mise à jour des bibliothèques <i>R</i> |
| 4 | Juillet 2020 puis Septembre 2020 (patch correctif) | 153 | 3424 | Première actualisation effective pour l'Outre-mer |
| 5 | Février 2021 | 126 | 3550 | Mise à jour des référentiels d'évaluation |

Tableau 1 : Détails des mises à jour réalisées depuis janvier 2019

II.3 Etat des lieux des données disponibles

II.3.1 Répartition spatiale des stations Carhyce acquises depuis 2009

En février 2021, 3550 opérations concernant 2326 stations différentes localisées sur l'ensemble du territoire national (métropole et DROM) sont ainsi rendues consultables dans l'IED.

Parmi celles-ci, 531 opérations correspondant à autant de stations différentes sont considérées comme des références. Pour rappel, ces dernières ont d'abord été sélectionnées grâce à l'inventaire des pressions de la base de données socle de construction de l'Indice poisson rivière (IPR, données d'analyse des pressions) puis consolidées grâce à une analyse menée par et avec les Directions régionales de l'OFB.

Si certaines Hydroécocorégions ou HER, telles que définie par Wasson *et al.* (2002) (Figure 3), comptent encore trop peu de stations pour pouvoir construire des modèles de référence (voir plus loin), la distribution des stations est plutôt homogène à travers le territoire français (Figure 4 et Figure 5). On voit en effet que les stations sont présentes partout et que seule la taille de certaines HER explique le faible nombre de références éligibles à une intégration dans les modèles d'évaluation hydromorphologiques. C'est notamment le cas pour les HER « Alsace », « Ardennes », « Plaine de Saône », « Dépressions sédimentaires » et « Dépôts argilo-sableux ». Toutes ces HER (à l'exception des « Dépressions sédimentaires ») comptent plus de 30 stations mais, parmi celles-ci, moins de 5 sont considérées comme « références ».

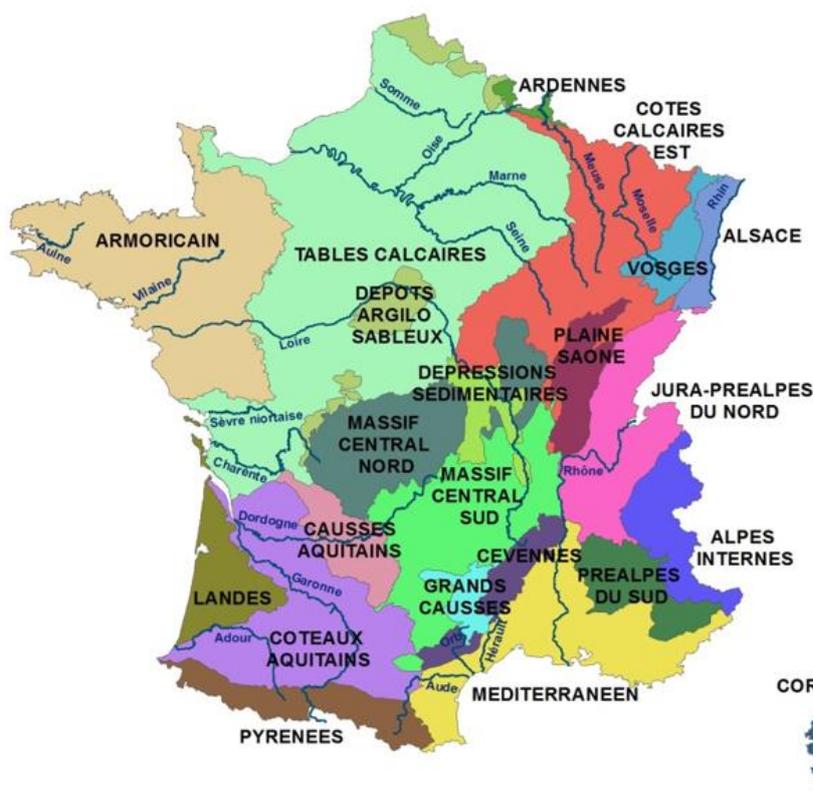
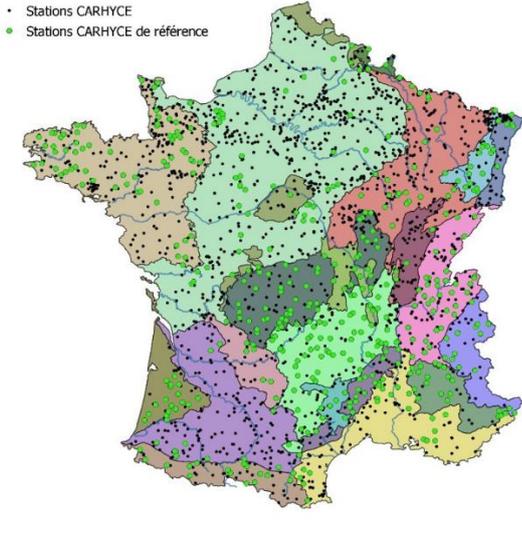


Figure 3 : Les Hydroécocorégions (HER) en France métropolitaine (d'après Wasson *et al.*, 2002)

Localisation des Stations CARHYCE (février 2021)



Répartition des opérations CARHYCE par HER

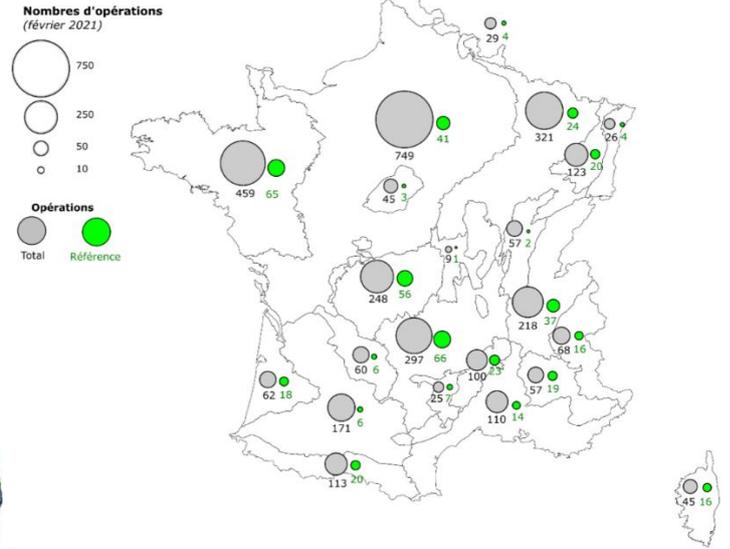


Figure 4 : Répartition des stations Carhyce (sans distinction) et stations Carhyce dites « de référence » sur le territoire français métropolitain, par HER (à gauche).
 Nombre d'opérations Carhyce (total, en gris, et de référence, en vert) sur le territoire français métropolitain, par HER (à droite)

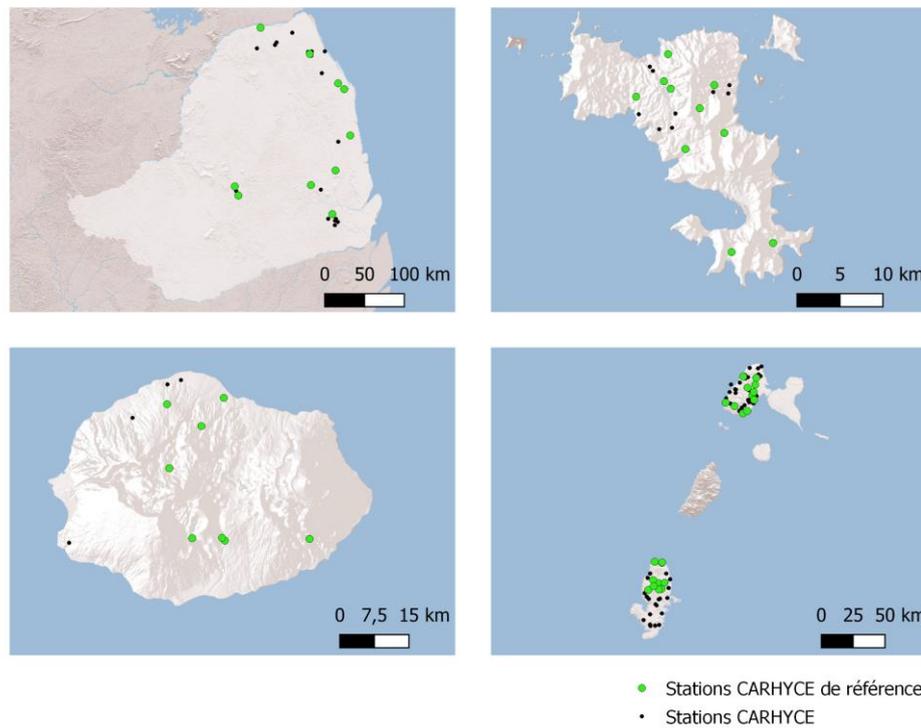


Figure 5 : Répartition des stations Carhyce (sans distinction) et stations Carhyce de référence pour les Départements et régions d'outre-mer (DROM)

II.3.2 Caractéristiques hydromorphologiques des stations Carhyce

Les variables calculées et mises à disposition dans l'IED permettent d'avoir une représentation des caractéristiques hydromorphologiques des rivières françaises, et ceci à l'échelle nationale ou régionale (*Figure 6*). Ces informations permettent d'avoir une analyse plus fine des modèles de référence ou de l'évaluation que permettent les données.

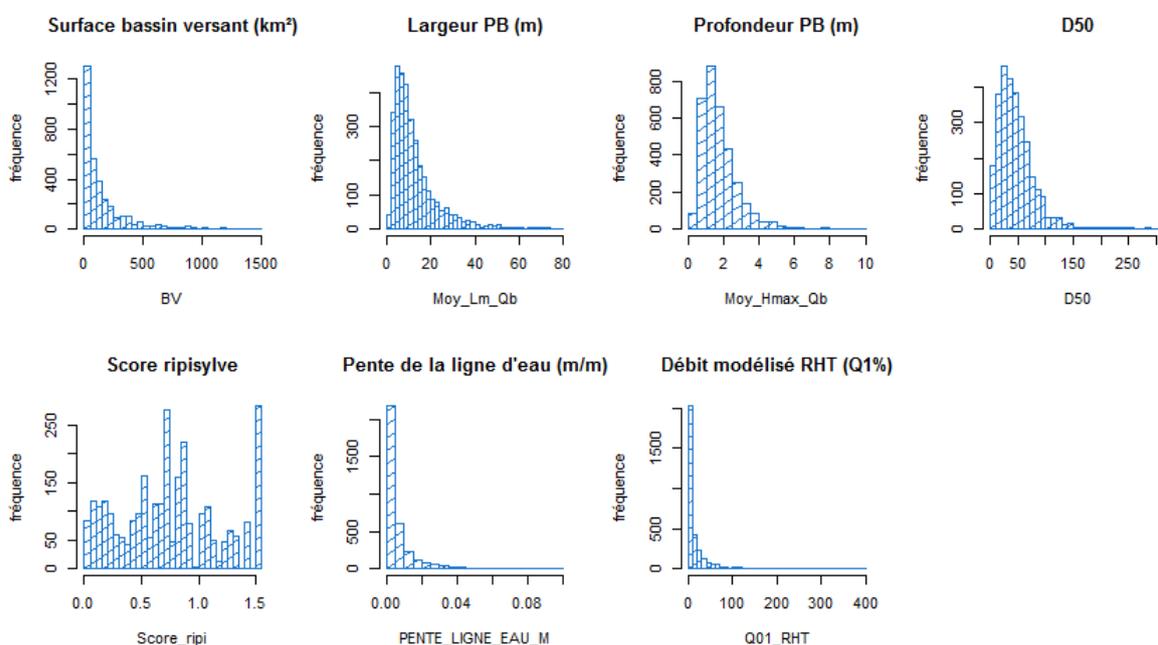


Figure 6 : Distribution des principaux paramètres descripteurs des stations Carhyce présents dans l'IED

Pour rappel, les stations Carhyce correspondent des tronçons de rivière prospectables à pied et sont représentatives du réseau hydrographique français, c'est-à-dire largement dominées par une représentation des petits à très petits cours d'eau. Ainsi, à l'exception des très grands cours d'eau, on trouve dans la base de données Carhyce la quasi-totalité des types de cours d'eau présents sur le territoire métropolitain et dans les Départements et régions d'outre-mer. La majorité des bassins versants ont une superficie inférieure à 250 km², des largeurs inférieures à 20 m et des profondeurs inférieures à 2 m. Ce sont pour la plupart des rivières caillouteuses dont le diamètre des particules présentes sur les radiers est inférieur à 10 cm. Enfin, si on trouve quelques tronçons de cours d'eau très pentus, la majorité possède une pente faible, inférieure à 0,002 m/m.

Lorsque l'on fait le même exercice d'analyse à l'échelle des HER, on retrouve les caractéristiques attendues pour ces régions (*Tableau 2, Figure 7 et Figure 8*). On observe, par exemple, que les stations des DROM insulaires (Guadeloupe, La Réunion, Martinique et Mayotte) ont les bassins les plus petits. Ce sont toutefois des rivières qui, à pleins bords, sont larges et plutôt profondes pour pouvoir faire passer des débits de crues souvent importants. Ce sont aussi les stations les plus pentues et avec le substrat le plus grossier. Les HER de montagne s'inscrivent dans la continuité de ces stations d'Outre-mer. Leurs cours d'eau y ont toutefois des pentes un peu moins fortes et un substrat médian un peu moins grossier. La taille de leur bassin est par contre beaucoup plus variable puisque l'on peut y trouver des bassins

de plusieurs centaines de kilomètres carrés. De l'autre côté du spectre, en termes de pente, on trouve les cours d'eau de plaine dont la pente médiane ne dépasse pas 0,002 m/m. Ce sont des rivières de toutes les tailles avec un substrat souvent assez petit (D_{50} médian inférieur à 4 cm). Entre ces deux groupes, se trouvent les rivières dont la pente est légèrement supérieure à 0,005 m/m, des bassins plutôt de taille intermédiaire avec un substrat caillouteux dont le D_{50} se situe autour de 5 ou 6 cm.

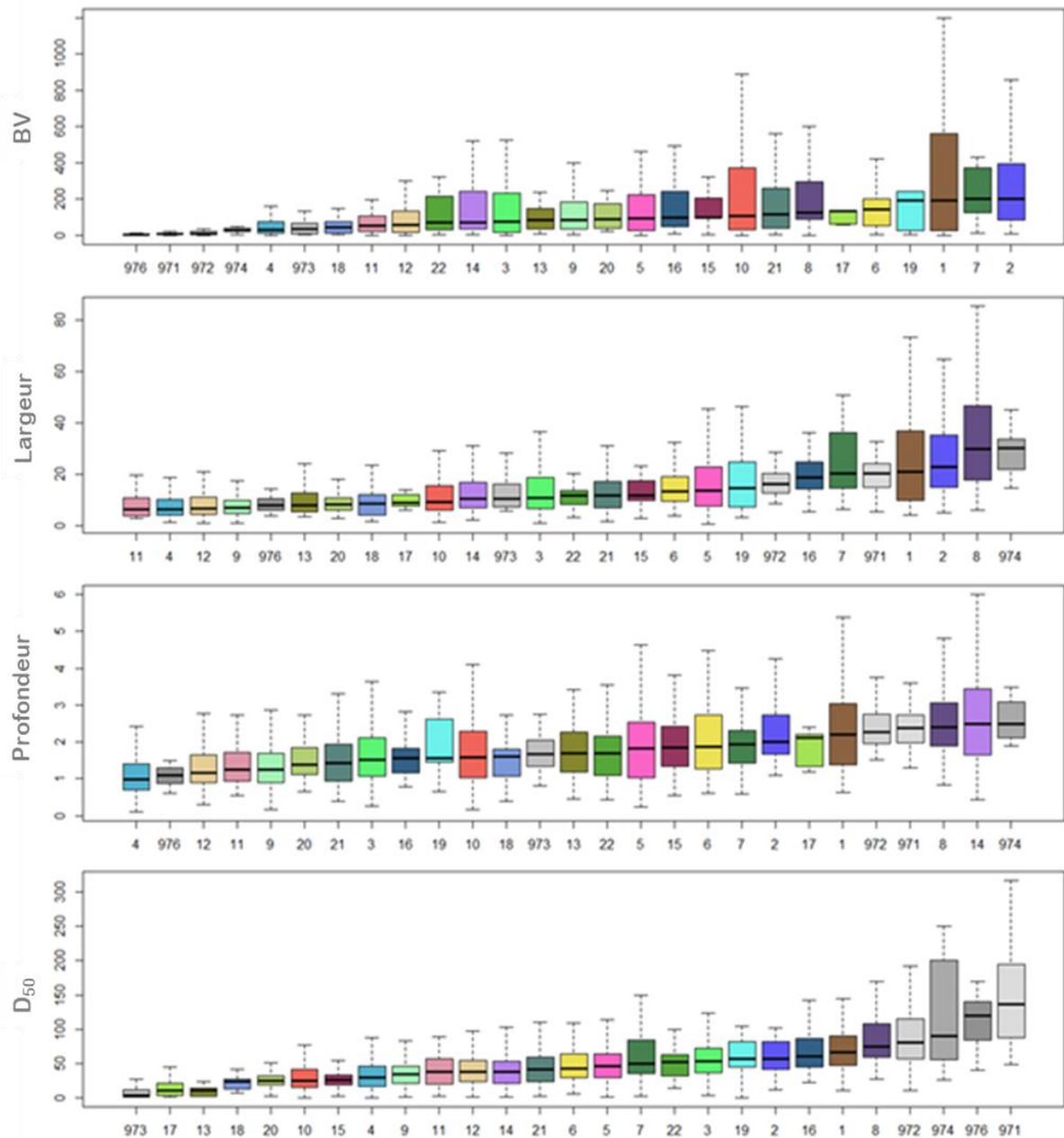


Figure 7 : Distribution des principales caractéristiques des stations Carhyce par HER

La taille des bassins est exprimée en km², les largeur et profondeur en m et le diamètre médian des particules en mm

Lorsque l'on s'intéresse au *score ripisylve*, on observe d'abord que presque toutes les HER offrent un spectre assez large de ce score. On trouve donc dans toutes les régions des stations dont les berges sont plus ou moins couvertes par la végétation. Trois des cinq DROM font toutefois exception : i) la Guyane, bien entendu, dont pratiquement la totalité des stations s'écoulent à travers la forêt ; ii) la Guadeloupe, avec une médiane de son *score ripisylve* à 1,52 ; et iii) La Réunion dont les stations ont une ripisylve très développée. Les stations de Martinique sont un peu différentes car beaucoup moins homogènes ; on y trouve beaucoup plus de stations avec assez peu de ripisylve, notamment dans le sud de l'île très cultivé. En métropole, ce sont les HER « Préalpes du sud », « Alpes internes », « Landes », « Cévennes » et « Vosges » qui ont les ripisylve les plus garnies ; tandis que les HER « Côtes calcaires est », « Armoricaïn » et « Tables calcaires » ont la médiane du *score ripisylve* la plus faible (0,61, 0,65 et 0,67 respectivement). Les codes HER et la valeur médiane de chaque boîte de dispersion sont présentés dans le *Tableau 2*.

| | HER | Opération | Station de référence | Taille du BV (km ²) | Largeur (m) | Profondeur (m) | Q _{0,01} | Pente (m/m) | D ₅₀ (mm) | Score ripisylve |
|---------------------------|-----|-----------|----------------------|---------------------------------|-------------|----------------|-------------------|-------------|----------------------|-----------------|
| Pyrénées | 1 | 113 | 20 | 195 | 21,0 | 2,19 | 16,2 | 0,0091 | 66,25 | 0,77 |
| Alpes Internes | 2 | 68 | 16 | 204 | 22,8 | 2,00 | 23,6 | 0,0158 | 57,25 | 1,06 |
| Massif central sud | 3 | 297 | 66 | 77 | 10,9 | 1,51 | 6,1 | 0,0070 | 53,5 | 0,80 |
| Vosges | 4 | 123 | 20 | 30 | 6,5 | 0,99 | 2,7 | 0,0048 | 29,75 | 0,93 |
| Jura - Préalpes du nord | 5 | 218 | 37 | 95 | 13,8 | 1,82 | 12,1 | 0,0038 | 46,25 | 0,80 |
| Méditerranéen | 6 | 110 | 14 | 142 | 13,3 | 1,86 | 6,9 | 0,0042 | 42,25 | 0,83 |
| Préalpes du sud | 7 | 57 | 18 | 203 | 20,2 | 1,94 | 11,8 | 0,0084 | 50 | 1,08 |
| Cévennes | 8 | 100 | 23 | 123 | 29,8 | 2,39 | 25,4 | 0,0068 | 75 | 0,93 |
| Tables calcaires | 9 | 749 | 41 | 87 | 7,1 | 1,25 | 2,7 | 0,0019 | 34 | 0,67 |
| Côtes calcaires est | 10 | 321 | 24 | 110 | 9,3 | 1,58 | 7,4 | 0,0016 | 25 | 0,61 |
| Causses Aquitains | 11 | 60 | 6 | 56 | 6,4 | 1,25 | 4,5 | 0,0032 | 37,5 | 0,74 |
| Armoricaïn | 12 | 459 | 65 | 59 | 6,9 | 1,17 | 5,3 | 0,0029 | 37,5 | 0,65 |
| Landes | 13 | 62 | 18 | 85 | 8,1 | 1,69 | 1,3 | 0,0013 | 11 | 1,02 |
| Coteaux aquitains | 14 | 171 | 6 | 74 | 10,4 | 2,49 | 5,5 | 0,0023 | 37,5 | 0,65 |
| Plaine Saône | 15 | 57 | 2 | 99 | 11,8 | 1,85 | 6,4 | 0,0011 | 26 | 0,55 |
| Corse | 16 | 45 | 16 | 97 | 18,8 | 1,57 | 16,4 | 0,0130 | 60,5 | 1,01 |
| Dépressions sédimentaires | 17 | 9 | 1 | 133 | 9,1 | 2,11 | 4,1 | 0,0011 | 10,5 | 0,79 |
| Alsace | 18 | 26 | 4 | 45 | 8,5 | 1,61 | 1,3 | 0,0021 | 24 | 0,74 |
| Grands causses | 19 | 25 | 7 | 194 | 14,5 | 1,57 | 7,5 | 0,0063 | 56,5 | 0,85 |
| Dépôts argilo-sableux | 20 | 45 | 3 | 91 | 8,3 | 1,39 | 3,2 | 0,0013 | 24,75 | 0,74 |
| Massif central nord | 21 | 248 | 56 | 115 | 11,8 | 1,44 | 8,9 | 0,0037 | 41,75 | 0,74 |
| Ardennes | 22 | 29 | 4 | 71 | 11,7 | 1,70 | 3,1 | 0,0039 | 52 | 0,74 |
| Guadeloupe | 971 | 41 | 11 | 10 | 20,4 | 2,38 | NA | 0,0293 | 136 | 1,52 |
| Martinique | 972 | 57 | 10 | 11 | 16,3 | 2,28 | NA | 0,0118 | 81,1 | 0,74 |
| Guyane | 973 | 27 | 25 | 34 | 10,7 | 1,66 | NA | 0,0012 | 3,25 | 1,52 |
| La Réunion | 974 | 13 | 8 | 25 | 30,3 | 2,49 | NA | 0,0211 | 90,5 | 1,32 |
| Mayotte | 976 | 19 | 10 | 6 | 7,9 | 1,10 | NA | 0,0166 | 120 | 0,86 |

Tableau 2 : Nombre d'opérations et caractéristiques médianes des HER

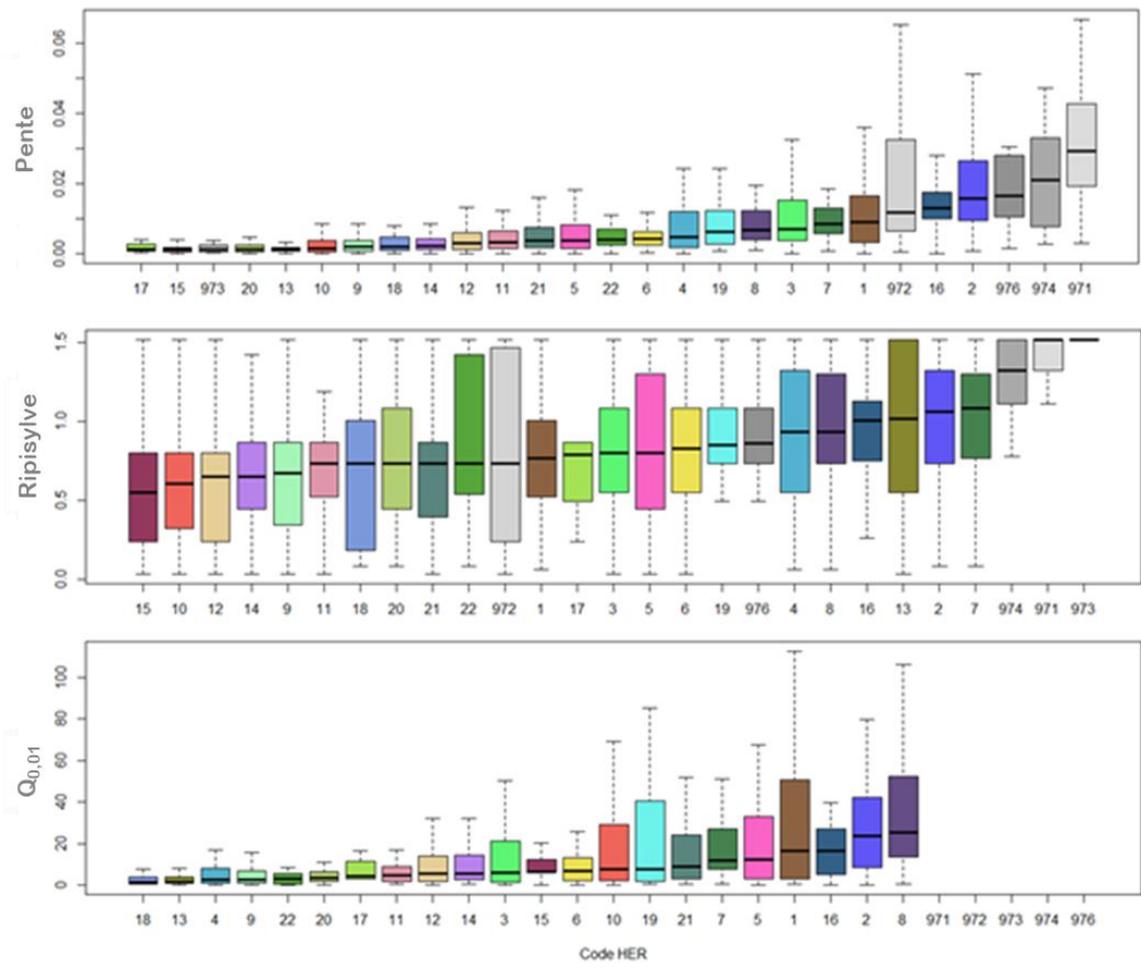


Figure 8 : Distribution des principales caractéristiques des stations Carhyce par HER (suite)

La pente est exprimée en m/m, la ripisylve correspond au score ripisylve (adimensionnel) et le Q_{0,01} est exprimé en m³/s

II.4 Modèles de référence hydromorphologiques régionaux et mise en place d'un référentiel d'évaluation version 2.0

II.4.1 Description des modèles

La *Figure 9* présente les modèles pour les largeurs et les profondeurs basés sur la deuxième version du référentiel d'évaluation (ou Référentiel v2.0, tenant compte de l'apport du programme de consolidation mené entre 2019 et 2020 avec d'une part des nouvelles stations de référence acquises et d'autre part un retrait de certaines stations dont le caractère « référence » était précédemment injustifié). Cette seconde version intègre généralement, après vérifications, les données acquises lors des deuxièmes passages, lorsque qu'elles existent, sur les stations de référence. L'ancien référentiel d'évaluation, ou Référentiel v1.0, est lui archivé.

Le *Tableau 3* indique les coefficients a et l'exposant b des modèles de référence des HER construits sur la relation entre la taille du bassin versant et les paramètres morphologiques suivants (équation de la forme $y=ax^b$) : largeur à pleins bords (L_{pb}), surface mouillée à pleins bords (S_{pb}), pente de la ligne d'eau, profondeur (maximum) à pleins bords (H_{pb}), profondeur des mouilles et rapport largeur (L_{pb})/profondeur (H_{pb}). La validité statistique des modèles est présentée grâce au coefficient de détermination (R^2) et sa significativité (p -value). Deux modèles spécifiques ont été ajoutés, le premier concerne les rivières en tresse et, l'autre, les montagnes volcaniques des DROM.

Trois HER ne comptent pas assez de stations de référence pour construire les modèles (2 stations de référence pour l'HER « Plaine de Saône », 3 pour « Dépôts argilo-sableux », 1 pour « Dépressions sédimentaires »). Sept HER ont des modèles encore trop peu robustes car construits (i) sur un trop faible nombre de stations de référence (4 stations pour « Alsace » et pour « Ardennes », 6 pour « Coteaux aquitains » et pour « Causses aquitains ») et (ii) à partir de stations de référence problématiques (Mayotte, Corse et La Réunion). Pour les quatre premières, un nombre suffisant de stations de référence n'a pu être trouvé car ce sont souvent des HER de petite surface présentant, soit une couverture des réseaux DCE insuffisante soit une incapacité à trouver des stations de référence dans des contextes assez variés (notamment de taille de bassin versant). Pour les îles de Mayotte, de la Corse et, dans une moindre mesure, de La Réunion, ce sont probablement des soucis de qualité dans la prise des données, liés à la détermination du niveau à pleins bords, qui empêchent la construction de meilleurs modèles. Un travail complémentaire d'analyse sur ces HER est à entreprendre.

Le premier élément à souligner est la qualité générale des modèles. La majorité d'entre eux (70%) sont significatifs (avec une p -value $< 0,1$) plus de 40% sont très significatifs (avec une p -value $< 0,01$) et leur coefficient de détermination majoritairement supérieur à 0,5 : la banque de données Carhyce fournit ainsi, pour la majorité du territoire, des références robustes et suffisamment précises pour être utilisées comme outil d'évaluation en appui à la gestion. Ces modèles concernent aussi bien la géométrie des lits que leurs pentes et la profondeur de leurs mouilles.

Pour autant, tous les modèles ne présentent pas d'aussi bonnes performances. Comme expliqué dans le rapport précédent (Tamisier *et al.*, 2017a), certains d'entre eux s'inscrivent dans des contextes régionaux ayant une variabilité naturelle (i.e. de forme, de fonctionnement,

etc.) plus forte que d'autres et la relation des différents paramètres à la taille de leur bassin est donc plus difficile à déterminer. Le *Tableau 3* met cela visuellement en évidence :

- Les modèles de meilleure qualité sont ceux construits sur les largeurs et les surfaces mouillées à pleins bords ; respectivement 65 % et 62% d'entre eux sont très significatifs (indiqués en vert) et ont de R^2 souvent supérieurs à 0.7 ; les profondeurs à pleins bords et les pentes fonctionnent un peu moins bien mais ont tout de même 38% de modèles très significatifs et 50% ont un R^2 supérieur à 0.5
- Les profondeurs des mouilles et le rapport largeur/profondeur (L/P) sont les moins performants avec, respectivement, 23 et 31% de modèles très significatifs et seulement 20% de modèles avec un R^2 supérieur à 0.5

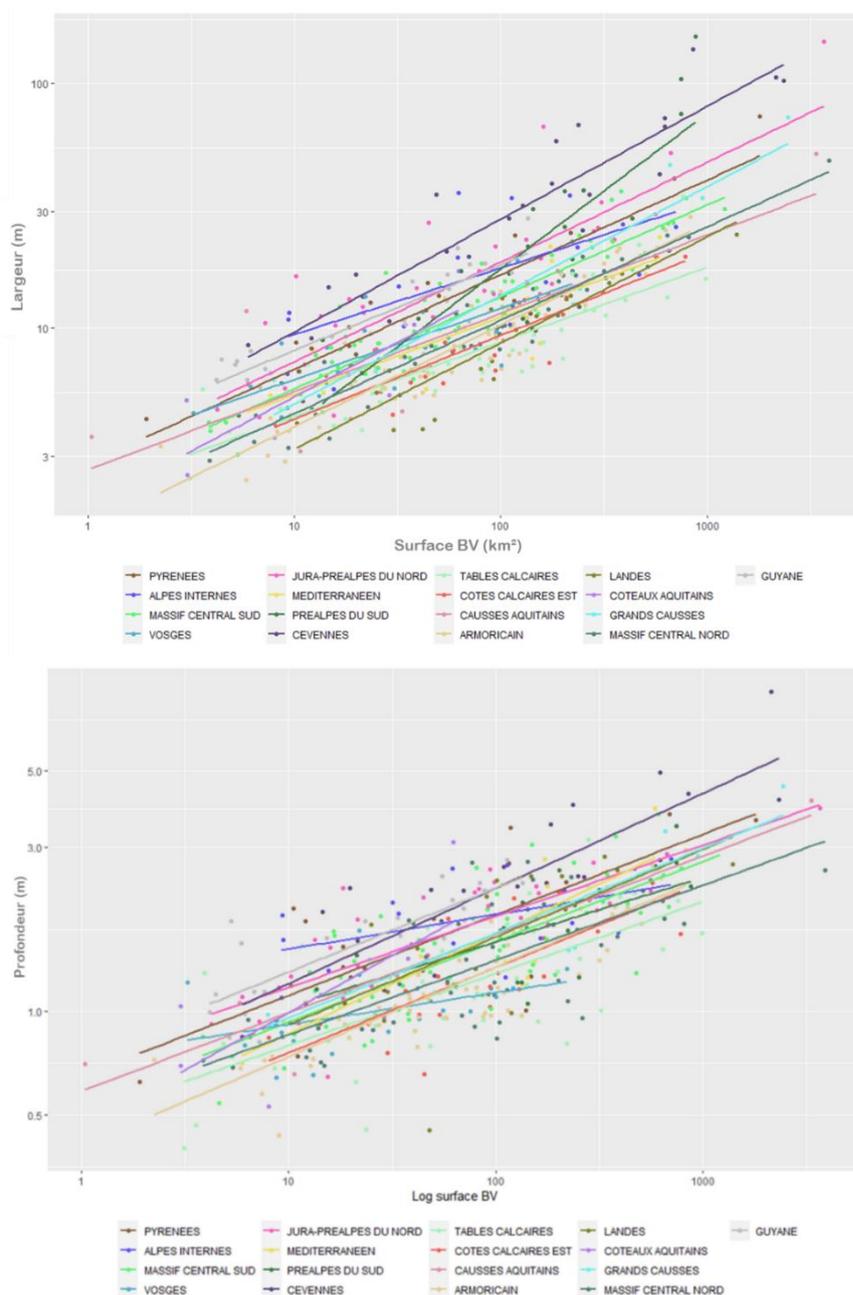


Figure 9 : Représentation des modèles d'évaluation Carhyce respectivement pour les paramètres *largeur mouillée à pleins bords* (en haut) et *profondeur à pleins bords* (en bas)

| | HER | Lpb | | | | Spb | | | | Pente | | | | Hpb | | | | Prof_mouilles | | | | L/P | | | |
|-------------------------------|-----|--------|------|-------|----------------|--------|------|-------|----------------|--------|-------|-------|----------------|--------|------|-------|----------------|---------------|------|-------|----------------|--------|------|-------|----------------|
| | | Nb ref | a | b | R ² | Nb ref | a | b | R ² | Nb ref | a | b | R ² | Nb ref | a | b | R ² | Nb ref | a | b | R ² | Nb ref | a | b | R ² |
| Alpes internes | 2 | 16 | 5,06 | 0,27 | 0,5 | 16 | 3,81 | 0,39 | 0,5 | 16 | 318,5 | -0,6 | 0,6 | 16 | 1,2 | 0,1 | 0,3 | 16 | 0,1 | 0,14 | 0,1 | 16 | 4,17 | 0,17 | 0,3 |
| Alsace | 18 | 4 | 18,5 | -0,19 | 0,4 | 4 | 21,6 | -0,22 | 0,6 | 4 | 0,01 | 1,47 | 0,5 | 4 | 1,7 | -0,01 | 0 | 4 | 0,4 | -0,26 | 0,6 | 4 | 11,8 | -0,19 | 0,2 |
| Ardennes | 22 | 4 | 2,98 | 0,22 | 1 | 4 | 0,43 | 0,55 | 1 | 4 | 66,5 | -0,43 | 1 | 4 | 0,2 | 0,33 | 1 | 4 | 0 | 0,19 | 0,4 | 4 | 13,2 | -0,11 | 0,6 |
| Armoricaïn | 12 | 65 | 1,52 | 0,42 | 0,9 | 65 | 0,41 | 0,69 | 0,9 | 64 | 23,65 | -0,53 | 0,3 | 65 | 0,4 | 0,26 | 0,7 | 65 | 0,1 | 0,18 | 0,3 | 65 | 3,83 | 0,15 | 0,3 |
| Causses aquitains | 11 | 6 | 2,64 | 0,32 | 0,7 | 6 | 1,05 | 0,55 | 0,8 | 6 | 22,08 | -0,48 | 0,9 | 6 | 0,6 | 0,23 | 0,9 | 6 | 0,1 | 0,21 | 0,7 | 6 | 4,54 | 0,09 | 0,2 |
| Cévennes | 8 | 23 | 3,35 | 0,46 | 0,8 | 23 | 1,32 | 0,74 | 0,8 | 23 | 89,68 | -0,51 | 0,8 | 23 | 0,6 | 0,28 | 0,7 | 23 | 0,1 | 0,42 | 0,8 | 23 | 5,19 | 0,19 | 0,6 |
| Corse | 16 | 16 | 8,56 | 0,16 | 0,2 | 16 | 5,44 | 0,24 | 0,2 | 16 | 56,99 | -0,3 | 0,3 | 16 | 1,2 | 0,05 | 0 | 16 | 0,1 | 0,3 | 0,1 | 16 | 7,26 | 0,12 | 0,2 |
| Coteaux aquitains | 14 | 6 | 1,89 | 0,45 | 0,7 | 6 | 0,52 | 0,82 | 0,7 | 6 | 28,77 | -0,35 | 0,6 | 6 | 0,5 | 0,33 | 0,5 | 6 | 0,1 | 0,37 | 0,4 | 6 | 4,12 | 0,12 | 0,4 |
| Cotes calcaires est | 10 | 24 | 1,94 | 0,34 | 0,8 | 24 | 0,59 | 0,58 | 0,8 | 24 | 4,25 | -0,14 | 0 | 24 | 0,4 | 0,25 | 0,6 | 24 | 0,1 | 0,27 | 0,4 | 24 | 4,74 | 0,09 | 0,1 |
| Depôts argilo-sableux | 20 | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Depressions sédimentaires | 17 | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Grands causses | 19 | 7 | 1,77 | 0,44 | 0,9 | 7 | 0,62 | 0,71 | 0,9 | 7 | 59,88 | -0,43 | 0,7 | 7 | 0,6 | 0,25 | 0,8 | 7 | 0,2 | 0,1 | 0,2 | 7 | 3,34 | 0,2 | 0,9 |
| Guadeloupe | 971 | 11 | 10,5 | 0,31 | 0,8 | 11 | 26 | 0,14 | 0,2 | 11 | 30,5 | -0,16 | 0,1 | 11 | 3,3 | -0,12 | 0,3 | 11 | 0,1 | 0,51 | 0,3 | 11 | 3,22 | 0,43 | 0,8 |
| Guyane | 973 | 25 | 3,63 | 0,35 | 0,9 | 25 | 1,74 | 0,6 | 0,9 | 25 | 6,76 | -0,55 | 0,5 | 25 | 0,7 | 0,24 | 0,7 | 25 | 0,1 | 0,25 | 0,4 | 25 | 5,11 | 0,1 | 0,2 |
| Jura-Préalpes du nord | 5 | 37 | 2,86 | 0,41 | 0,7 | 37 | 1,41 | 0,61 | 0,8 | 36 | 72,24 | -0,53 | 0,4 | 37 | 0,7 | 0,21 | 0,7 | 37 | 0,1 | 0,26 | 0,3 | 37 | 3,96 | 0,2 | 0,5 |
| La Réunion | 974 | 8 | 10,9 | 0,29 | 0,6 | 8 | 11,2 | 0,45 | 0,6 | 8 | 16,68 | 0,03 | 0 | 8 | 1,7 | 0,14 | 0,3 | 8 | 0,4 | -0,16 | 0,1 | 8 | 6,82 | 0,15 | 0,3 |
| Landes | 13 | 18 | 1,18 | 0,43 | 0,8 | 18 | 0,37 | 0,72 | 0,7 | 18 | 3,69 | -0,25 | 0,2 | 18 | 0,5 | 0,25 | 0,4 | 18 | 0,1 | 0,06 | 0 | 18 | 2,35 | 0,18 | 0,3 |
| Martinique | 972 | 10 | 9,08 | 0,37 | 0,8 | 10 | 12,8 | 0,39 | 0,8 | 10 | 83 | -0,44 | 0,6 | 10 | 2 | 0,04 | 0,1 | 10 | 0,1 | 0,56 | 0,6 | 10 | 4,41 | 0,35 | 0,6 |
| Massif central nord | 21 | 56 | 1,86 | 0,38 | 0,9 | 56 | 0,59 | 0,63 | 0,9 | 56 | 23,58 | -0,4 | 0,3 | 56 | 0,5 | 0,22 | 0,6 | 56 | 0,1 | 0,24 | 0,4 | 56 | 3,65 | 0,16 | 0,4 |
| Massif central sud | 3 | 66 | 2,39 | 0,38 | 0,8 | 66 | 0,85 | 0,62 | 0,8 | 65 | 60,44 | -0,46 | 0,5 | 66 | 0,5 | 0,23 | 0,6 | 66 | 0,1 | 0,32 | 0,5 | 66 | 4,39 | 0,15 | 0,5 |
| Mayotte | 976 | 10 | 5,83 | 0,19 | 0,1 | 10 | 4,76 | 0,06 | 0 | 10 | 32,99 | -0,35 | 0,1 | 10 | 1,2 | -0,11 | 0,1 | 10 | 0,3 | -0,09 | 0 | 10 | 4,81 | 0,3 | 0,4 |
| Méditerranéen | 6 | 14 | 2,6 | 0,32 | 0,7 | 14 | 0,76 | 0,61 | 0,8 | 14 | 47,03 | -0,41 | 0,5 | 14 | 0,4 | 0,29 | 0,7 | 14 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 14 | 6,26 | 0,02 | 0 |
| Plaine Saône | 15 | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Préalpes du sud | 7 | 18 | 0,94 | 0,64 | 0,7 | 18 | 0,44 | 0,81 | 0,7 | 18 | 61,01 | -0,35 | 0,6 | 18 | 0,7 | 0,19 | 0,4 | 18 | 0 | 0,39 | 0,3 | 18 | 1,41 | 0,45 | 0,5 |
| Pyrénnées | 1 | 20 | 2,8 | 0,39 | 0,8 | 20 | 1,21 | 0,62 | 0,8 | 20 | 163,5 | -0,65 | 0,7 | 20 | 0,7 | 0,23 | 0,6 | 20 | 0,1 | 0,19 | 0,3 | 20 | 4,38 | 0,15 | 0,4 |
| Tables calcaires | 9 | 41 | 2,16 | 0,31 | 0,8 | 41 | 0,66 | 0,53 | 0,8 | 41 | 14,24 | -0,37 | 0,2 | 41 | 0,5 | 0,21 | 0,5 | 41 | 0,1 | 0,11 | 0,1 | 41 | 4,55 | 0,1 | 0,1 |
| Vosges | 4 | 20 | 3,17 | 0,29 | 0,5 | 20 | 1,55 | 0,38 | 0,5 | 20 | 213,1 | -1,06 | 0,6 | 20 | 0,7 | 0,09 | 0,2 | 20 | 0,1 | 0,3 | 0,4 | 20 | 4,22 | 0,21 | 0,5 |
| Montagnes volcaniques des DOM | 29 | 10,1 | 0,32 | 0,8 | 29 | 14,8 | 0,36 | 0,7 | 29 | 48,75 | -0,27 | 0,2 | 29 | 2,1 | 0,06 | 0,1 | 29 | 0,1 | 0,23 | 0,1 | 29 | 4,84 | 0,26 | 0,6 | |
| Rivières en tresses | 7 | 3,99 | 0,46 | 0,8 | 7 | 1,48 | 0,67 | 0,9 | 7 | 191,1 | -0,55 | 0,9 | 7 | 0,6 | 0,22 | 0,5 | 7 | 0 | 0,31 | 0,4 | 7 | 7,2 | 0,24 | 0,3 | |
| Pvalue | *** | ** | * | ns | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Tableau 3 : Modèles de référence hydromorphologiques Carhyce et valeurs des différents paramètres (Référentiel v2.0)

avec **L_{pb}** : Largeur à pleins bords, **S_{pb}** : Surface mouillée à pleins bords, **Pente** : Pente de la ligne d'eau, **H_{pb}** : Profondeur à pleins bords, **Prof_mouilles** : Profondeur des mouilles, **L/P** : Rapport Largeur (L_{pb})/ Profondeur (H_{pb})

Si l'on fait abstraction des régions ne comptant qu'un nombre réduit de références, on observe que les modèles non significatifs, basés sur la profondeur des mouilles, sont presque tous des modèles de régions montagneuses (HER ou modèles : Alpes internes, Guadeloupe, La Réunion, Préalpes du sud, Pyrénées, Rivières en Tresse, Montagnes volcaniques des DROM). On peut penser que, dans ces cas, les lits caractérisés par un transport grossier importants sont relativement plats et que les alternances « radier-mouille » y sont moins marquées.

Cela dit, comme le montre les deux exemples de la *Figure 10*, la pente des modèles « profondeur des mouille » et « rapport L/P », peu performants, reste généralement conforme aux modèles les plus robustes lorsque le nombre de références est suffisant. Les modèles indiquent donc bien une tendance du paramètre considéré en fonction de la taille du bassin versant (augmentation de la profondeur des mouilles et de rapport L/P avec la taille du bassin versant). La *Figure 11* présente la distribution des exposants b pour 5 des 6 paramètres considérés et confirme ce qui vient d'être énoncé. On voit en effet que les modèles « profondeur des mouilles » et « rapport L/P » ont des exposants qui varient assez peu respectivement autour de la valeur 0,25 et 0,18. Enfin, on voit sur la *Figure 12* que des modèles non significatifs permettent tout de même de discriminer les stations altérées des stations de référence (tel que pour l'HER « Méditerranée ») mais également que pour certaines HER avec des modèles significatifs, ces paramètres ne sont pas discriminants (tel que pour l'HER « Armoricain »). Pour d'autres HER telles que les Cévennes, les modèles sont bien significatifs et discriminants.

Ceci implique que, même considérés comme peu ou pas significatifs, ces modèles peuvent être utilisés pour évaluer l'état d'une station et intégré dans l'IMG. De nombreuses publications récentes appellent à utiliser le seuil de 0.05 (au-dessus duquel la relation est traditionnellement considérée comme non significative, c'est-à-dire qu'on ne peut pas affirmer statistiquement que la pente de la droite est différente de zéro) avec précaution, voire même à ne plus le considérer du tout (Amrhein *et al.*, 2017 ; 2019). Il est aujourd'hui largement admis (i) que la *p-value* devrait être plutôt lue comme une mesure continue, permettant de guider le jugement sur une conclusion scientifique sans le remplacer (Fraser et Reid, 2016); et (ii) que l'utilisation binaire du seuil de 0.05, devrait être abandonnée. Une *p-value* supérieure à ce seuil ne permet pas de conclure qu'il n'existe pas de relation mais seulement que les preuves statistiques ne sont pas suffisantes pour affirmer qu'elle existe. La *Figure 13* montre que, dans notre cas, la *p-value* est étroitement liée au nombre de stations de références utilisées pour construire les modèles. Pour ces raisons, nous considérons l'ensemble des modèles sans faire de sélection à partir de la *p-value*.

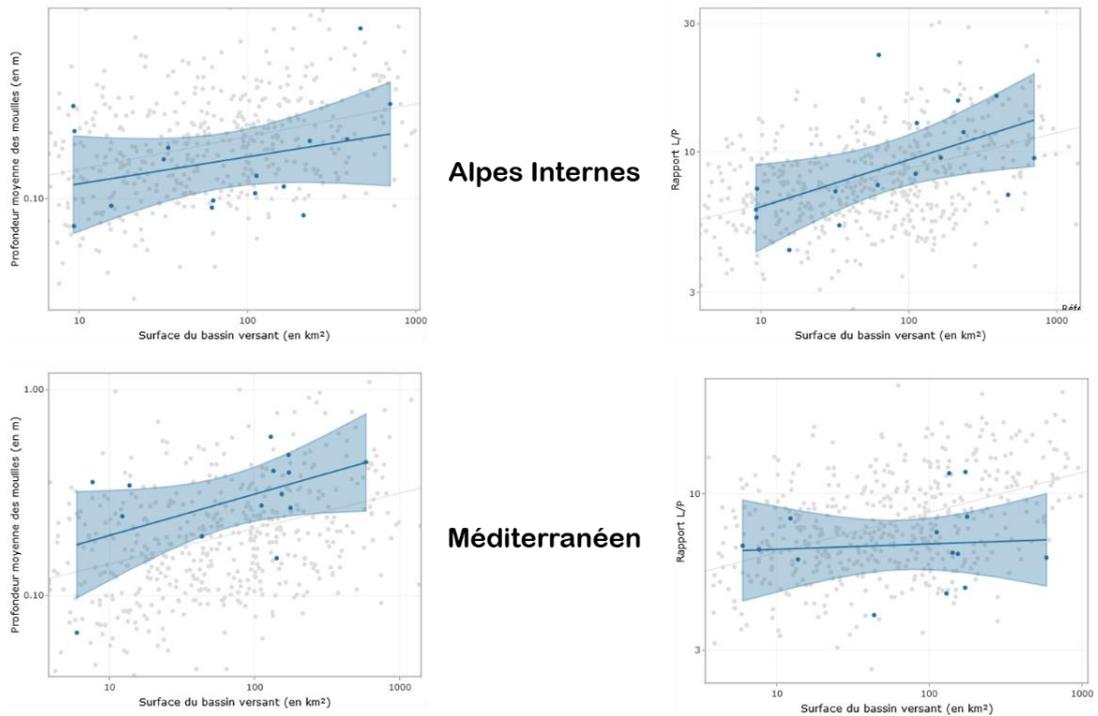


Figure 10 : Exemple de deux HER pour lesquelles les modèles « profondeur des mouilles » et « rapport L/P » ne sont pas significatifs (Référentiel v2.0)

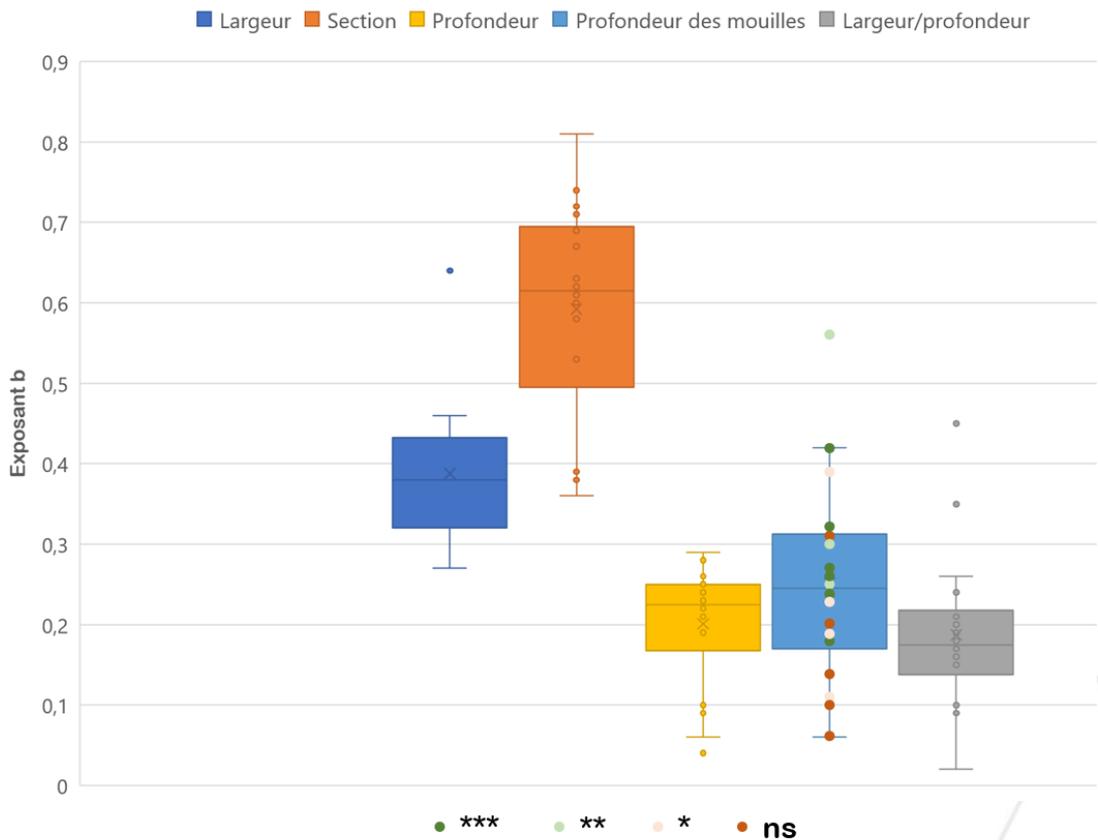


Figure 11 : Distribution des exposants b des relations $y=ax^b$ dans laquelle x est la taille du bassin versant et y est l'un des paramètres suivants : largeur, section mouillée ou profondeur maximum à pleins bords, profondeur des mouilles ou rapport L/P à pleins bords (Référentiel v2.0)

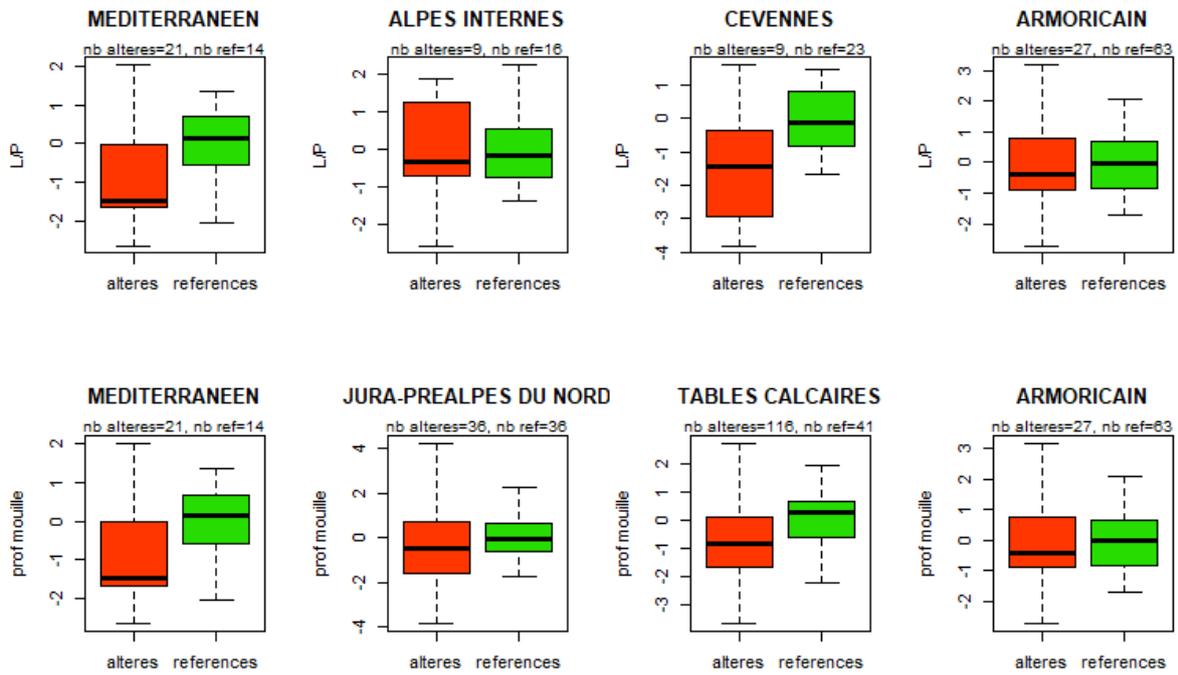


Figure 12 : Boite de dispersion des résidus standardisés pour deux variables (profondeur des mouilles et rapport L/P) pour plusieurs HER (Référentiel v2.0)

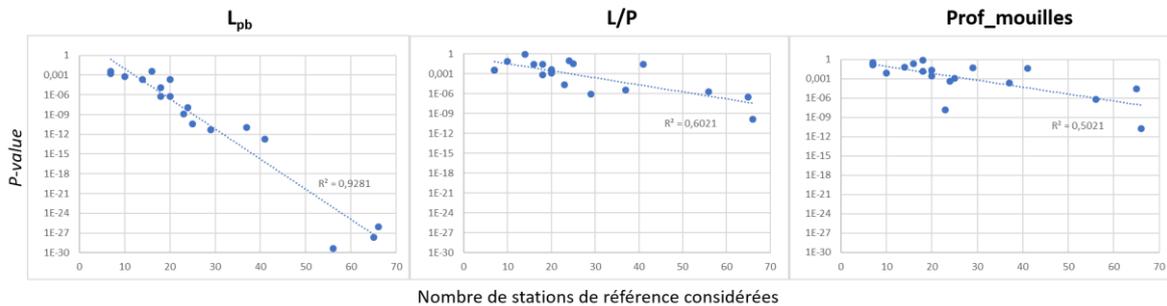


Figure 13 : Relations entre la p -value et le nombre de stations de références considérées dans la construction des modèles L_{pb} , L/P et profondeur des mouilles (Référentiel v2.0)

Pour illustrer cela, la *Figure 14* présente l'exemple de la station Carhyce de Villard-Sallet 2 dans l'HER « Alpes internes ». La rivière est à cet endroit visiblement très dégradée, suite à une rectification importante de son tracé. En 2016, la valeur de l'IMG y était assez élevée (> 8) alors que la rivière présente des largeurs et profondeurs plutôt conformes aux modèles régionaux. Dans ce cas, c'est bien la profondeur des mouilles et la pente, beaucoup plus faibles qu'attendu par les modèles, qui dégrade la valeur de l'IMG. On voit d'ailleurs très bien sur la photo que la rivière a un lit très plat, plus proche d'un fossé de drainage qu'un cours d'eau.

Cette discussion autour de la significativité des modèles, renforce l'idée que les résultats de l'IMG doivent toujours être analysés à la lumière des modèles sur lesquels ils reposent. Dans ce cas précis, on peut voir que la plus grande dispersion des points autour du modèle impliquera une moindre sensibilité du paramètre considéré.

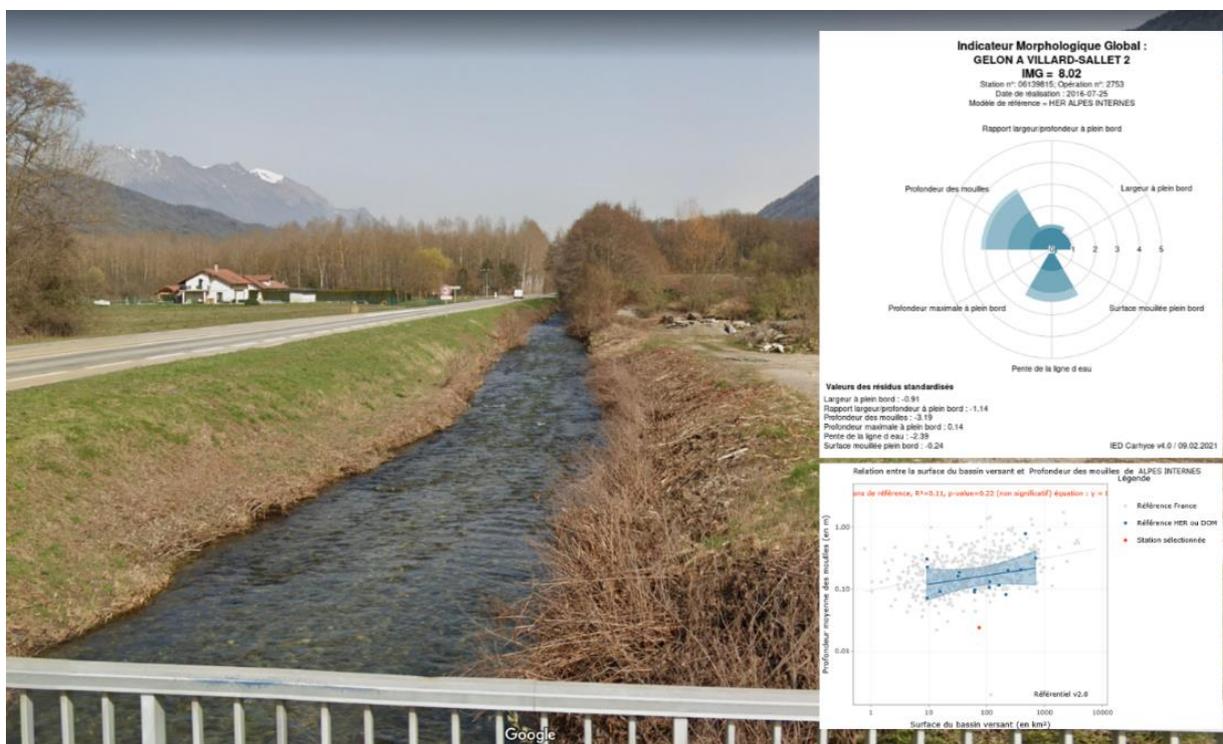


Figure 14 : Station Carhyce de Villard Sallet 2 dans l'HER « Alpes Internes » et présentant une valeur d'IMG supérieure à 8 essentiellement due à une faible profondeur des mouilles et une faible pente (photo : Google streetview 2021)

II.4.2 Cas des HER sans modèle disponible

Pour les HER sans modèles ou sans modèles suffisamment robustes, la création de modèles regroupant les références de plusieurs HER ou des références des plusieurs HER présentant des caractéristiques semblables (ex. rivières en tresse) est proposée. Pour les îles de La Réunion, de la Martinique et de la Guadeloupe, un modèle des montagnes volcaniques des DOM qui regroupe les stations présentant peu ou pas de perturbations anthropiques est déjà disponible sur l'IED (Tamisier *et al.*, 2017b). Pour la métropole, trois nouveaux modèles transrégionaux ont été créés et seront ajoutés à l'IED lors d'une prochaine mise à jour (Figure 15 et Tableau 4):

1. un modèle pour les rivières appartenant à un système de « Plaine ou Collinéen détritique ». Il regroupe les HER « Landes », « Dépôts argilo-sableux », « Dépressions sédimentaires » et « Coteaux Aquitains », c'est-à-dire des régions de plaine ou de reliefs peu marqués présentant un climat océanique tempéré ou méridional et une géologie détritique. Ce sont des rivières peu larges mais assez profondes et de pentes moyennes à faibles ;
2. un modèle pour les rivières appartenant à un système de « Plaine ou Collinéen calcaire ». Il regroupe les HER « Tables calcaires » et « Causses aquitains ». C'est deux régions sont caractérisées par un substrat calcaire, des pentes plutôt faibles et un climat océanique tempéré ou méridional. Les rivières y sont peu larges et relativement peu profondes car les écoulements y sont très contrôlés par les nappes ;
3. un modèle pour les rivières appartenant à un système « Collinéen est ». Il regroupe les HER « Ardennes » et « Côtes calcaires est ». C'est-à-dire des régions marquées par un relief collinéen et un climat océanique tempéré. Le substrat est soit calcaire, soit cristallin.

Ces modèles sont, pour la plupart des paramètres considérés, significatifs et présentent souvent des très bonnes relations. Grâce à ces nouveaux modèles interrégionaux, les modèles d'évaluation Carhyce peuvent être utilisés sur la quasi-totalité du territoire national. Seule l'Alsace n'a pu être associée à aucune autre HER. C'est une région très petite et très différente des autres HER tant par son climat continental que par la géomorphologie de ses bassins.

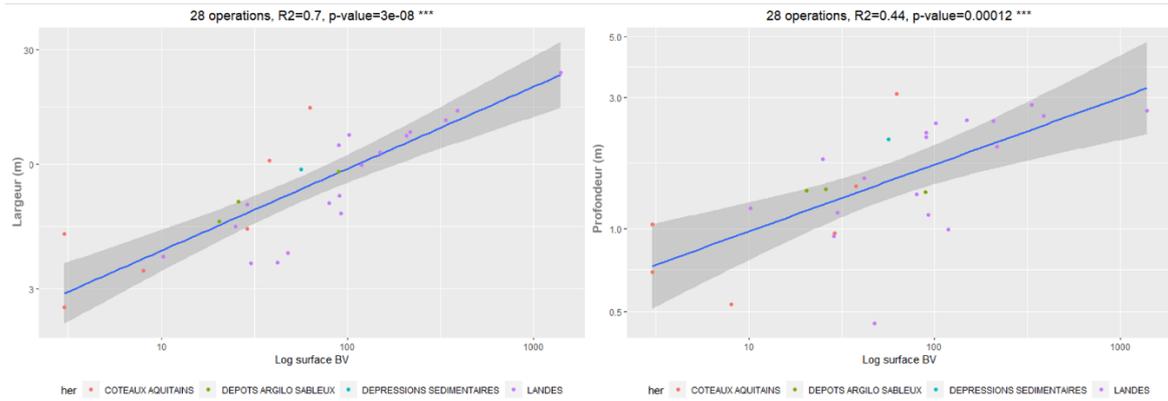
| | nb ref | Lpb | | | Spb | | | Pente | | | Hpb | | | Prof_mouilles | | | L/P | | |
|--|--------|------|------|----------------|------|------|----------------|-------|------|----------------|------|-------|----------------|---------------|------|----------------|------|------|----------------|
| | | a | b | R ² | a | b | R ² | a | b | R ² | a | b | R ² | a | b | R ² | a | b | R ² |
| Plaine/collinéen détritique HER : 13, 14, 17, 20 | 28 | 1.96 | 0.34 | 0.7 | 21.9 | 0.56 | 0.12 | 0.05 | 0.01 | 0.24 | 0.44 | -0.58 | 0.54 | 0.67 | 0.62 | 0.69 | 3.58 | 0.1 | 0.16 |
| Plaine/collinéen calcaire HER : 9, 11 | 47 | 2.29 | 0.3 | 0.7 | 16.6 | 0.52 | 0.1 | 0.14 | 0.21 | 0.2 | 0.52 | -0.4 | 0.33 | 0.76 | 0.51 | 0.72 | 4.55 | 0.1 | 0.15 |
| Collinéen est HER : 10, 22 | 28 | 2.3 | 0.3 | 0.78 | 9.49 | 0.36 | 0.07 | 0.26 | 0.31 | 0.28 | 0.68 | -0.28 | 0.11 | 0.56 | 0.58 | 0.8 | 6.75 | 0.02 | 0.01 |

Tableau 4 : Paramètres des modèles de référence hydromorphologiques interrégionaux

(la *p-value* est représentée par la couleur. Vert : ***, vert clair : **, rouge clair : *, rouge foncé : ns)
(Référentiel v2.0)

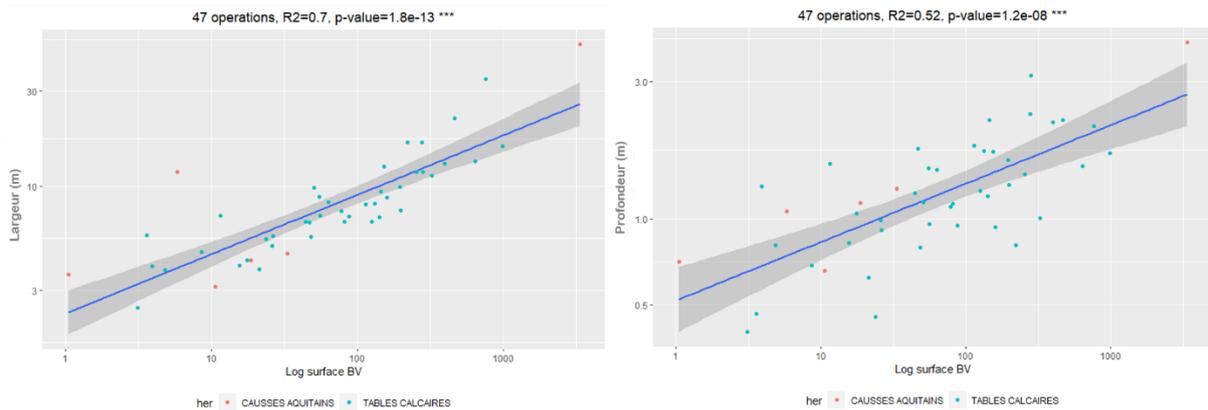
Plaine/collinéen détritique

- Landes (plaine/détritique/océanique méridional)
- Dépôts argilo-sableux (plaine/détritique/océanique tempéré)
- Dépressions sédimentaires (plaine/détritique/océanique méridional)
- Côteaux aquitains (relief peu marqué/détritique/océanique méridional)



Plaine/collinéen calcaire

- Tables calcaires (plaine/calcaire-sédimentaire/océanique tempéré)
- Causse aquitains (relief peu marqué /détritique/océanique méridional)



Collinéen est

- Ardenne (relief peu marqué /roche métamorphique/océanique tempéré)
- Côtes calcaire est (relief peu marqué /calcaire sédimentaire/océanique tempéré)

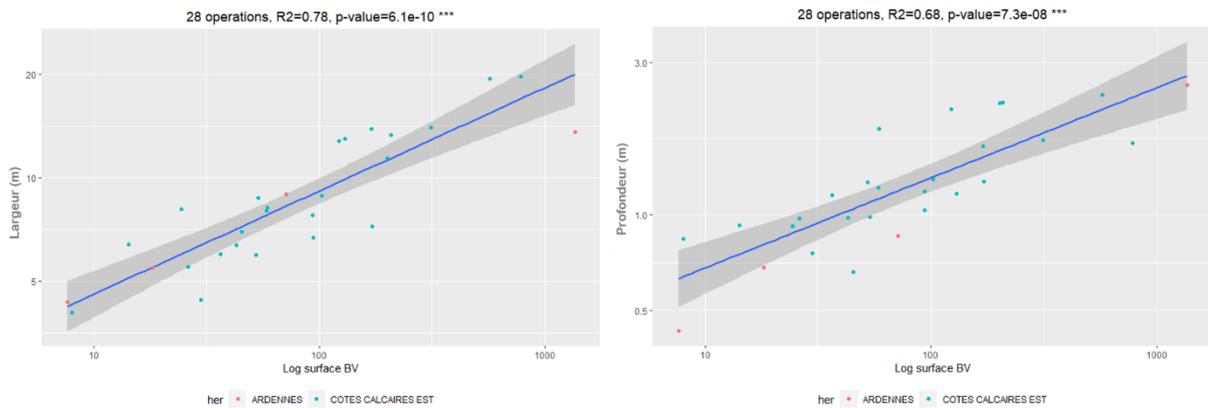


Figure 15 : Modèles *largeur* et *profondeur* à pleins bords inter-régionaux intégrant les HER sans modèles

II.4.3 Création de modèles de référence hydromorphologiques pour la Guyane

- i. Rappel du contexte exposé dans le précédent rapport pour la Caractérisation hydromorphologique des cours d'eau français d'Outre-mer – Projet Carhyce (adapté de Tamisier et al., 2017b)

Localisation

La Guyane, située au nord-est de l'Amérique du Sud entre 2° et 6° de latitude Nord, a une superficie de 84 000 km². Les deux principaux fleuves marquent ses limites longitudinales : à l'ouest le Maroni qui marque la frontière avec le Suriname et à l'est, l'Oyapoc qui marque la frontière orientale avec le Brésil.

| DOM | Localisation | Unité géographique | Superficie émergée (Km ²) | Altitude maximum (m) | Saison | | Pluviométrie moyenne (mm/an) |
|--------|-----------------|---------------------|---------------------------------------|----------------------|------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| | | | | | sèche | humide | |
| Guyane | Amérique du Sud | Plateau des Guyanes | 84000 | 851 | août - novembre + mars | novembre - février + avril - août | 1700 - 3800 |

Tableau 5 : Principales caractéristiques de la Guyane

Climat

Le climat guyanais est soumis aux déplacements de la zone inter-tropicale de convergence (ZIC) qui engendre à chacun de ces passages une saison des pluies (la première à la mi-décembre et la seconde à la mi-juillet). La ZIC est en fait la zone de rencontre entre l'air équatorial chargé d'humidité et l'air polaire du nord et/ou du sud plus froid, plus instable et chargé d'humidité. Leur rencontre aboutit à la déstabilisation des masses d'air équatoriales et engendre des précipitations. Ces deux saisons humides sont séparées par le petit été de Mars qui correspond au moment où la ZIC est au sud de la Guyane (Tableau 5). Si cette période entraîne une diminution des précipitations, ce petit été de Mars est irrégulier et n'a pas toujours d'influence sur les débits. Ceci étant particulièrement le cas pour les grands fleuves, sur lesquels le phénomène est lissé par la taille du bassin versant. Il existe par ailleurs un gradient spatial de précipitation bien marqué : les précipitations décroissent du nord-est vers le sud-ouest.

Géologie et Relief

D'un point de vue géologique, la Guyane appartient à un vaste ensemble d'âge précambrien appelé bouclier des Guyanes, et centré sur les trois « anciennes Guyanes » coloniales. Ce bouclier est principalement constitué de roches formées au cours de l'orogénèse transamazonienne avec des processus magmatiques, tectoniques et métamorphiques datés entre 2260 et 1950 Ma. Le bouclier des Guyanes a évolué depuis cette orogénèse transamazonienne mais les épisodes géologiques ultérieurs ne se sont limités qu'à des fracturations continentales datant du Paléozoïque et du Mésozoïque.

On peut distinguer quatre principales unités morpho-structurales à travers le département :

- (1) Il s'agit des terrains de la zone côtière qui sont constitués par une succession de dépôts liés à l'envasement des estuaires et qui forment des terrains argileux et argilo-sableux ;
- (2) La chaîne septentrionale est composée d'anciens terrains schisteux érodés dont les restes forment des collines et de petits chaînons (la montagne de Fer, de Kaw, des Trois Pitons) ;
- (3) Le « Massif Central Guyanais » qui constitue une vaste pénéplaine granitique sur laquelle subsistent quelques restes d'anciennes roches volcaniques (roche verte des inselbergs) et des massifs dioritiques ;
- (4) La pénéplaine méridionale, l'espace le plus vaste, est une zone qui ne comporte que de faibles reliefs mis à part les Mont Tumuc-Humac où prennent naissance les principaux fleuves guyanais.

Il faut enfin noter que la couverture végétale protège les sols qui, sous l'effet de l'humidité et des températures élevées, se décomposent rapidement : fendillement des granites et des dolérites, formation d'une cuirasse latéritique dans les parties drainées accompagné d'argiles et d'arènes.

Hydrographie et morphologie

Le réseau hydrographique de Guyane est caractérisé par son extrême densité qui s'explique par l'abondance des précipitations et les faibles pentes que son relief présente. Les bassins versants sont souvent assez allongés et leurs limites sont imprécises du fait du faible relief. Ce réseau comprend des cours d'eau de dimension très variables. Les plus grands cours d'eau, Le Maroni et L'Oyapock, ont respectivement des bassins versants de 65830 km² et de 26820 km². C'est essentiellement la taille des bassins versants qui va conditionner le fonctionnement et le style fluvial des cours d'eau. Les profils en longs des principaux fleuves de Guyane ont atteint leur équilibre depuis longtemps et s'écoulent tous vers le Nord présentant une ramification en éventail. Sur les grands cours d'eau, la tendance à développer de multiples chenaux est fréquente et ils présentent donc de nombreux tronçons en anastomose. Ces cours d'eau sont également très souvent marqués par la présence de seuils de roche dure. Plus de 70 % du réseau hydrographique est composé de petits cours d'eau. Ces derniers drainent parfois des zones de relief plus marqué et présentent des profils plus pentus. Leur morphologie présente alors les facies caractéristiques des cours d'eau de montagne.

Hydrologie et transport solide

Les éléments majeurs qui caractérisent le régime hydrologique des cours d'eau de Guyane sont :

- la durée des précipitations et leur intensité
- la superficie du bassin versant en amont du point de jaugeage
- la forme générale du bassin (allongé / ramassé)

En fonction de la taille des bassins versants, le temps de réponse et le temps de redescente de crue sera différent. Les petits bassins réagissent très rapidement et les grands bassins sont affectés par un fort effet lié à la charge et à la décharge des bassins amont, ce qui va lisser les événements marginaux de début et de fin de saison des pluies. On peut donc distinguer différentes tailles de cours d'eau qui auront des fonctionnements hydrologiques différents (Hiez et Dubreuil, 1963 ; Monfort et Ruf, 2005).

- **Les crues**

La période où les débits mensuels sont les plus importants correspond généralement à la deuxième saison des pluies, durant le mois de mai (*Figure 16*). Un second pic peut également apparaître plus tôt dans l'année, il correspond alors à la première saison des pluies. Ceci particulièrement sur les petits bassins qui ont une réponse rapide aux précipitations. Sur les petits bassins versants, chaque précipitation peut entraîner une crue et peut survenir tout au long de la saison des pluies.

- **Les étiages**

Sur les grands fleuves, le tarissement commence à se manifester généralement au mois d'août, et se poursuit pour atteindre son maximum durant les mois d'octobre-novembre (*Figure 16*). Dans les petits bassins, du fait de la réponse hydrologique plus rapide, les débits d'étiages arrivent plus tôt.

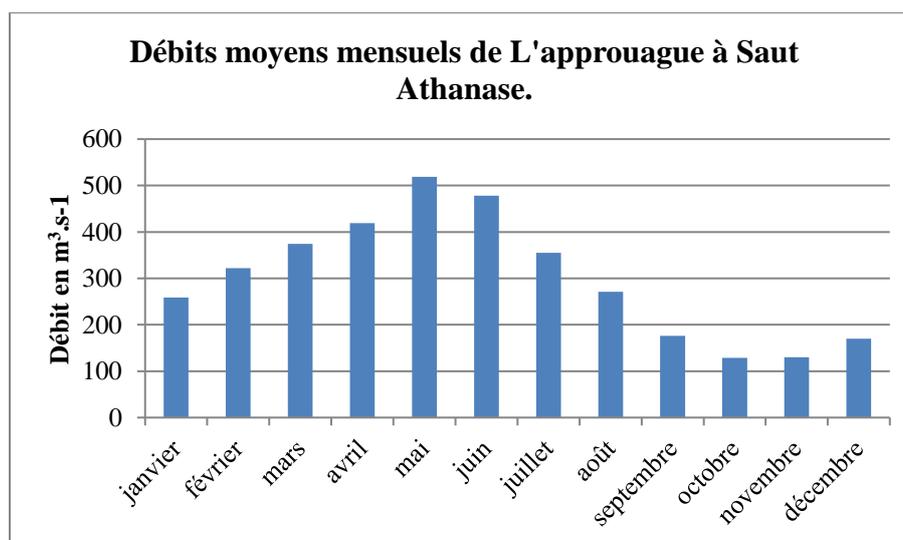


Figure 16 : Débits moyen mensuels de L'Approuague à Saut Athanase (données calculées sur la période 1991 – 2003 ; Montfort et Ruf, 2005)

- Le transport solide

Peu d'études se sont intéressées au transport solide dans les cours d'eau guyanais et concernent essentiellement la charge en suspension dans les plus grands fleuves (Sondag *et al.*, 2010) et dans les petits bassins (Fritsch et Sarrailh, 1986). La charge en suspension transportée par les deux principaux fleuves de Guyane est extrêmement faible et se situe parmi les valeurs les plus faibles enregistrées dans le monde. Il existe une variabilité saisonnière de cette charge en MES plus importante que celle des débits. Il ne semble toutefois pas y avoir de relation simple entre ces deux paramètres (Sondag *et al.*, 2010). Les taux d'érosion mécanique et les valeurs de charriage sont extrêmement faibles dans les petits bassins non perturbés (Roche, 1978 ; Fritsch et Sarrailh, 1986). Dans ces petits systèmes, le transport solide est relativement régulier au cours de l'année et la contribution des crues est modérée. Il a été montré que dans ce type de bassin, 40 % du transport solide en suspension s'effectue en phase de crue et 60 % dans des gammes de débit inférieures (Fritsch et Sarrailh, 1986).

L'activité d'orpaillage (adapté de Tamisier *et al.*, 2017b ; et de Kreutzenberger *et al.*, 2019)

En Guyane, les divers processus d'orogénèse ont contribué à entraîner différents métaux à la surface, dont l'or, en différents types de gisements. Les gisements guyanais « primaires » et « secondaires » reposent sur l'intrusion de roches éruptives et volcaniques ainsi que la formation de roches sédimentaires brutes, altérées ou remaniées, au sein d'un socle composé de roches antécambriennes (Bache, 1982 ; Orru, 1995, 2001). L'ensemble est soumis à l'érosion mécanique et à l'altération chimique, cette dernière étant particulièrement prononcée en milieu tropical humide.

On peut alors retrouver des filons aurifères dans la roche non altérée, ainsi que dans les couches d'altérite riche en argiles (par exemple, sous la cuirasse latéritique et au sein des niveaux argileux, dans la zone d'altération). Pour les gisements secondaires, ils proviennent de la destruction progressive des gisements primaires sous l'action de l'érosion. Les roches sont altérées jusqu'à leur destruction et les débris, entraînés par gravité, vont rejoindre le point le plus bas du relief. Lorsqu'ils sont stoppés par un obstacle dans leur descente, ils s'accumulent et forment un gisement éluvionnaire à flanc de colline. Ils peuvent également avoir été transportés dans les vallées. Ils ont été ainsi déposés sur la terrasse alluviale actuellement non inondable (nommée « flat »), ou dans les lits majeur et mineur actuels des cours d'eau. Dans ce dernier cas, on parle de gisements alluvionnaires (Orru, 2001).

L'activité d'orpillage alluvionnaire est la pression majeure susceptible d'impacter les cours d'eau guyanais. Elle peut avoir plusieurs types de conséquences sur les cours d'eau (*Figure 17, Figure 18, et Figure 19*). Parmi les facteurs d'impacts relatifs à l'exploitation de l'or, notons principalement (*adapté de Thomassin et al., 2017 dans Kreuzenberger et al., 2019*) :

- la destruction totale du milieu naturel sur les sites d'exploitation eux-mêmes : désorganisation et brassage des différents horizons du sol, remaniement des lits (rectification, chenalisation, mise hors thalweg, etc.) et linéaires de rivières comme des plaines alluviales, destruction de la forêt et des ripisylves, accroissement des pressions sur les interactions pour la flore et la faune dans l'espace environnant (compétition, prédation, coopération, parasitisme etc.) ;
- la déforestation et les créations de pistes d'accès, qui outre la destruction directe des habitats et de la continuité forestière, ouvrent à une possible érosion des sols et à l'accroissement du ruissellement ; entraînant par voie de conséquence une altération du comportement hydrologique et de la stabilité naturels du fonctionnement des rivières (notamment érosion des berges) ;
- la mobilisation ou la remobilisation de mercure² et/ou d'autres métaux lourds naturels (zinc, cuivre, fer, aluminium,...), potentiellement toxiques (arsenic), ou intégré au système d'exploitation pour d'anciens sites, impactant tous les compartiments de l'écosystème, depuis les sols et les sédiments, l'eau et toute la chaîne trophique aquatique ; occasionnant par ailleurs un risque sanitaire sur les populations humaines vivant dans ces régions et se nourrissant de poisson (Guedron, 2008) ;
- l'augmentation de la turbidité des cours d'eau (la limite réglementaire est fixée à 35 mg/l ; SDOM, 2011, se basant sur la réglementation ICPE) au droit ou en aval des sites, du fait de la charge en matières en suspension (MES) importante, engendrant potentiellement des dépôts sur les berges et dans le lit, voire le colmatage des lits, la diffusion/rétention de polluants, ce qui peut entraîner l'appauvrissement voire l'élimination d'une grande partie de la flore et de la faune.

² Les sols guyanais (région tropicale humide) sont naturellement riches en mercure (Charlet *et al.*, 2003 ; Laperche *et al.*, 2007) et contiennent une concentration naturellement dix fois supérieure aux sols des régions tempérées ou boréales (Roulet et Lucotte, 1995 ; Grimaldi *et al.*, 2001).



Figure 17 : Impacts directs et indirects de l'activité d'orpaillage avec A. Destruction du lit du cours d'eau et du corridor riverain ; B. Mise en place des voies de communication pour l'accès au site ; C. Panache turbide liée à l'activité minière sur un site à l'amont (DEAL Guyane)

Cette activité minière, qui se localise dans une large zone au centre du département (*Figure 18*), transforme irréversiblement le paysage riverain et modifie le relief et l'accessibilité des zones soumises à l'exploitation. Selon Laperche *et al.* (2008), il apparaît difficile voire illusoire de revenir à l'état initial non perturbé.

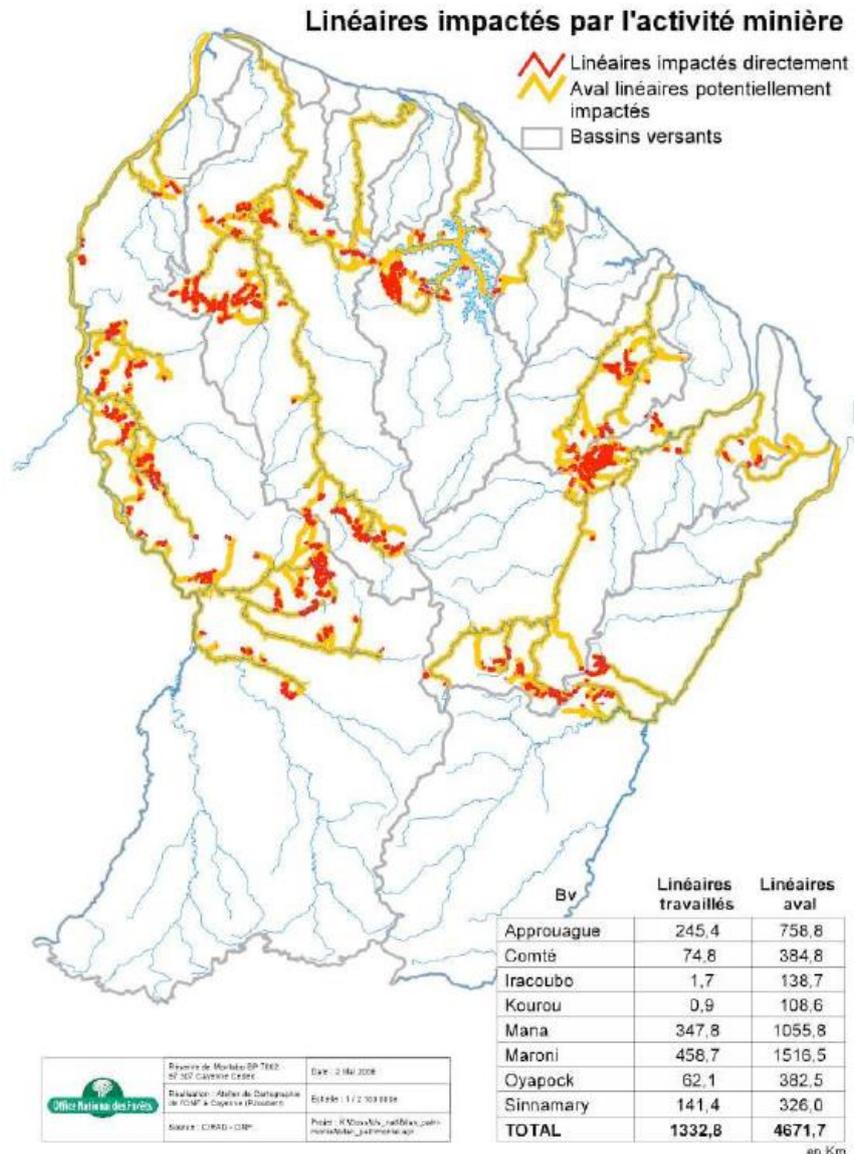


Figure 18 : Surfaces travaillées par l'activité minière en 2006 et linéaires impactés par cette activité (Laperche *et al.*, 2008)

L'exemple en *Figure 19* et l'argumentaire tirés de l'expertise terrain menée par Kreutzenberger *et al.* en 2019 pour les besoins d'accompagnement à la réhabilitation des sites d'orpaillage guyanais illustrent le propos et certains enjeux :

[Sur ce site exemple, il est] difficile de déterminer le positionnement original de la crique au vu des conditions du site. La crique remaniée, par ailleurs localement maintenue dans le canal de dérivation, présente une forte pente et des berges généralement abruptes. Elle traverse pour partie le site en son centre mais est, dans certains secteurs, décalée en bordure de forêt, créant des flats plus ou moins stagnants et une mortalité du cortège forestier par ennoïement.

Sur la [Figure 19.B], on constate un début d'érosion de berges, dans l'extérieur du méandre, avec érosion marquée du pied de berge ayant pour risque, à terme, la capture physique de la barranque³ adjacente. Ceci entraînerait le piégeage de la charge solide transportée par le cours d'eau avec un risque direct sur l'évolution morphologique du cours d'eau et indirect pour la route nationale qui le borde un peu plus à l'aval. Le constat d'érosion du lit aperçu sur la [Figure 19.A] amène également à signaler un risque de capture des eaux de la barranque lors de l'abaissement du lit fluvial. [En vue d'une réhabilitation], on note de fortes modifications de la topographie en regard du contexte naturel, un manque d'andains et un manque de matériaux susceptibles d'être remobilisés pour la recréation d'un horizon humifère utile à la revégétalisation.



Figure 19 : Un flat alluvionnaire guyanais non réhabilité, visité en juin 2019 (K. Kreutzenberger)

³ Fosse d'exploitation au fond de laquelle la couche d'argile minéralisée sera mise en suspension à l'aide de lances monitor. À la fin de l'exploitation d'une barranque, celle-ci sert de bassin de décantation des eaux turbides de l'exploitation de la barranque voisine.

ii. Le programme de consolidation des modèles d'évaluation Carhyce pour le calcul de l'Indicateur morphologique global en Guyane

La construction des modèles Carhyce montrait jusqu'ici que la Guyane présentait trop de peu de stations échantillonnées et notamment de références (en absolu ou compte tenu de la diversité naturelle du territoire) pour atteindre une bonne à très bonne significativité statistique pour une ou plusieurs relations de géométrie hydraulique (Tamisier *et al.*, 2017b). C'est dans ce contexte qu'a été établi l'intérêt de mise en œuvre d'un programme de consolidation des modèles d'évaluation Carhyce, adapté aux spécificités guyanaises. Ce programme s'est concrétisé en 2019 par une mission conjointe menée par la Fédération départementale pour la pêche et la protection des milieux aquatiques du Doubs et les bureaux d'études Téléos et ONIKHA ; mission par ailleurs coordonnée et financée par l'Office français de la biodiversité, l'office de l'eau et la DEAL de Guyane.

Sur le périmètre, le réseau hydrographique de Guyane comprend des cours d'eau de dimension très variables mais à plus de 70 % composés de petits cours d'eau. Comme pour tout autre territoire, la taille des bassins versants, variable, y est un facteur important conditionnant le fonctionnement et le style fluvial des cours d'eau. Or, si l'on ne tient compte que des cours d'eau sur lesquels le protocole de terrain Carhyce a été appliqué (10 stations entre 2014 et 2015), il s'agit généralement de petits cours d'eau à petits bassins versants (< 15-20km²) (parmi les 70% du réseau recouvrant le territoire donc) et toujours dans les mêmes spécificités. Ce manque de variabilités dans les données rend peu fiable la construction de modèles statistiques (et donc d'indicateurs) représentatifs du fonctionnement hydromorphologique des cours d'eau guyanais.

La mission menée en 2019 s'est donc concentrée à échantillonner des tailles de bassins versants plus importantes (dans la gamme des 20 à 100km²) ; visant au moins 15 stations en plus des 10 déjà collectées entre 2014 et 2015, exclusivement des références, en respectant les prescriptions du protocole et la définition même d'une référence (Tamisier *et al.*, 2017a, b).

En effectif comme en longueur de linéaire hydrographique, les ruisseaux à énergie faible ou modérée dans des pentes inférieures à 6% représentent 90 à 95% des cours d'eau rencontrés en Guyane, pour des rangs de Strahler 0-3, d'après le référentiel hydromorphologique ultramarin (Asconit Consultants – Dynamique Hydro – Hydreco, 2014). Les 5 autres % sont pour l'essentiel des ravines, quelques rivières à fond de vallée modéré à large (réparties à l'équilibre entre fonds rocheux et rivières alluviales), ainsi que quelques grands cours d'eau. D'un point de vue typologique, la mission de 2019 a donc visé, pour cette quinzaine de stations, des cours d'eau alluviaux de rang réduit.

Le plan et quelques caractéristiques des stations de Guyane échantillonnées avec le protocole Carhyce, entre 2014 et 2019, est présenté dans le *Tableau 6*.

| Localisation des stations de mesure | Code station | Surface BV (km ²) | Pente ligne d'eau (‰) | D ₅₀ (mm) | Largeur (m) | Profondeur (m) | Référence |
|---|--------------|-------------------------------|-----------------------|----------------------|-------------|----------------|-----------|
| Crique Matiti | 9131004 | 5,9 | 3,7 | 12,3 | 6,1 | 1,6 | Oui |
| Crique à l'Est | 9230206 | 6,8 | 3,8 | 23,0 | 5,7 | 1,1 | Oui |
| Crique Calebasse | 9231509 | 4,2 | 3,8 | NA | 6,2 | 1,0 | Oui |
| Crique Petit | 9110503 | 4,4 | 2,0 | NA | 7,4 | 1,1 | Oui |
| Crique Affluent Bois Bandé | 9221210 | 7,6 | 2,9 | 27,0 | 6,6 | 1,1 | Oui |
| Crique Kapiri | 9231511 | 5,2 | 1,6 | 11,0 | 7,1 | 0,8 | Oui |
| Crique Nouvelle France | 9230114 | 6,5 | 0,4 | NA | 9,9 | 1,6 | Non |
| Crique Bastien | 9120115 | 5,3 | 3,6 | 21,0 | 7,3 | 1,8 | Oui |
| Crique Toussaint | 9140707 | 55,2 | 0,5 | NA | 16,6 | 2,5 | Oui |
| Crique Cacao | 9121208 | 7,2 | 6,6 | 10,0 | 6,8 | 0,8 | Oui |
| Crique Petit-Laussat aval | 9230208 | 6,2 | 2,1 | NA | 8,1 | 1,0 | Oui |
| Crique Grillon | 9241209 | 13,0 | 3,8 | 7,0 | 12,9 | 1,6 | Non |
| Criques Petit Laussat | 9230203 | 54,3 | 0,5 | 2,0 | 13,0 | 1,8 | Oui |
| Crique Voltaire Amont pont Camp Voltaire | 9210101 | 87,8 | 1,2 | 2,0 | 16,2 | 2,2 | Oui |
| Crique Manaré Amont pont piste Mataroni | 9241503 | 135,0 | 1,8 | 0,5 | 28,2 | 2,4 | Oui |
| Portal Amont pont route Paul Isnard | 9240202 | 113,2 | 0,5 | 6,0 | 16,9 | 2,8 | Oui |
| Affluent à l'amont de la confluence avec le grand Laussat | 9230201 | 15,2 | 1,3 | 3,0 | 9,3 | 1,6 | Oui |
| Crique petit Laussat | 9210201 | 34,6 | 0,8 | 3,5 | 10,3 | 1,7 | Oui |
| Crique Organabo | 9140401 | 70,1 | 0,5 | NA | 10,7 | 2,0 | Oui |
| Crique Deux Flots Amont pont de la piste | 9240501 | 84,0 | 1,3 | 0,5 | 18,4 | 2,4 | Oui |
| Crique Balata Amont pont piste Balata | 9210901 | 33,7 | 1,2 | 0,5 | 10,8 | 1,9 | Oui |
| Affluent Kapiri (RD) Amont confluence Crique | 9231501 | 70,4 | 0,2 | 0,5 | 18,2 | 1,8 | Oui |
| Crique Païra Amont confluence rivière Kourouaï | 9241502 | 61,7 | 0,3 | 0,5 | 21,2 | 2,1 | Oui |
| Crique Christophe | 9241501 | 56,0 | 0,8 | 0,5 | 14,5 | 1,6 | Oui |
| Crique Maurice | 9240201 | 91,1 | 0,9 | 19,0 | 17,5 | 2,2 | Oui |
| Crique Sainte-Anne Amont pont RN1 | 9230202 | 23,4 | 0,3 | NA | 9,5 | 1,8 | Oui |
| Affluent Kapiri | 9231519 | 37,3 | 0,7 | 0,5 | 15,6 | 1,5 | Oui |

Tableau 6 : Plan et quelques caractéristiques des stations de Guyane échantillonnées avec le protocole Carhyce entre 2014 et 2019

iii. Les résultats acquis

La dernière version de l'IED intègre les modèles de référence hydromorphologiques Carhyce pour la Guyane, consolidés par les nouvelles acquisitions réalisées en 2019 selon des modalités bien définies (*Figure 20* et [annexe VI.3](#)). Malgré les difficultés du terrain et les spécificités de ce territoire, notamment lié au rôle très important joué par la forêt, les modèles obtenus sont de très bonne qualité. Bien qu'en milieu tropical, ils présentent des lits sensiblement plus petits (moins larges et moins profonds) qu'à la Martinique et à la Guadeloupe. Ils ont par ailleurs des pentes très faibles (médiane = 1,2‰) et un substrat très fin (médiane = 3,25 mm).

Avec désormais 25 stations de référence, ils montrent une amélioration nette des relations et des R^2 très significatifs et supérieurs à 0.7 à la fois pour les largeurs et les profondeurs (i-e à pleins bords). Ces modèles de référence offrent une excellente base pour l'évaluation et le diagnostic en appui des gestionnaires, notamment dans le cadre de l'évaluation des impacts vus précédemment et des suivis de réhabilitations de sites d'orpillage.

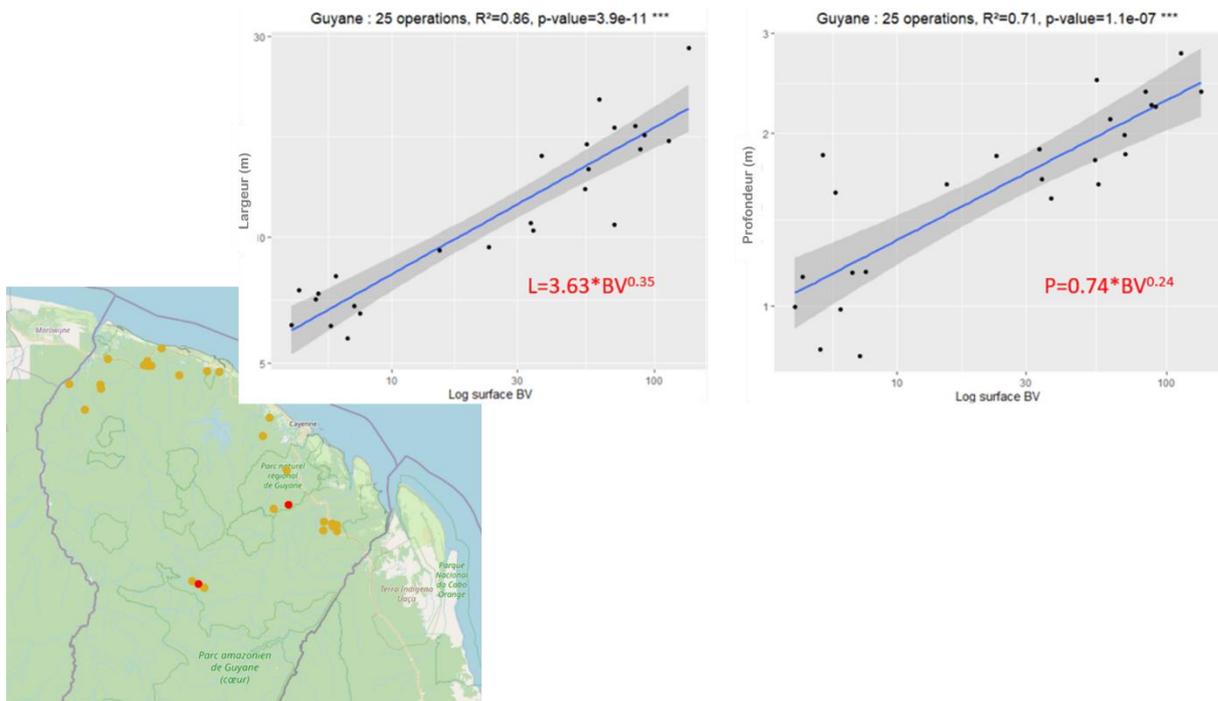


Figure 20 : Représentation des modèles d'évaluation hydromorphologiques Carhyce en Guyane, respectivement pour les paramètres *largeur* et *profondeur à pleins bords* (Référentiel v2.0)

II.4.4 Comparaison entre premier et deuxième passages

Dans le cadre de la consolidation du référentiel d'évaluation, une comparaison entre les premiers et deuxièmes passages réalisés avec le protocole Carhyce, sur les stations de référence, a été réalisée. D'après les données mises à jour en février 2021, en intégrant les nouvelles références acquises et en déclassant celles qui ne devraient pas l'être (d'après une analyse justifiant d'un contexte de pressions significatives), on aboutit à 531 stations de référence donc 362 connaissant un deuxième passage. L'analyse des différences entre les deux passages peut se faire à différents niveaux : sur les valeurs brutes (par exemple, par comparaison des largeurs moyennes) et sur les modèles de référence. Ceci permet tout d'abord d'évaluer la reproductibilité du protocole ainsi que la validité et la précision des données, d'évaluer ensuite si l'éventuelle déviation altère la qualité des modèles. Ce que l'on vise à étudier, c'est notamment un biais sur la qualité des données induit par le grand nombre d'opérateurs en charge des mesures de terrain à l'échelle de toute la France (i-e plusieurs centaines) et qui se sont succédés au cours de la dernière décennie.

Cette comparaison repose sur le postulat que la morphologie moyenne des stations de référence n'a pas ou peu changée entre les deux passages, permettant de concentrer l'analyse sur l'évolution des prises de mesures.

Dans un premier temps, l'analyse des valeurs sur cinq variables principales (la largeur moyenne à pleins bords, la profondeur moyenne à pleins bords, le D_{50} , la pente de la ligne d'eau et le *score ripisylve*) montrent que les différences se situent dans l'ensemble dans les marges d'erreur fixées par le protocole (Baudoin *et al.*, 2017). Pour les largeurs et les profondeurs à pleins bords, on note en effet une différence moyenne de l'ordre de 15% entre les 1^{er} et 2^{ème} passages et une médiane à 10% (*Figure 21*). Lorsqu'on regarde les valeurs brutes, on voit en moyenne une légère augmentation des largeurs et des profondeurs (respectivement +0.78 et +0.06). Cela peut s'expliquer par une meilleure compréhension de la notion de « plein bord » qui était sans doute souvent placé un peu trop bas par rapport au haut de berge lors des 1^{ers} passages (période 2009 – 2013 pour l'essentiel). Ce point a ensuite été consolidé par un certain nombre de consignes et une étude de cas présenté dans la version publiée du protocole (Baudoin *et al.*, 2017).

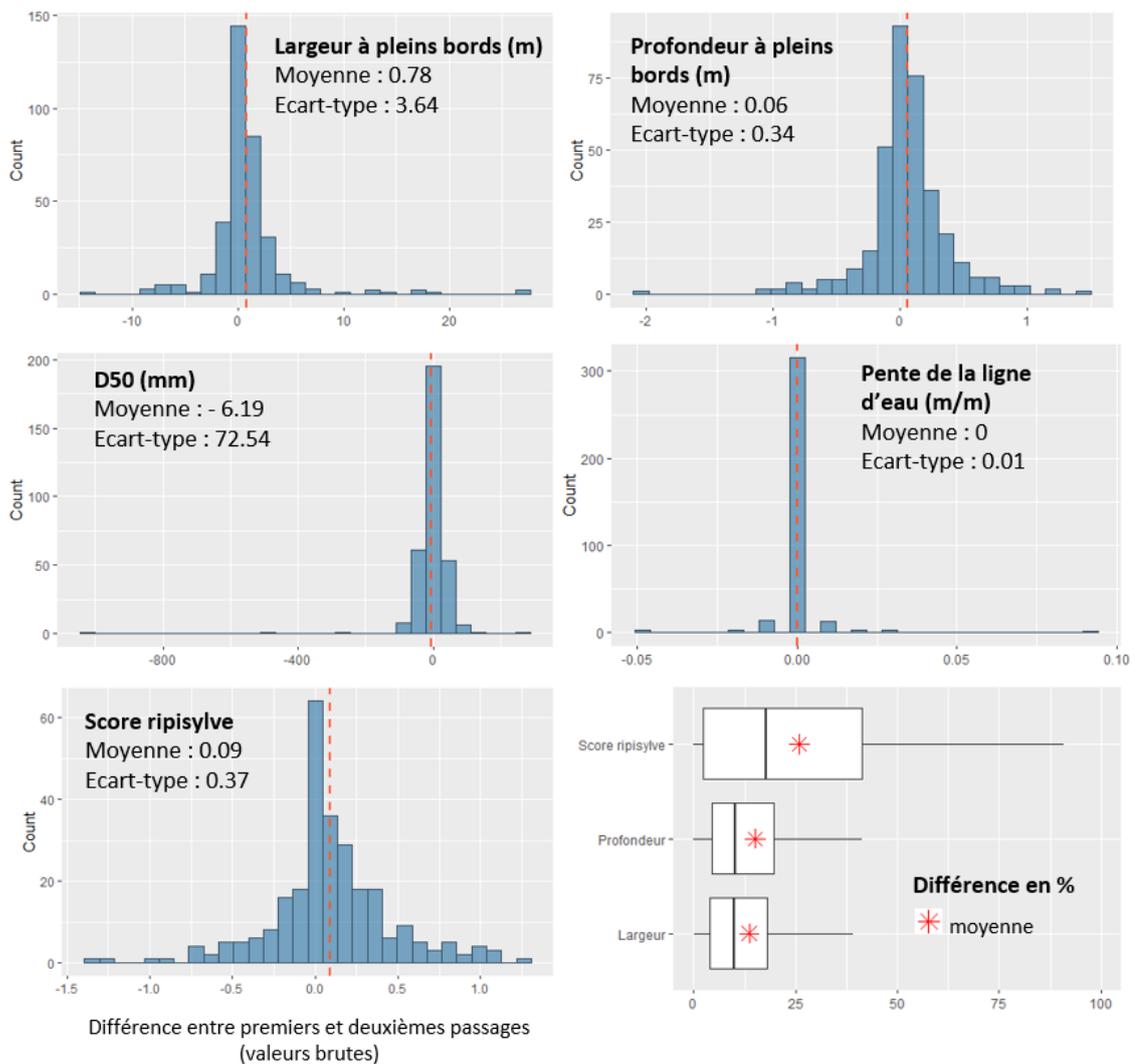


Figure 21 : Différences de valeurs entre les premiers et deuxièmes passages. Valeurs brutes sur les histogrammes (le trait rouge pointillé correspond à la moyenne). Valeurs en pourcentage sur les boîtes de dispersion (les valeurs atypiques ne sont pas représentées)

Pour la ripisylve, les différences sont plus importantes, avec une médiane autour de 25% (et une moyenne de près de 55%). Ceci est sans doute révélateur du changement de protocole entre les deux passages, lequel permet désormais de distinguer les différentes strates (herbacée, arbustive, arborée) dans leurs épaisseurs et types de végétation (Baudoin *et al.*, 2017) tout en discriminant mieux le recouvrement de la ripisylve (strates arbustive et arborée) au sein de l'ensemble de la végétation rivulaire (dont strate herbacée). On voit sur les valeurs brutes que le *score ripisylve* était plus faible lors du 1er passage, sans doute lié au fait que les strates herbacées étaient davantage renseignées notamment en termes de recouvrement.

Pour le substrat et la pente de la ligne d'eau, ces graphiques sont moins parlants car la gamme de valeurs est beaucoup plus large et les erreurs peuvent être proportionnellement minimales. L'étude des variations des classes de Wentworth pour le D₅₀ montre tout de même que 65% des diamètres médians des particules présentes sur les seuils (D₅₀) restent dans la même classe granulométrique (avec une dominance de cailloux) et que 33% sautent d'une classe (ex entre cailloux et pierres ou cailloux et graviers) (Tableau 7).

| | | 2ème passage | | | | | |
|-------------|---------------------|--------------|----------|----------|---------|-------|---------|
| | | sables | graviers | cailloux | pierres | blocs | rochers |
| 1er passage | sables (<2 mm) | - | 1 | - | - | - | - |
| | graviers (2-16 mm) | - | 8 | 15 | - | - | - |
| | cailloux (16-64 mm) | - | 12 | 150 | 37 | 1 | - |
| | pierres (64-256 mm) | - | 1 | 44 | 56 | - | - |
| | blocs (256-1024 mm) | 1 | - | - | 2 | - | - |
| | rochers (>1024 mm) | - | - | - | - | - | - |

Tableau 7 : Comparaison des classes granulométriques (Wentworth) du diamètre médian (D_{50}) des particules présentes sur les seuils lors des 1^{ère} et 2^{ème} application du protocole

La *Figure 22* et la *Figure 23* présentent la comparaison 1^{er} et 2^e passage pour huit modèles représentatifs, 4 sur les largeurs et 4 sur les profondeurs (l'ensemble des modèles sont présentés [en annexe VI.1](#)). Elles confirment d'abord la tendance observée sur les valeurs brutes (moyennes par HER notées dans le titre du graphique), avec une légère remontée des droites pour les profondeurs et les largeurs en considérant les deuxièmes passages. Dans les exemples présentés ici, seul le modèle de largeurs des Pyrénées au second passage est sous la courbe du premier passage. Pour les largeurs, les variations tournent en moyenne autour du mètre d'écart entre les deux campagnes de mesures sauf pour l'HER « Alpes internes » qui a une moyenne de 2,5 m, mais pour des cours d'eau plus larges. Pour les hauteurs, les écarts sont plus petits, variant de 5 cm pour le Massif Central Nord à 1,65 m pour l'HER « Jura - Préalpes du nord », là encore dans une région où les rivières sont sensiblement plus profondes.

Au sein d'une même HER, aucune tendance n'est observée en fonction de la taille ou du type de cours d'eau. Ce sont plutôt certaines stations qui posent questions, avec des variations très importantes de certains paramètres mesurés d'un passage à l'autre. Ceci peut avoir deux explications principales :

- la première serait la conséquence d'une évolution de la station suite au passage d'une crue importante, d'une intervention humaine ou tout autre évènement ayant affecté l'un des paramètres mesurés ;
- l'autre serait liée à un biais opérateurs et notamment une définition différente du niveau à pleins bords entre les deux passages (suite par exemple aux précisions apportées dans la version 2017 du protocole ou, et ce serait plus dommageable, au renouvellement des équipes sans formation véritable).

On voit sur le modèle « Table Calcaire » que les largeurs à pleins bords des trois plus petites stations ont largement été revues à la hausse. Deux d'entre elles (les plus petites) sont situées sur de très petits cours d'eau s'écoulant en forêt, ce qui pourrait expliquer la difficulté à estimer le plein bord. Ces variations importantes abaissent légèrement le coefficient de corrélation (le R^2 passe de 0.82 à 0.75) du modèle qui reste malgré tout très bon. Parmi les exemples présentés, l'autre modèle comptant des stations très différentes d'un passage à l'autre est celui des Landes. Si l'écart moyen entre les deux campagnes de mesure n'est que de 40 cm,

trois stations ont des écarts bien supérieurs avec certaines profondeurs revues largement à la baisse de façon très surprenante. Le modèle reste significatif mais la plus grande dispersion des références induit une perte en sensibilité.

Pour conclure, on peut donc affirmer de cette analyse que les relations sont robustes à très robustes dès lors que le nombre de stations de référence est, ou reste, suffisant. Malgré les biais opérateurs inévitables lorsqu'on travaille à l'échelle nationale et les évolutions du protocole, on observe une bonne superposition des intervalles de confiance obtenus avec les deux versions du référentiel (v1.0 vs v2.0). Cette stabilité moyenne entre les deux campagnes de mesures valide nos références ; cela n'empêche pas toutefois des variations parfois fortes à l'échelle des stations. Ces variations devraient être observées plus en détails par les opérateurs de terrain pour éventuellement identifier une erreur de saisie ou un problème dans l'identification du plein bord. Cette variation forte peut également renseigner du fonctionnement d'une rivière en cours d'ajustement, suite à une perturbation naturelle ou anthropique.

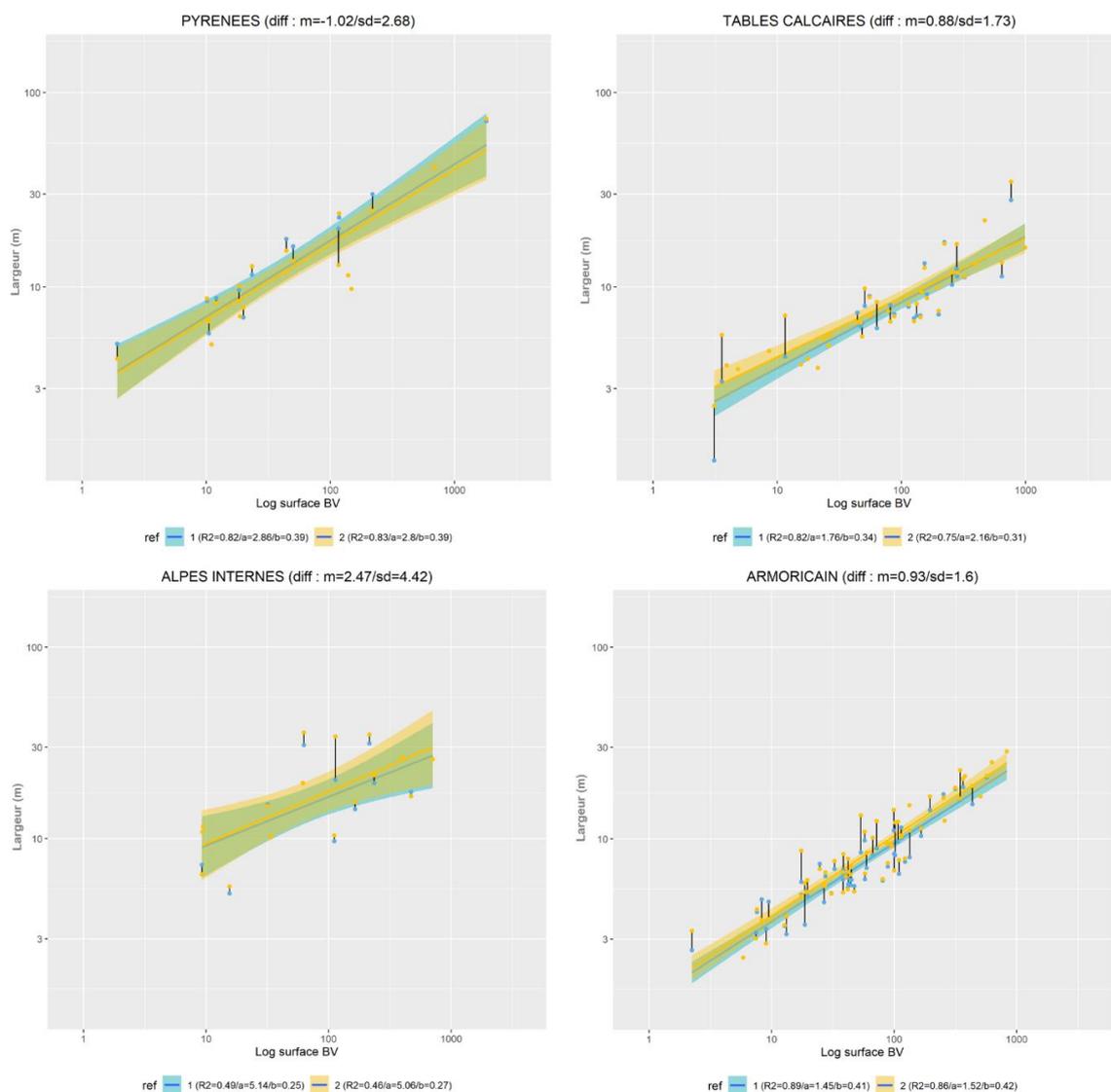


Figure 22 : Comparaison de modèles de largeurs à pleins bords construits par HER à partir des 1^{er} et 2^{ème} passages, pour les mêmes stations de référence des HER « Pyrénées », « Tables Calcaires », « Alpes Internes » et « Armoricaïn »

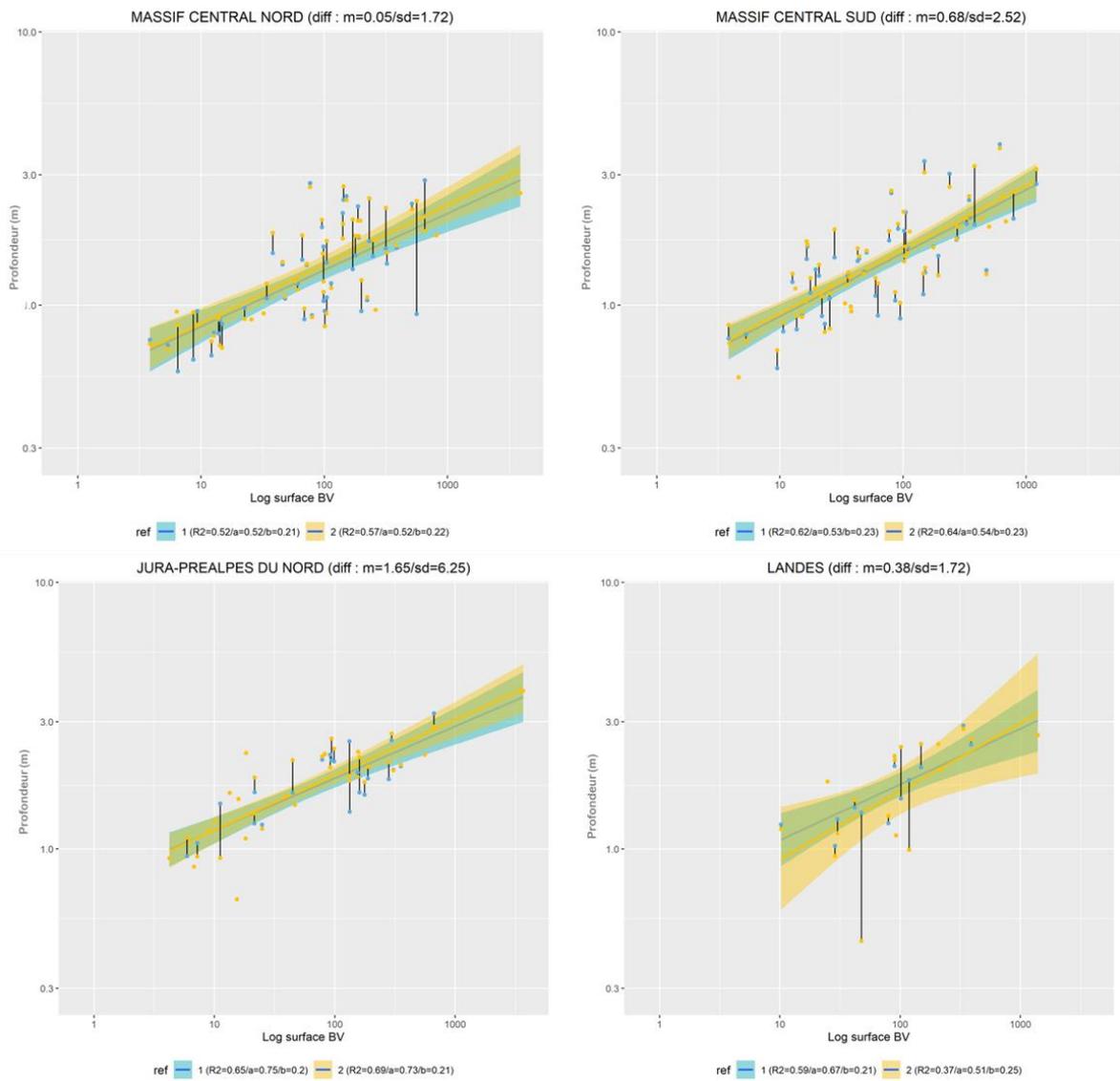


Figure 23 : Comparaison de modèles de profondeurs à pleins bords construits par HER à partir des 1^{er} et 2^{ème} passages, pour les mêmes stations de référence des HER « Massif central Nord », « Massif central sud », « Jura - Préalpes du nord », « Landes »

III. Interprétation de l'Indicateur Morphologique Global (IMG)

III.1 Préambule

En l'état actuel de son développement, l'Indicateur morphologique global (IMG) permet d'évaluer un écart aux situations de référence pour la géométrie du chenal (largeur, profondeur, rapport largeur/profondeur, surface mouillée à pleins bords), la pente de la ligne d'eau ou encore la profondeur des mouilles. Il n'emploie pas les autres éléments collectés lors de l'application du protocole Carhyce sur le terrain, eux-mêmes restitués de manières différentes ou sous forme d'autres indices dans l'IED (ripisylve, substrats, nature des berges, etc.).

Correctement utilisées, ces données peuvent permettre de mieux comprendre le fonctionnement du cours d'eau, repérer les conséquences éventuelles d'une altération et suivre les évolutions de la station. A ce jour, aucun indicateur générique permettant d'évaluer l'état du fonctionnement hydromorphologique à partir de ces données n'a encore été développé. Pourtant un tel indicateur serait utile pour interpréter pleinement le jeu des données Carhyce, et permettrait d'avoir une grille de lecture, d'analyse et d'évaluation plus complète, commune à l'ensemble des stations. Ce chapitre a pour objectif de présenter un certain nombre de réflexions et premiers tests menant à la construction d'un tel indicateur multi-compartiments. Il repose principalement sur le travail de Master de Camille Fraudin (Master Dynarisk de l'Université Panthéon-Sorbonne, 2020) (Fraudin, 2020), lequel se base sur le référentiel d'évaluation Carhyce version 1.0.

III.2 Comparaison du *Morphological Quality Index* et de l'IMG Carhyce

En première approche, il a été choisi de s'appuyer sur le protocole et l'indice d'évaluation associé au MQI pour *Morphological quality index*, projet mis en place en Italie par Massimo Rinaldi et son équipe, (Rinaldi *et al.*, 2013 ; 2014 ; 2016 ; 2017). Cet indice a en effet été bien décrit et plébiscité par le projet européen REFORM (Belletti *et al.*, 2014). Il repose sur des compartiments thématiques comparables à ceux abordés dans le protocole Carhyce.

III.2.1 Principes du MQI

The *Morphological Quality Index* (MQI), ou « *Sistema di valutazione IDromofologica, Analisi e Monitoraggio dei corsi d'acqua* » (IDRAIM), est une méthode d'analyse et d'évaluation pour la gestion des cours d'eau et des processus hydromorphologiques (Rinaldi *et al.*, 2014). Il a été mis en place en 2008 pour répondre aux besoins gouvernementaux italiens de disposer d'outils géomorphologiques pour répondre à la DCE. Le MQI est un indice scoré qui évalue la qualité hydromorphologique d'un cours d'eau. Il se concentre sur les aspects de dynamique morphologique, il ne prend en compte ni la gestion des ressources aquatiques, ni les écosystèmes, ni les paysages, ni les ouvrages anthropiques. Ce n'est pas un système d'analyse de l'ensemble des aspects nécessaires à la gestion des cours d'eau. L'outil n'est

pas présenté comme exclusif à la Directive Cadre sur l'Eau, il peut également servir à l'aménagement des rivières, à la gestion sédimentaire, ou encore à l'atténuation des dangers liés aux dynamiques morphologiques, *etc.*

L'étude se base sur une approche « hiérarchique imbriquée » (Rinaldi *et al.*, 2011), où le tronçon est vu comme l'unité spatiale majeure de l'étude. Elle est délimitée par des conditions homogènes du milieu, mais elle inclut aussi une observation temporelle, ce qui est original par rapport à Carhyce (Figure 24). En effet, le but de l'analyse est d'inclure le tronçon observé dans une échelle spatiale et temporelle plus vaste, afin d'avoir une vision plus exhaustive du milieu. Plus simplement, le MQI s'intéresse à l'état présent d'un cours d'eau, son état passé et essaye d'en déduire une tendance future (Rinaldi *et al.*, 2014).

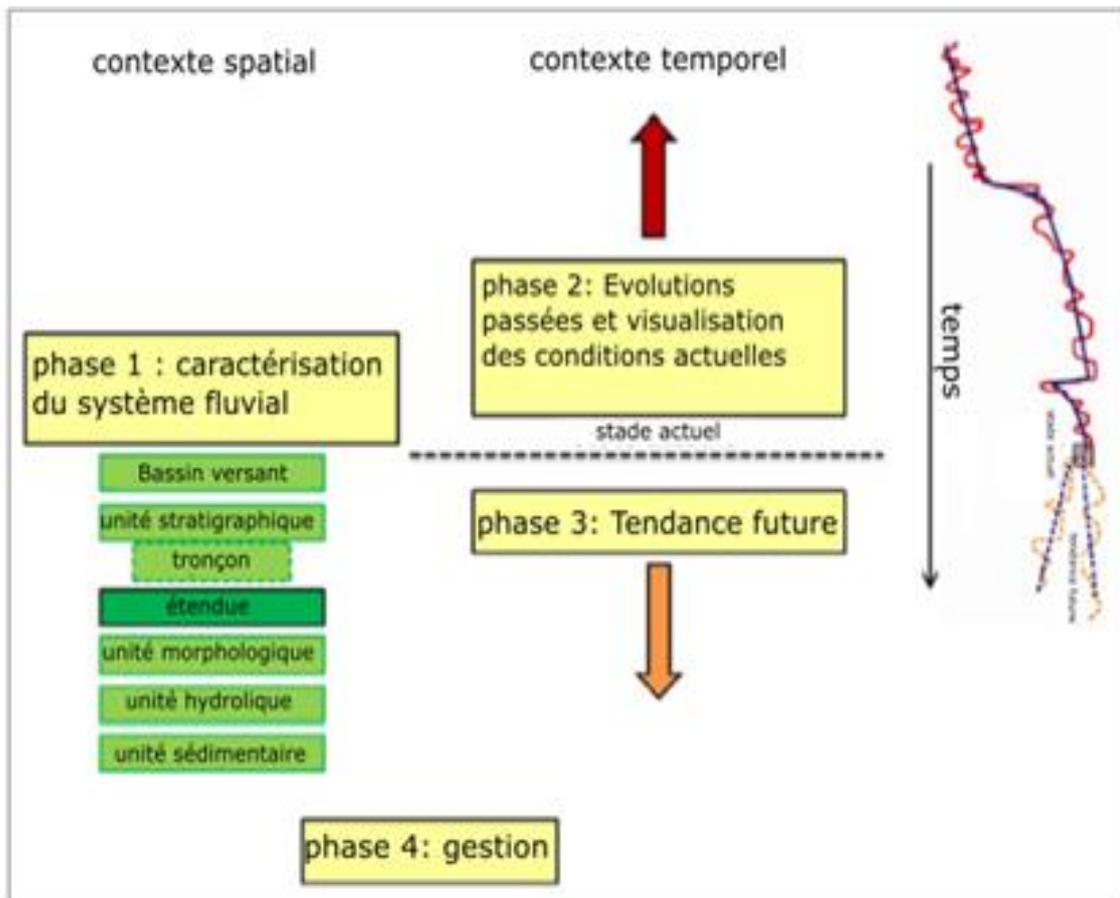


Figure 24 : Schéma des différentes phases d'analyse du MQI (traduit de Rinaldi *et al.*, 2014)

Si le tronçon est l'échelle favorisée par le MQI, il n'en reste pas moins que les éléments étudiés sont hiérarchisés. Le MQI est un score qui fonctionne sur un système de points, une note étant attribuée à chaque paramètre considéré. Rinaldi *et al.* considèrent des données relevant de l'artificialité d'un cours d'eau en complément de celles qu'ils nomment les « fonctionnalités géomorphologiques des formes et des processus » (Rinaldi *et al.*, 2011) et des ajustements du chenal. Chaque type de paramètres relève de processus particuliers dans un cours d'eau. Cela permet de classer les différents éléments du score total en trois familles d'indicateurs hydromorphologiques : (i) les indicateurs de fonctionnalité, (ii) les indicateurs d'artificialité et (iii) les indicateurs d'ajustement.

Les indicateurs de fonctionnalité, considèrent les formes et les processus qui permettent au cours d'eau de s'autoréguler sans action anthropique. Il s'agit par exemple de la possibilité d'inondations de la plaine alluviale, de la mobilité sédimentaire ou encore de la présence de ripisylve. Si ces paramètres sont fortement perturbés par des éléments artificiels, l'indice global des fonctionnalités sera moins bon. Les indicateurs de fonctionnalité prennent en compte les effets des éléments anthropiques sur la morphologie des cours d'eau, mais ce sont **les indicateurs d'artificialité** qui caractérisent leur présence et leur fréquence. Enfin, Rinaldi *et al.* (2011) proposent d'observer les évolutions du cours d'eau sur un pas de temps centennal grâce aux **indicateurs d'ajustement**. Ce laps de temps reflète en effet le mieux les variations morphologiques récentes, notamment dues aux activités anthropiques. De manière plus générale, ils considèrent les indicateurs de fonctionnalité et d'ajustement de chenaux comme des indicateurs de réponse (*response indicators*) et les indicateurs d'artificialité comme des indicateurs de pression (*pressure indicators*).

La situation de référence est approchée à partir de ces trois indicateurs (fonctionnalité, artificialité et ajustement de chenaux). Pour obtenir le meilleur score, la morphologie du cours d'eau doit répondre à celle attendue pour un cours d'eau de sa typologie morphologique, dans lequel les éléments artificiels ont une influence minimale (Rinaldi *et al.*, 2011). L'échelle considérée est celle du tronçon. Celui-ci est toutefois intégré dans une unité morphologique, hydrologique et sédimentaire plus globale. Si le MQI est calculé sur quelques centaines de mètres ou quelques kilomètres de rivière, il faut garder en tête, durant l'observation de terrain, et surtout durant l'évaluation, les caractéristiques géologiques, climatiques, lithologiques et surtout hydrologiques du bassin versant dans son intégralité (Rinaldi *et al.*, 2014).

III.2.2 Les paramètres considérés dans le MQI

Afin de réaliser l'évaluation d'un cours d'eau via le MQI, Il est d'abord découpé en tronçon homogène. Pour se faire, il convient d'identifier les unités paysagères, définir le confinement et les types de morphologie (Rinaldi *et al.*, 2011). Ces différents critères sont définis dans le *Tableau 8*.

| Etapes | Critères | Résultats |
|--|---|--|
| 1. Cadre général, identification des unités paysagères | Caractéristiques géologiques et géomorphologiques | - Unités paysagères - Définition du tronçon |
| 2. Définition des types de confinement | Confinement latéral des cours d'eau | Typologie des confinements : - Confiné (C) - Partiellement confiné (PC) - Non confiné (U) |

| | | |
|---|---|---|
| 3. Identification des différents types morphologiques | Caractéristiques du cours d'eau (indice de sinuosité, indice de tressage et indice d'anastomose) | Typologie morphologique : - (C) : chenal unique / divaguant / en tresse / en anabranchement - (PC-U) : chenal rectiligne / sinueux / méandrique / divaguant / en tresse / en anastomose |
| 4. Autres éléments permettant de délimiter le tronçon | Discontinuité dans le cours d'eau : - De la pente du lit - Des unités géomorphologiques - Du tri granulométrique - De la largeur du chenal - <i>Etc.</i> | - Tronçon délimité |

Tableau 8 : Récapitulatif des différents éléments de délimitation d'un cours d'eau

Les différentes unités paysagères peuvent se définir par une homogénéité géologique, lithologique, topographique et hydrologique. L'équivalent en France de ces grandes unités sont les Hydroécotones (HER, Wasson *et al.*, 2002). Le degré de confinement permet de définir le type du cours d'eau considéré. Il est également utilisé dans l'évaluation, pour définir la notation. Les tronçons évalués sont considérés différemment en fonction de leur caractère confiné (C) ou non (U).

La valeur du MQI est obtenue grâce à la combinaison des deux approches généralement utilisées pour ce type d'évaluation hydromorphologique : les SIG et l'étude de terrain. Elles compartimentent le travail à effectuer : la première phase d'étude consiste, à distance, à délimiter le tronçon et à décrire l'unité paysagère dans laquelle il se trouve. Ensuite, ces informations sont vérifiées et complétées sur le terrain. En salle, le travail s'appuie sur des données à l'échelle du tronçon et du bassin versant acquises par télédétection à partir de photographies aériennes (anciennes et récentes), d'orthophotographies, de MNT et de cartes ou de base de données vecteurs thématiques. L'enquête de terrain se concentre sur le tronçon délimité. Les observations sont qualitatives (pas de mesure) et demandent un certain niveau d'expertise. Ainsi le protocole précise que l'évaluation doit être dirigée par un spécialiste capable d'évaluer qualitativement les différents éléments du MQI.

Comme vu précédemment, les trois éléments principaux de l'évaluation sont les fonctionnalités géomorphologiques, l'artificialité et les ajustements de chenaux. Ceux-ci se déclinent en plusieurs sous-catégories. Il y a ainsi 13 sous-catégories de fonctionnalités, 12 catégories d'artificialités et 3 catégories d'ajustements des chenaux (variations morphologiques). Chacune est évaluée individuellement (*Tableau 9* et [annexe VI.2](#)).

| | | Fonctionnalité | Artificialité | Ajustements des chenaux |
|--------------------|--|------------------------------|---|-------------------------|
| Continuité | - Longitudinale - Latérale | F1 F2, F3, F4, F5 | A1, A2, A3, A4, A5 A6, A7 | |
| Morphologie | - Configuration morphologique - Tronçon - Substrat | F6, F7, F8 F9 F10, F11 | A8, (A6) (A4, A9, A10) A9, A10, A11 | V1 V2, V3 |
| Végétation | | F12, F13 | A12 | |

Tableau 9 : Récapitulatif des différents éléments du MQI par rapport à la fonctionnalité, l'artificialité et l'ajustement du/des chenal(aux) d'un cours d'eau

Le MQI est finalement calculé en tant que rapport entre le score du tronçon et le score total qu'il est possible d'obtenir en fonction du type de confinement. En effet, les cours d'eau confinés ne sont pas évalués exactement sur les mêmes critères que les chenaux partiellement confinés et non confinés. C'est le cas par exemple pour F2 (présence d'une plaine inondable plus ou moins continue) qui est pris en compte dans les tronçons partiellement confinés et non confinés mais n'est pas considéré lorsqu'ils sont confinés. Puisque le score repose principalement sur une évaluation qualitative, les scores sont de fait arbitraires (Rinaldi *et al.*, 2011).

A chacun des paramètres évalués est associée une note ; plus elle est élevée (0 à 12), plus le paramètre considéré est altéré ou dysfonctionnel. Un score additionnel est prévu en fonction de la fréquence de l'élément artificiel évalué, afin de prendre en compte l'importance plus ou moins grande de certaines altérations. Pour les cours d'eau confinés, le score total est de 119 et pour les cours d'eau partiellement confinés et non confinés, le score maximal est de 142. Pour obtenir le MQI on calcule d'abord un *Morphological alteration index* (MAI) qui varie de 0 à 1, où 0 indique qu'il n'y a pas d'altération et 1 que l'altération est totale, tel que :

$$MAI = \text{Score total} / \text{Score maximal}$$

Le MQI est alors calculé grâce à la formule suivante :

$$MQI = 1 - MAI$$

Les scores peuvent alors être considérés selon l'échelle d'analyse du *Tableau 10*.

| Qualité | Intervalle |
|---------------|---------------------------------|
| Très bonne | $0.85 \leq \text{MQI} \leq 1$ |
| Bonne | $0.7 \leq \text{MQI} \leq 0.85$ |
| Moyenne | $0.5 \leq \text{MQI} \leq 0.7$ |
| Mauvaise | $0.3 \leq \text{MQI} \leq 0.5$ |
| Très mauvaise | $0 \leq \text{MQI} \leq 0.3$ |

Tableau 10 : Classification de la qualité hydromorphologique des cours d'eau selon le MQI

III.2.3 Comparaison du MQI et de l'IMG Carhyce dans le Massif central

Afin de mieux comprendre la signification de l'IMG obtenu par la mise en œuvre du protocole Carhyce, quinze stations de l'HER « Massif central nord » suivies avec le protocole ont été sélectionnées (*Figure 25* et *Tableau 11*). Chacune de celles-ci a fait l'objet d'un calcul du MQI tel que préconisé par Rinaldi *et al.* (2017). Les données pour réaliser ce calcul ont été acquises, d'une part, sur SIG en rassemblant diverses cartes, photographies aériennes et bases de données et, d'autre part, à partir de relevés de terrain. Le terrain a été légèrement adapté pour que la comparaison avec les données Carhyce soient possibles (la longueur du tronçon a été légèrement raccourcie : pour le calcul du MQI, il a été choisi de travailler sur une station de 50 fois la largeur à pleins bords).

Les 15 stations Carhyce prospectées ont été sélectionnées avec des tailles de bassin versant, de largeurs à pleins bords et de valeurs d'IMG variées, ceci afin d'avoir un panel de stations le plus diversifié possible. Elles se situent autour du plateau des Millevaches, de la ville de Limoges et d'Argenton sur Creuse. Parmi les stations choisies, 6 stations sont « de référence » et 9 sont potentiellement altérées, elles se positionnent sur 11 cours d'eau différents : la Vienne, la Creuse et la Petite Creuse, la Diège, la Bouzanne, l'Aurence, l'Aixette, la Glane, l'Indre, le Taurion et la Briance. La Vienne, l'Aurence et la Creuse traversent, elles, des zones urbanisées, à hauteur des stations prospectées avec le protocole Carhyce, tandis que les autres s'écoulent soit dans des pâtures ou des champs, soit dans de petits espaces boisés peu denses. 11 des stations ont une valeur d'IMG inférieure à 8, et toutes ont une valeur d'IMG inférieure à 10.

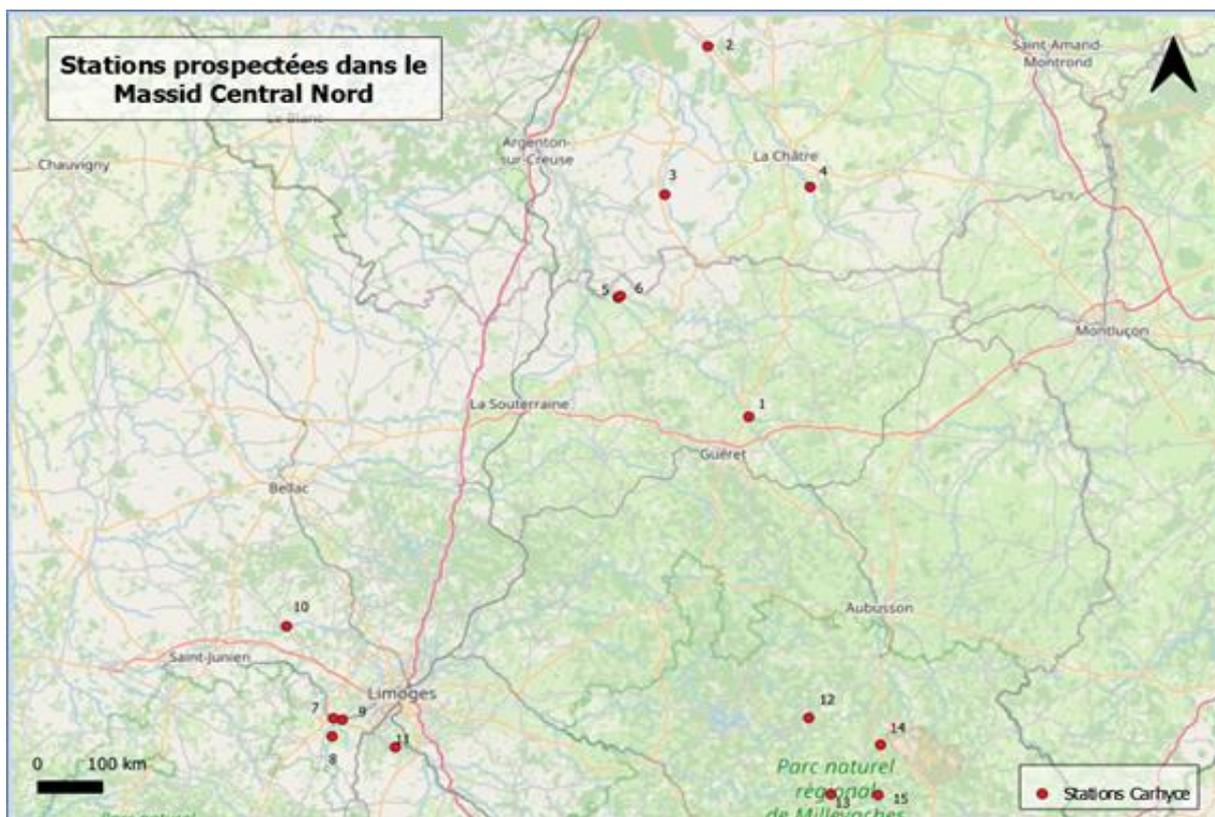


Figure 25 : Localisation des stations Carhyce prospectées dans le Massif Central Nord

| | Nom de la station | Référence | Surface Bassin versant (km ²) | Largeur plein bord (m) | Pente (m) | D50 (mm) | Score IMG |
|----|---------------------------------|-----------|---|------------------------|-----------|----------|-----------|
| 1 | Creuse à Glénic | ✓ | 1 000 | 35 | 0,05 | ∅ | 8,66 |
| 2 | Indre à Ardentes | | 679 | 20 | 14,6 | 82,5 | 7,93 |
| 3 | Bouzanne à la Cluis | | 28 | 5,7 | 11,8 | 77,5 | 2,09 |
| 4 | Indre à Briantes | ✓ | 187 | 10,7 | 9,83 | 30 | 6,4 |
| 5 | Creuse à Fresselines | | 1 234 | 34 | 2,08 | 35,5 | 7,09 |
| 6 | Petite Creuse à Fresselines | | 856 | 27 | 2,39 | 52 | 4,37 |
| 7 | Vienne à Saint Priest sous Aixe | | 3 331 | 82 | 0,14 | ∅ | 9,72 |
| 8 | Aixette à Aixe sur Vienne | | 153 | 14 | 6,7 | 66 | 5,15 |
| 9 | Aurence à Aixe sur Vienne | | 94 | 9 | 3,6 | 70 | 4,78 |
| 10 | Glane à Oradour sur Glane | | 124 | 12 | 0,39 | 22 | 5,5 |
| 11 | Briance à Condat sur Vienne | | 601 | 30 | 3,5 | 60 | 9,87 |
| 12 | Taurion à Gentioux Pigerolles | ✓ | 4,55 | 3,01 | 0,47 | 2 | 8,38 |
| 13 | Vienne à Saint Setiers | ✓ | 14,81 | 3,7 | 7,33 | 62 | 6,38 |
| 14 | Creuse à Clairavaux | ✓ | 14 | 7,17 | 13,5 | 65 | 5,17 |
| 15 | Diège au Moulin de Beaune | ✓ | 22 | 5,38 | 6,23 | 56 | 2,57 |

Tableau 11 : Caractéristiques principales des cours d'eau prospectés

La Bouzanne à Cluis ainsi que la Diège au Moulin de Beaune (*Figure 26*) sont les stations qui sont les plus proches des modèles de référence du Massif Central Nord. Elles ont respectivement des valeurs d'IMG de 2,09 et 2,57. La Bouzanne n'a pas été identifiée comme station « de référence » à partir du jeu de données ayant permis la construction de l'Indice poisson rivière (IPR, données d'analyse des pressions) mais présente bien une morphologie très peu marquée par l'anthropisation. La Diège est, elle, une station de référence qui a servi à construire les modèles de référence hydromorphologiques. Elle présente des formes témoignant d'un fonctionnement hydrosédimentaire peu altéré.

Les quatre stations suivantes (*Figure 27*), par valeurs croissantes, ont des valeurs d'IMG comprises entre 4 et 5 : elles sont encore très proches des modèles de référence constitués pour l'HER. Dans ces stations, seule la Creuse à Clairavaux fait partie des références. La Creuse, la Petite Creuse et l'Aixette présentent, parmi les stations Carhyce les représentant, des morphologies qui semblent là encore peu perturbées et des lits marqués de façon très limitée par l'anthropisation. Concernant l'Aurence à Aix sur Vienne, si elle ne s'éloigne pas des modèles de référence, cette station reste à l'expertise assez fortement anthropisée. Elle traverse le centre du village, est coupée par un seuil et est marquée par la présence d'un aménagement (moulin) dans son lit modifiant son fonctionnement, au moins localement.

La Vienne à Saint Setiers (IMG = 6,38), l'Indre à Briantes (IMG = 6,4) et la Creuse à Fresselines (IMG = 7,09) ont des valeurs d'IMG un peu plus élevées. La *Figure 28* permet toutefois de voir que l'ensemble écarts aux modèles restent sous la valeur de 2. Leur géométrie est donc conforme à 95% des stations de référence. Ces stations présentent néanmoins à première vue un degré d'altération un peu plus élevé que les précédentes. Ce sont trois rivières de tailles plus importantes qui sont sous l'influence d'un barrage (La Creuse à Fresselines) ou d'un certain degré d'anthropisation des berges (La Vienne et l'Indre).

Les dernières stations (*Figure 29*) présente enfin des valeurs d'IMG supérieures à 5 avec au moins un des axes (modèles) supérieurs à 2 ; c'est à dire en dehors de la variabilité de 95% des stations de référence. Dans ce lot, seule la station du Taurion à Gentioux Pigerolles est une station de référence. Le Taurion à cet endroit est un très petit cours d'eau dont seule la présence d'un pont très bas à l'aval immédiat de la station peut expliquer la valeur relativement élevée de l'IMG. Les autres stations présentent une valeur d'IMG supérieure à 8 et comptent toutes un seuil à proximité qui perturbent plus ou moins fortement les lignes d'eau.

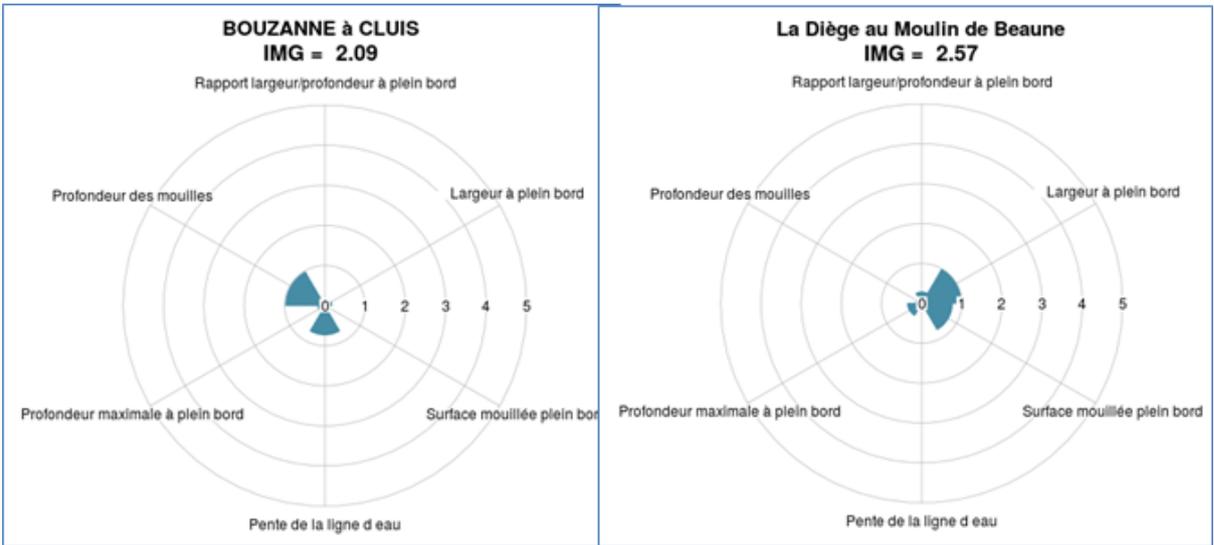


Figure 26 : Valeurs d'IMG des stations prospectées dans le Massif Central Nord, dont les valeurs se situent entre 0 et 1 (Référentiel v1.0)

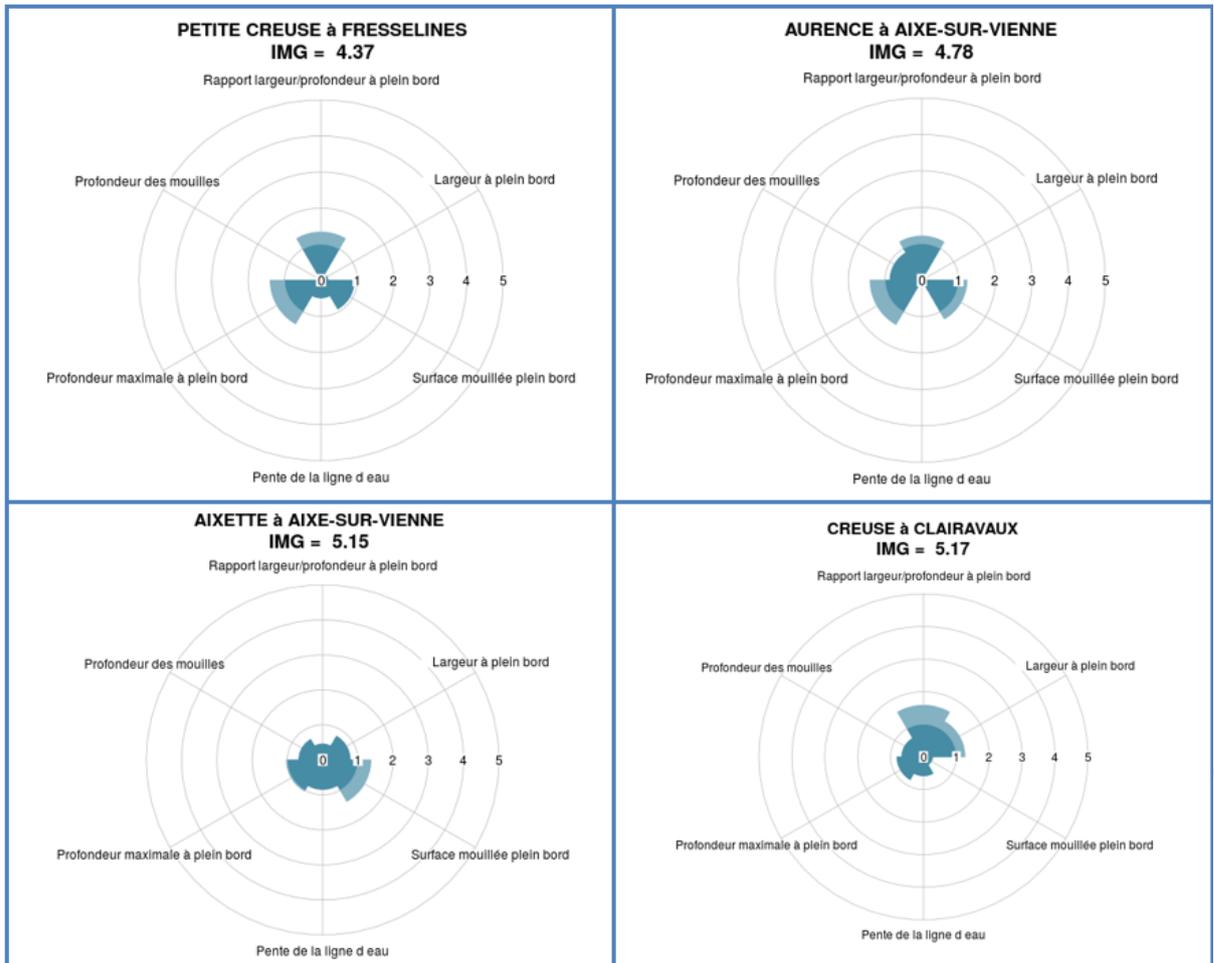


Figure 27 : Valeurs d'IMG des stations prospectées dans le Massif Central Nord, dont les valeurs se situent entre 1 et 5 (Référentiel v1.0)



Figure 28 : Valeurs d'IMG des stations prospectées dans le Massif Central Nord, dont les valeurs se situent entre 6 et 7 (Référentiel v1.0)

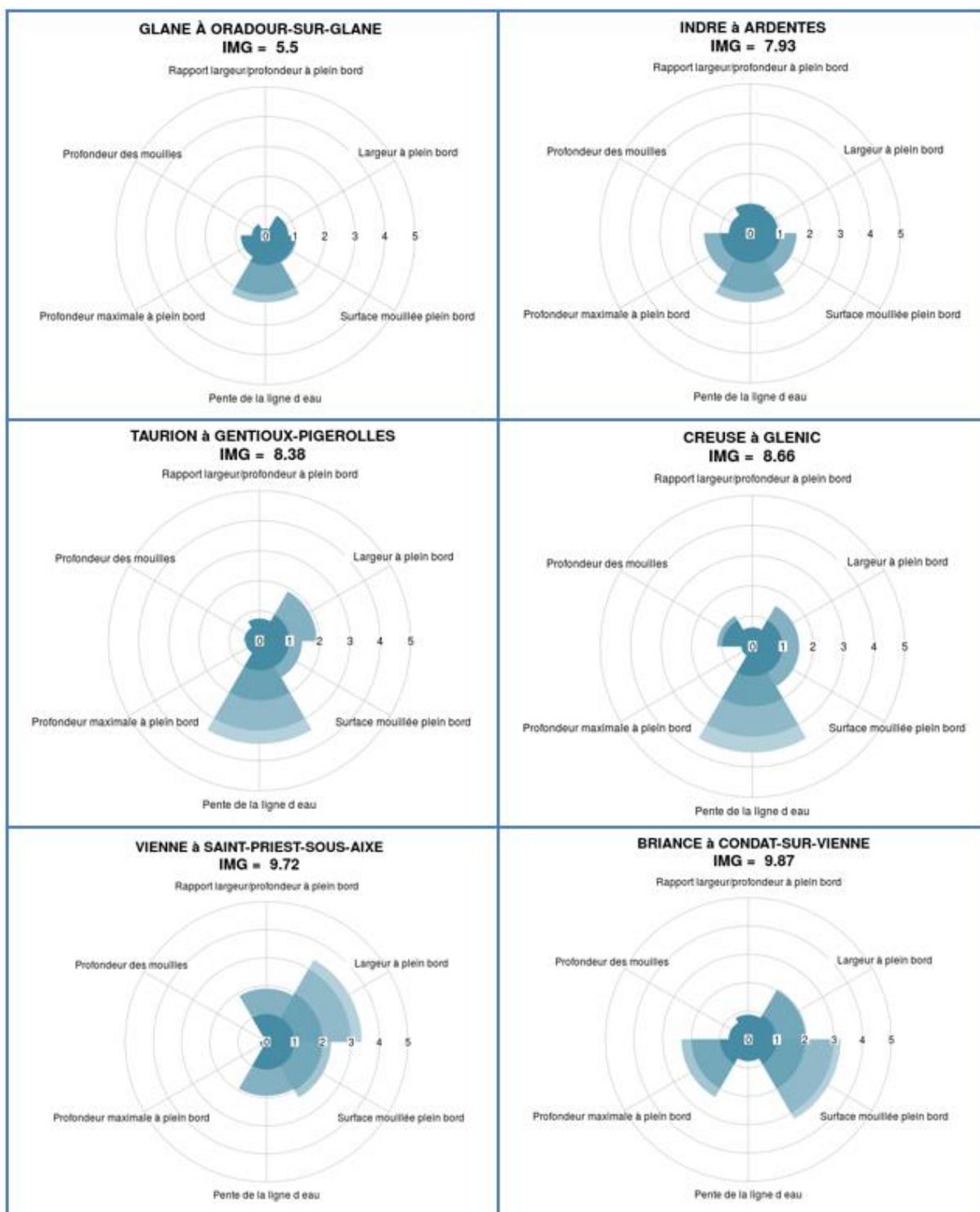


Figure 29 : Valeurs d'IMG des stations prospectées dans le Massif Central Nord, dont les valeurs se situent entre 5,5 à 9,87 (Référentiel v1.0)

Le *Tableau 12* détaille le calcul des valeurs de MQI pour chacune des quinze stations. Les stations sont triées par ordre croissant, de gauche à droite, en fonction de leur valeur de MQI. Les cases vertes correspondent à une altération nulle pour la catégorie concernée, les cases jaunes à une altération moyenne, les cases rouge clair à une altération forte, et les cases rouge foncé (score de 12 ou de 18), à une altération forte et aggravée par la présence d'un ou de plusieurs barrages à la limite amont du tronçon d'étude. Les catégories F10 et A10 (relatives à la nature et entretien du fond du lit) n'ont pas pu être évaluées sur le terrain. En effet, la hauteur d'eau le jour d'observation n'a pas permis d'observer la structure du fond du lit et un éventuel colmatage (A10). Pour les enlèvements de bois et de sédiments (F10), nous n'avons pas d'information qui aurait pu nous aider à évaluer une possible altération de cet élément hydromorphologique.

| | Vienne à Saint Priest sous Aix | Aurence à Aix sur Vienne | Creuse à Glénic | Creuse à Fresselines | Aixette à Aix sur Vienne | Briance à Condat sur Vienne | Indre à Briantes | Petite Creuse à Fresselines | Glane à Ouradour sur Glane | Indre à Ardentes | Creuse à Clairavaux | Vienne à Saint setiers | Taurion à Gentioux Pigerolles | Diège au Moulin de Beaune | Bouzanne à la Cluis |
|-----|--------------------------------|--------------------------|-----------------|----------------------|--------------------------|-----------------------------|------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------|---------------------|------------------------|-------------------------------|---------------------------|---------------------|
| F1 | 3 | 5 | 3 | 3 | 3 | 3 | 0 | 3 | 3 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 3 |
| F2 | | 3 | | | 3 | | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| F3 | 5 | | 5 | 3 | | 5 | | 3 | | | | | | | |
| F4 | | 3 | | | 2 | | 0 | | | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| F5 | | 2 | | | 3 | | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| F6 | 5 | | 5 | 0 | | 0 | | 3 | | | | | | | |
| F7 | 3 | 5 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 3 | | 5 | 0 | 0 | 3 |
| F8 | | 3 | | | 3 | | 2 | | 2 | 3 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| F9 | 5 | 5 | 3 | 3 | 3 | 5 | 5 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| F11 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | | 2 | | 2 | | 3 | 0 |
| F12 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 0 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 0 | 0 |
| F13 | 3 | 3 | 3 | 3 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 5 | 0 | 0 |
| A1 | 0 | 0 | 0 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A2 | 9 | 3 | 3 | 6 | 3 | 3 | 3 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 |
| A3 | 0 | 0 | 0 | 6 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A4 | 4 | 18 | 18 | 6 | 18 | 4 | 0 | 4 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A5 | 2 | 3 | 3 | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 | 2 | 0 | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 |
| A6 | 6 | 12 | 3 | 0 | 3 | 0 | 18 | 0 | 0 | 5 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A7 | | 3 | | | 0 | | 0 | | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A8 | | 2 | | | 0 | | 0 | | 2 | | 0 | 0 | 2 | 3 | 0 |
| A9 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 |
| A11 | 5 | 5 | 5 | 2 | 5 | 2 | 5 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 0 | 2 | 0 |
| A12 | 5 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 0 | 2 | 2 | 0 | 2 | 0 |
| V1 | 3 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Tot | 0.3458 | 0.36923 | 0.4299 | 0.53271 | 0.59559 | 0.62617 | 0.63235 | 0.7102837 | 0.823529 | 0.84615 | 0.853846 | 0.85385 | 0.86153846 | 0.88461 | 0.929577 |

Tableau 12 : Détails du calcul des scores MQI des quinze stations étudiées

La *Figure 30* et la *Figure 31* montrent la répartition des valeurs de MQI des 15 stations étudiées.

Rappelons que Rinaldi *et al.* (2016) classent les stations étudiées comme suit : de 0 à 0,3 <> très mauvaise qualité ; de 0,3 à 0,5 <> mauvaise qualité ; de 0,5 à 0,7 <> qualité moyenne ; de 0,7 à 0,85 <> bonne qualité ; et de 0,85 à 1 <> très bonne qualité.

Selon leurs valeurs de MQI, trois des stations étudiées sont considérées comme de pauvre qualité hydromorphologique (la Vienne à Saint Priest, l'Aurence et la Creuse à Glénic), 4 stations sont identifiées comme de qualité moyenne (la Creuse à Fresselin, l'Aixette, la Briance et l'Indre à Briante), 3 stations sont, elles, identifiées comme de bonne qualité (la Petite Creuse, la Glane et l'Indre à Ardente) et 5 stations enfin sont identifiées comme de très bonne qualité (la Creuse à Clairavaux, la Vienne à Saint-Setiers, le Taurion, la Diège et la Bouzanne). Les valeurs d'IMG de ces stations se répartissent entre 2,09 et 9,87. Les stations avec les

valeurs d'IMG les plus élevées correspondent plutôt aux stations dont la valeur du MQI est considérée comme moyenne à très mauvaise. Les stations qui ont des valeurs d'IMG les plus basses sont, à l'inverse, plutôt celles qui ont une valeur de MQI la plus haute, c'est-à-dire avec la meilleure qualité hydromorphologique. L'IMG et le MQI montrent donc des résultats assez concordants quant à l'appréhension d'une possible altération d'un cours d'eau. Il faut toutefois noter qu'il ne s'agit ici que d'une tendance. La corrélation entre l'IMG et le MQI est en effet faible puisque le coefficient de détermination (R^2) n'est que de 0.2 ; ce qui est plus que probablement lié au fait que l'IMG n'intègre que des éléments de géométrie du lit alors que le MQI étend son analyse à d'autres compartiments. De plus, il faut rappeler que le MQI est un outil qualitatif qui repose avant tout sur une analyse d'expert, alors que l'IMG est quantitatif, et s'appuie uniquement sur des mesures de terrain.

Si la corrélation générale entre le MQI et l'IMG est assez évidente, quatre stations se situent à la marge et ne semblent pas respecter cette tendance : l'Aurence (0,37 - 4,78), la Briance (0,63 - 9,87), l'Indre à Ardentes (0,85 - 7,93) et le Taurion (0,86 - 8,38). Ces quatre stations s'écartent en effet de la droite de régression dans la *Figure 30*.

1. Pour l'Aurence à Aix-sur-Vienne : l'écart entre MQI et IMG peut s'expliquer par la différence de taille des stations évaluées pour le calcul des deux indicateurs (15 x LQb pour Carhyce et 50 x LQb pour le MQI). Cette station se situe en effet en pleine ville et compte de nombreux aménagements (seuils de moulin, ponts, protections de berge) à l'échelle de la « station MQI » mais aucun à l'échelle de la « station Carhyce ». La valeur du MQI y est donc particulièrement mauvaise bien que, selon les modèles d'évaluation Carhyce, la géométrie reste conforme aux modèles régionaux. Ceci indiquerait que les aménagements, présents à l'amont de la station Carhyce, n'y auraient pas sensiblement modifié la géométrie de la rivière.
2. Pour Briance à Condat-sur-Vienne : elle est, selon le MQI (0,63), considérée comme une station de qualité moyenne. En effet, elle oscille entre une altération moyenne et forte pour la majorité des catégories observées dans le *Tableau 12*. Pour l'IMG, à l'inverse, sa valeur est élevée (9,87). Si on regarde en détail l'indice sur la *Figure 29* précédente, on remarque que sa surface mouillée à pleins bords s'éloigne du modèle de référence (pour rappel : HER « Massif central nord »). Sa profondeur maximale à pleins bords ainsi que sa largeur à pleins bords appartiennent à l'intervalle [0 ; 3], ce qui, bien qu'il corresponde à 98% des valeurs de référence, montre tout de même une certaine altération. Pour ce cas, c'est l'inverse de l'Aurence qui se produit. L'IMG considère que la rivière est plus large et profonde qu'attendu dans cette région alors que le MQI ne permet pas de prendre cet élément comme témoin d'une possible altération.

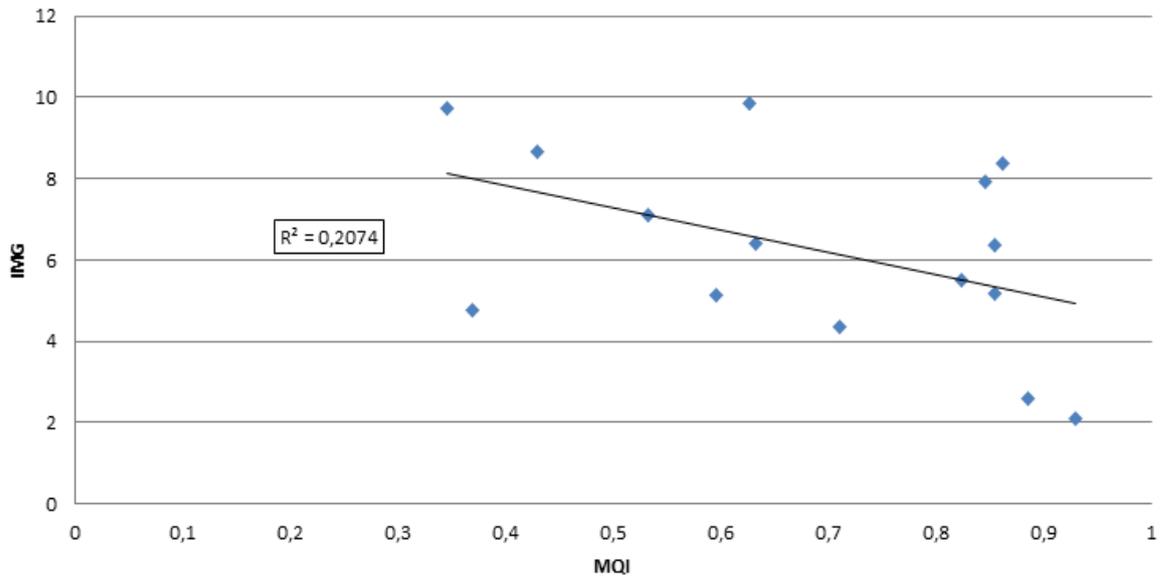


Figure 30 : Comparaison des valeurs de MQI et d'IMG (Référentiel v1.0) des stations prospectées dans le Massif central nord

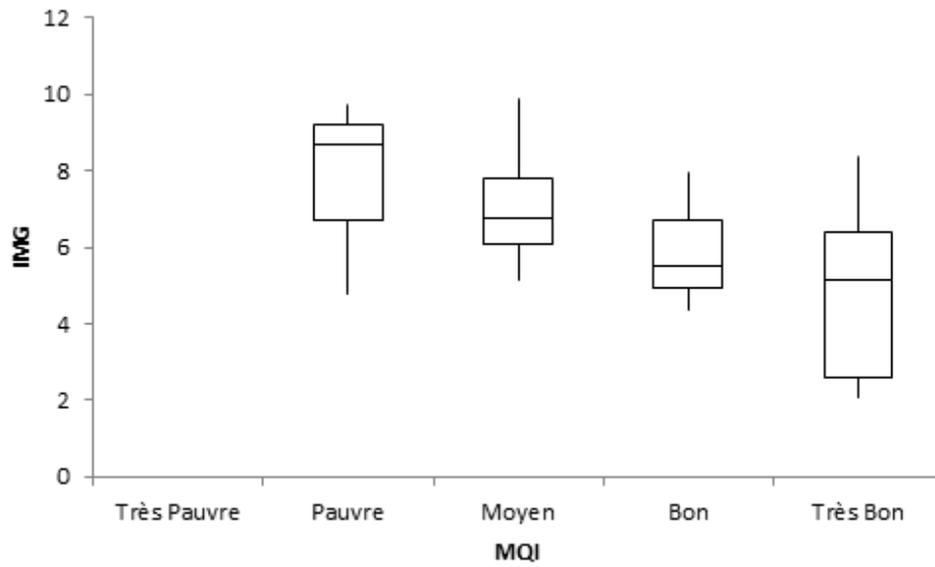


Figure 31 : Distribution des valeurs d'IMG (Référentiel v1.0) selon leur classe de MQI

3. L'Indre à Ardenes est, pour la grande majorité des catégories du MQI, considérée comme non altérée. La seule altération significative concerne une présence trop importante de protection de berges. La valeur de l'IMG (7,93) ne la considère pas non plus en dehors du modèle de l'HER, cependant on peut noter un certain écart de la pente de la ligne d'eau par rapport au modèle ainsi que de la profondeur maximale à pleins bords. Cela pourrait être dû à la présence probable d'un ancien seuil de moulin, à peine visible aujourd'hui, et donc non pris en compte dans le calcul du MQI. Celui-ci peut toutefois avoir durablement modifié la géométrie du lit. L'IMG enregistrerait ainsi cette évolution.
4. Enfin, le Taurion est, selon le MQI, considérée comme une rivière de très bonne qualité hydromorphologique car seule sa ripisylve, quasi absente, ressort comme altérée. L'IMG est au contraire assez mauvais (8,38) principalement à cause de la pente de la ligne d'eau qui est beaucoup plus faible que le modèle de référence. Ceci s'explique peut-être par le contexte et notamment la présence d'une route juste à l'aval de la station : pour la franchir, la rivière doit passer sous un petit pont, qui perturbe probablement la pente de la ligne d'eau. Toutefois, à cet endroit, le Taurion est une toute petite rivière de tête de bassin qui s'écoule sur le plateau peu pentu des Millevaches. La pente peut ici y être naturellement plus faible que régionalement ; ce qu'indique la valeur de l'IMG (i-e signalant une altération) pourrait, dans ce cas, n'être qu'une variabilité naturelle au sein de l'HER « Massif central nord ».

En conclusion, IMG et MQI donnent des résultats plutôt concordants. Assez logiquement, lorsque le MQI renseigne une qualité hydromorphologique moindre, cela se traduit le plus souvent par un IMG élevé, lequel signale une altération de la morphologie du lit. Ce n'est toutefois pas automatique et la corrélation n'est pas statistiquement très performante, faute d'un jeu de données suffisamment large ; et parce que la géométrie des lits fortement anthropisés ne se traduit pas automatiquement par une altération du lit. L'inverse est aussi vrai, un lit par exemple très incisé peut, pour tous les autres compartiments considérés dans le MQI, être de très bonne qualité. Cela étant dit, cet exercice de comparaison nous a permis de confirmer que, à quelques légères adaptations près, les deux indicateurs sont compatibles, notamment en termes d'échelle d'analyse. C'est une information importante pour la suite des développements méthodologiques que nous envisageons pour intégrer l'ensemble des paramètres Carhyce dans un indice hydromorphologique.

III.2.4 Comparaison du MQI et de l'IMG Carhyce à l'échelle de l'ensemble de la banque de données Carhyce

De l'analyse précédente réalisée à l'échelle de quelques stations, le même exercice a été déployé sur un beaucoup plus large jeu de données. Il a fallu pour cela se passer du terrain et adapter le protocole de Rinaldi *et al.* (2017) pour remplacer certaines données par des données de pressions dont nous disposons, grâce notamment aux jeux de données servant la construction de l'IPR, du Système d'audit de l'hydromorphologie des cours d'eau (SYRAH-CE) et encore du Référentiel des obstacles à l'écoulement (ROE). Le *Tableau 13* présente les équivalences que nous avons déterminées entre les données IPR, (Marzin *et al.*, 2013; Oberdorff *et al.*, 2002) et les paramètres à déterminer pour le calcul du MQI. En complément, la largeur du fond de vallée (« fdv »), calculée dans le SYRAH-CE et couplée à la largeur à pleins bords de la banque de données Carhyce, a permis de déterminer le type de confinement des cours d'eau et la plus ou moins grande continuité de la plaine inondable (F2). Le taux de voies de communication, voies ferrées et routes, présentes sur la plaine alluviale (TauxVCom) du SYRAH-CE a été utilisé pour déterminer la connectivité totale ou partielle des versants et du cours d'eau et sur la présence d'un couloir potentiellement érodable. Il a en effet été considéré que plus le taux de voies de communication était important, plus le couloir potentiellement érodable serait alors faible (F3/F5). Le ROE a, quant à lui, été utilisé pour déterminer le nombre de barrages et de seuils présents sur le tronçon de la station et la hauteur de chacun de ces obstacles (F6/A3/A4/A5). Enfin, les données sur les débris ligneux et les embâcles relevées dans la banque de données Carhyce ont été utilisées pour calculer un « taux embâcle », permettant de déterminer la présence de matériaux ligneux sur le tronçon (F11). De même les données de continuité des ripisylves (toujours contenues dans la banque Carhyce) ont permis d'avoir des informations sur la connectivité et l'épaisseur des ripisylves sur chacune des stations considérées (F12/F13).

| Données | Définition | MQI |
|--------------------------|--|------------|
| BarAmt | Il s'agit de la présence ou non d'obstacle anthropique en amont de la station. | F1 |
| MorphoFaciesRete | Il s'agit de la morphologie de la retenue d'eau, si la station est située dans un tronçon qui a été modifié par la présence d'un barrage ou d'un seuil. On observe surtout le faciès de la lame d'eau. | F7 |
| MorphoFaciesAccel | Il s'agit toujours de la morphologie de la retenue d'eau, on regarde cette fois-ci si le faciès du tronçon est homogénéisé, notamment par une augmentation de la vitesse de l'eau à cause d'une réduction de la largeur à pleins bords dû à un endiguement, une rectification de la sinuosité ou la présence d'un barrage directement en aval. | F9 |
| MorphoColmat | Il s'agit de l'importance du colmatage, c'est-à-dire une couche importante de sédiments fins. On n'étudie pas la provenance de ce colmatage. | F10 |
| HydroRegimModif | Il s'agit des tronçons pour lesquels le régime des débits est modifié par des barrages ou des aménagements importants sur le bassin versant, dont les effets sont visibles à l'échelle de la station. | A1m |
| MorphoTransSolid | Il s'agit de l'évaluation des effets de l'altération du transport solide à travers le degré d'incision d'un cours d'eau. | A2 |
| HydroQres | Il s'agit des stations qui sont dans un débit réservé, c'est-à-dire un phénomène de dérivation d'un tronçon, qui n'appartient plus au lit naturel. Le tronçon doit détourner au moins 20% du débit naturel. | A2 |
| MorphoBerge | Il s'agit du taux d'artificialisation des berges. | A6 |
| MorphoDigMaj | Il s'agit du taux de présence de digues qui empêche la connectivité naturelle entre la plaine alluviale et le cours d'eau. | A7 |
| MorphoRectif | Il s'agit des modifications du tracé du cours d'eau en général. | A8 |
| MorphoRecal | Il s'agit du taux de recalibrage du tronçon de la station, mais pas nécessairement de la rectification de celui-ci. | A10 |
| MorphoRipsisyl | Il s'agit du taux d'artificialisation et de l'entretien excessif de la ripisylve. | A12 |

Tableau 13 : Des données IPR utilisées pour l'automatisation de l'évaluation MQI

Bien que moins précis que son équivalent déterminé à partir d'une expertise et des relevés de terrain, le MQI calculé à partir de ce jeu de données est tout de même suffisamment complet pour permettre la comparaison avec les données Carhyce. Rappelons qu'il n'est pas nécessaire d'évaluer l'intégralité des catégories du MQI pour que la valeur de MQI soit calculable. Il suffit d'adapter le score maximal par rapport aux scores des classes évaluées (Rinaldi *et al.*, 2011). Les classifications IPR et des autres bases de données ont été adaptées pour qu'elles correspondent au score numérique du MQI. Le MQI a été calculé à partir des 17 paramètres F1, F6, F7, F9, F10, F12, F13, A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8, A10 et A12 sur les un peu plus de 1100 stations Carhyce des données IPR étaient disponibles (Figure 32). Les 9 catégories manquantes n'ont pu être calculées, faute de données correspondantes. Il s'agit notamment des catégories concernant les évolutions de la stations (v).

| Indicators | Assessed parameters |
|---|--|
| Geomorphological functionality | |
| IPR F1 – Longitudinal continuity in sediment and wood flux | Presence of crossing structures altering sediment and wood continuity |
| F2 – Presence of a modern floodplain | Width and longitudinal length of a modern floodplain |
| F3 – Hillslope – river corridor connectivity | Presence and length of elements of disconnection on river sides |
| F4 – Processes of bank retreat | Presence/absence of retreating banks |
| F5 – Presence of a potentially erodible corridor | Width and longitudinal length of an erodible corridor |
| ROE + Syrah F6 – Bed configuration – valley slope | Identification of bed configuration and comparison with expected bed configuration based on valley slope |
| IPR F7 – Planform pattern | Percentage of the reach length with alteration of planform pattern |
| F8 – Presence of typical fluvial forms in the floodplain | Presence/absence of fluvial forms in the alluvial plain |
| IPR F9 – Variability of the cross section | Percentage of the reach length with alteration of the natural heterogeneity of cross section |
| IPR F10 – Structure of the channel bed | Presence/absence of alterations of bed sediment |
| Carhyce F11 – Presence of in-channel large wood | Presence/absence of large wood |
| Carhyce F12 – Width of functional vegetation | Mean width of functional vegetation in the fluvial corridor |
| Carhyce F13 – Linear extension of functional vegetation | Longitudinal length of functional vegetation along the banks |
| Artificiality | |
| IPR A1 – Upstream alteration of flows | Amount of changes in discharge caused by interventions upstream |
| IPR A2 – Upstream alteration of sediment discharges | Presence, type, and position (drainage area) of relevant structures responsible for bedload interception (dams, check-dams, weirs) |
| ROE A3 – Alteration of flows in the reach | Amount of changes in discharge within the reach |
| ROE A4 – Alteration of sediment discharge in the reach | Type and density of structures intercepting bedload along the reach |
| ROE A5 – Crossing structures | Spatial density of crossing structures |
| Carhyce A6 – Bank protections | Length of protected banks |
| IPR A7 – Artificial levees | Length and distance from the channel of artificial levees |
| IPR A8 – Artificial changes of river course | Percentage of the reach length with artificial modifications of the river course |
| A9 – Other bed stabilization structures | Presence, spatial density and typology of other bed-stabilizing structures and revetments |
| IPR A10 – Sediment removal | Existence of past and/or recent sediment mining activity |
| A11 – Wood removal | Existence and relative intensity of in-channel wood removal |
| IPR A12 – Vegetation management | Existence and relative intensity of riparian vegetation cuts or aquatic vegetation removal |
| Channel adjustments | |
| CA1 – Adjustments in channel pattern | Changes in channel pattern from 1930s to 1960s based on changes in sinuosity, braiding, and anastomosing indices |
| CA2 – Adjustments in channel width | Changes in channel width from 1930s to 1960s |
| CA3 – Bed-level adjustments | Bed-level changes over the last 100 years |

Figure 32 : Synthèse des paramètres considérés pour le calcul du MQI et origine des données utilisées (d'après Rinaldi *et al.*, 2013)

La Figure 33 représente l'occurrence des scores MQI selon qu'il s'agisse de stations de référence ou non. On voit très clairement le décalage entre les deux jeux de données. Les stations de référence sont centrées sur les catégories « bonne » à « très bonne » (0,7-1) alors que les stations qui ne sont pas de référence ont un mode autour de 0,6 correspondant à un état moyen. On notera également que les stations de référence sont peu présentes dans la catégorie « moyenne » (0,5-0,7) et quasi absente des catégories « mauvaise » (0,3-0,5) et « très mauvaise » (0-0,3).

Lorsque l'on compare les valeurs d'IMG à leur classe de MQI, on remarque un lien évident entre ces deux indices (Figure 34). Malgré un certain recouvrement la médiane forme une courbe décroissante des stations de qualité très pauvre vers les stations de qualité très bonne, ce qui signifie que les valeurs d'IMG sont plus faibles pour les stations de très bonne qualité par rapport aux stations de très pauvre qualité. De même, la dispersion est plus faible pour les stations de bonne à très bonne qualité, et tous les valeurs d'IMG sont en dessous de 10. A l'inverse, la dispersion est plus forte pour les stations de très mauvaise à moyenne qualité, et les valeurs d'IMG vont jusqu'à 15, alors que les valeurs d'IMG minimum ne descendent pas

en dessous de 5. Les stations références ont été différenciées des stations non références sur la *Figure 35*. Il n'y a pas de boîte de dispersion qui représente la classe « très pauvre » dans les stations références car il n'y a qu'une seule station correspondant à cette catégorie. De même pour la classe « pauvre » des stations références, et « très pauvres » des stations non références, il n'y a que trois stations, l'écart que cette figure montre entre sa médiane et ses quartiles est donc très relatif.

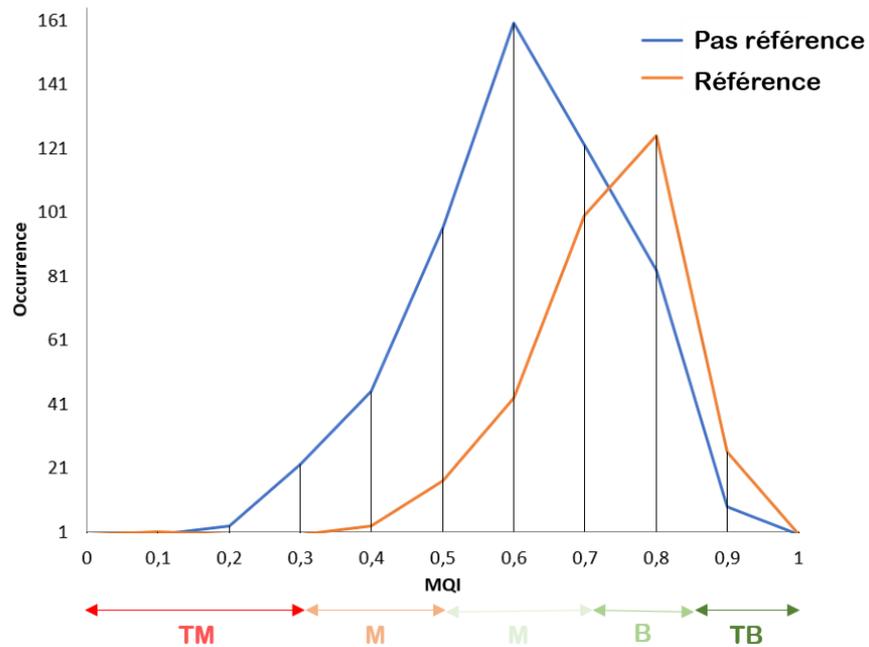


Figure 33 : Courbe d'occurrence du MQI des stations de référence et de non référence

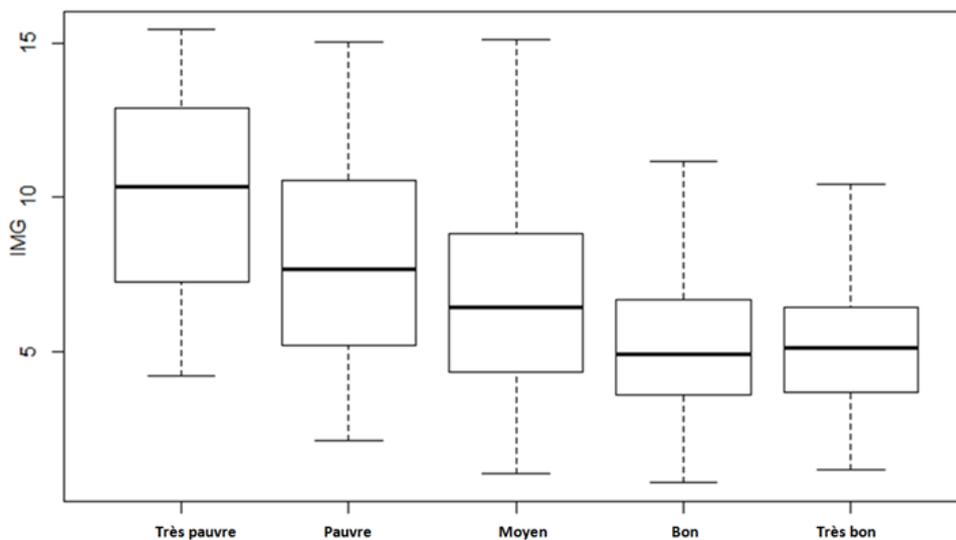


Figure 34 : Comparaison des IMG et du MQI pour l'ensemble du jeu de données

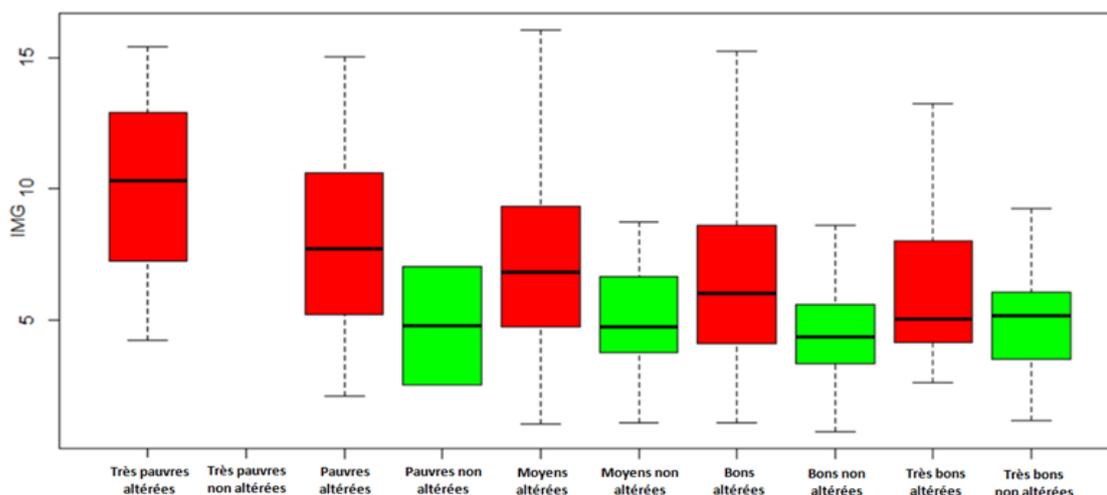


Figure 35 : Comparaison des IMG et du MQI entre stations références et non références

Pour les stations non références (en rouge), on note une courbe décroissante régulière de la médiane. Ainsi, malgré le fort recouvrement des différentes classes, ceci montre que plus la qualité de la station est bonne selon la valeur du MQI, plus la valeur de son IMG est basse ; confirmant que même à cette échelle, il existe bien un lien entre les évaluations apportées par le MQI et l'IMG. Autrement dit, bien que les types d'altération hydromorphologique étudiés par chacune des deux méthodes ne soient pas complètement identiques, les résultats convergent. L'écart entre les extrêmes est quant à lui un peu plus resserré pour les stations de qualité très bonnes, et un peu plus large pour les stations de qualité très pauvre, pauvre et moyenne. Cependant, les valeurs d'IMG les plus basses, c'est-à-dire les stations qui ont une géométrie de lit très proches de leurs modèles régionaux, se situent plutôt dans les stations dont la qualité est moyenne à bonne. Pourtant, ces classes comptent également des valeurs d'IMG assez élevées. Dès lors, on peut noter que s'il existe bien une tendance décroissante de la médiane, de nombreuses stations s'en écartent mettant en évidence la variété des situations et la complexité de l'évaluation hydromorphologique.

Pour les stations références (en vert), la tendance sur la médiane est moins marquée, même si on peut noter une légère augmentation entre la classe bonne et très bonne. Ici, il n'y a pas réellement d'écart entre les extrêmes, toutes les classes semblent avoir plus ou moins la même répartition. Cela peut s'expliquer par la réutilisation des données IPR pour systématiser le MQI. Les stations de référence Carhyce sont déjà définies à partir des données portant sur le rééquilibrage, la rectification du tracé du cours d'eau, la modification du débit ainsi que l'altération du transport solide. Toutes ces données ont été réutilisées pour calculer le MQI. Dès lors, les stations non altérées ont un MQI calculé à partir de ce qui a servi à les différencier des stations non altérées.

En conclusion, on peut dire que cette comparaison entre IMG et MQI a permis de montrer une convergence assez claire entre les deux indicateurs. Les stations de faible qualité hydromorphologique selon le MQI ont tendance à avoir des valeurs d'IMG élevées, et inversement. Si cette tendance est bien visible sur la *Figure 30* et la *Figure 31*, la corrélation reste toutefois assez faible, particulièrement lorsqu'on travaille « à l'aveugle » sur un très grand jeu de données (*Figure 34*). Les deux indicateurs ne renseignent en effet pas tout à fait la même chose et ne sont pas construits de la même façon. Un lit présentant de fortes marques d'anthropisation sera mal évalué par le MQI même si sa géométrie est conforme aux modèles

Carhyce. A l'inverse, un lit à la géométrie non conforme aux références régionales sera mal noté grâce à l'IMG mais ne sera pas forcément détecté par le MQI si les autres compartiments évalués présentent peu de traces d'anthropisation.

Cette comparaison nous permet également de rendre plus concrète et tangible la valeur de l'IMG calculée à partir des données Carhyce. En effet, la comparaison de terrain et le jeu de données IPR indiquent qu'une valeur d'IMG à 6 semble être une limite assez évidente sous laquelle les stations doivent être considérées comme conformes aux références régionales : d'abord, car cette valeur correspond à, en moyenne, un écart aux modèles inférieur à 1 écart-type pour chacun des paramètres mais également car la majorité des stations classées comme bonnes et très bonnes ont une valeur d'IMG inférieure à 6. Toujours en se basant sur la comparaison MQI-IMG un second seuil semble pouvoir être placé autour d'une valeur d'IMG de 7,5. Il apparaît moins clairement mais c'est en effet autour de cette valeur que la majorité des stations classées moyennes se situent. Enfin, un dernier seuil pourrait être placé autour d'une valeur d'IMG de 9, au-delà de laquelle les stations seraient manifestement en mauvais état. Ces seuils permettent, en première approche, une interprétation absolue de l'IMG mais demandent à être étudiés au regard de l'ensemble du jeu de données Carhyce (voir chapitre suivant) et validés à partir d'un plus grand nombre d'observations de terrain.

III.3 Éléments pour la lecture et l'interprétation de l'Indicateur Morphologique Global

L'IMG synthétise les écarts aux modèles de référence régionaux pour 6 paramètres (profondeur, largeur, surface mouillée, rapport largeur/profondeur tous mesurés à pleins bords ainsi que la pente et la profondeur des mouilles). Une valeur d'IMG faible correspond à un faible écart aux modèles. A l'inverse, une valeur élevée indique que l'opération, pour la station considérée, s'écarte d'au moins un des 6 modèles. Sa morphologie peut donc être d'autant considérée comme moins conforme aux références de sa région. Pour aider les utilisateurs à mieux l'interpréter, la distribution des IMG dans la banque de données Carhyce a été étudiée. La *Figure 36.A* compare, à l'ensemble des stations indifférenciées, les valeurs d'IMG des stations de référence toutes HER confondues. Les valeurs d'IMG des références sont très significativement plus faibles que celui du reste de la banque de données ($p\text{-value} < 0.001$ sur le test de comparaison des moyennes). Pour rappel, les opérations parmi les stations indifférenciées comportent toutes types de station, c'est-à-dire des stations qui pourraient faire partie des références et d'autres présentant tous les niveaux d'altération possibles. La médiane des valeurs d'IMG des opérations menées sur les plus de 500 stations de référence se situe sous la valeur de 5 (médiane = 4,52 ; Référentiel v1.0), et 78% de ces stations ont une valeur d'IMG inférieure à 6. La médiane du reste des opérations est nettement plus élevée puisqu'elle approche la valeur de 6,5. Cette première observation conforte l'idée que la valeur de 6, proposée pour l'IMG dans le chapitre précédent, est un seuil pertinent pour discriminer les stations conformes aux modèles de référence ou, autrement dit, si l'on accepte le raccourci sémantique, les stations en bon état morphologique. De la même façon, ceci suggère que, permis ces stations proches des références, la valeur de 4,5 puisse être utilisée pour discriminer les stations très proches de tous les modèles.

La *Figure 36.B* apporte d'autres éléments de réponse. Les stations altérées ont en effet été retirées des stations qui avaient été identifiées comme indifférenciées, ceci à l'aide des données IPR. Ces stations ont été identifiées comme ne pouvant pas non plus appartenir aux références. Le degré d'altération n'est pas connu mais l'on sait qu'elles ont connu une modification de leur tracé ou de leur géométrie et/ou une perturbation de leur débit solide ou liquide. Les stations indifférenciées regroupent ici aussi toutes les situations (de potentielles références à fortes altérations). La situation des stations altérées se démarque encore plus clairement des références. La médiane des valeurs d'IMG des stations altérées est cette fois proche de 7,5 et 25% des opérations dépassent la valeur de 10.

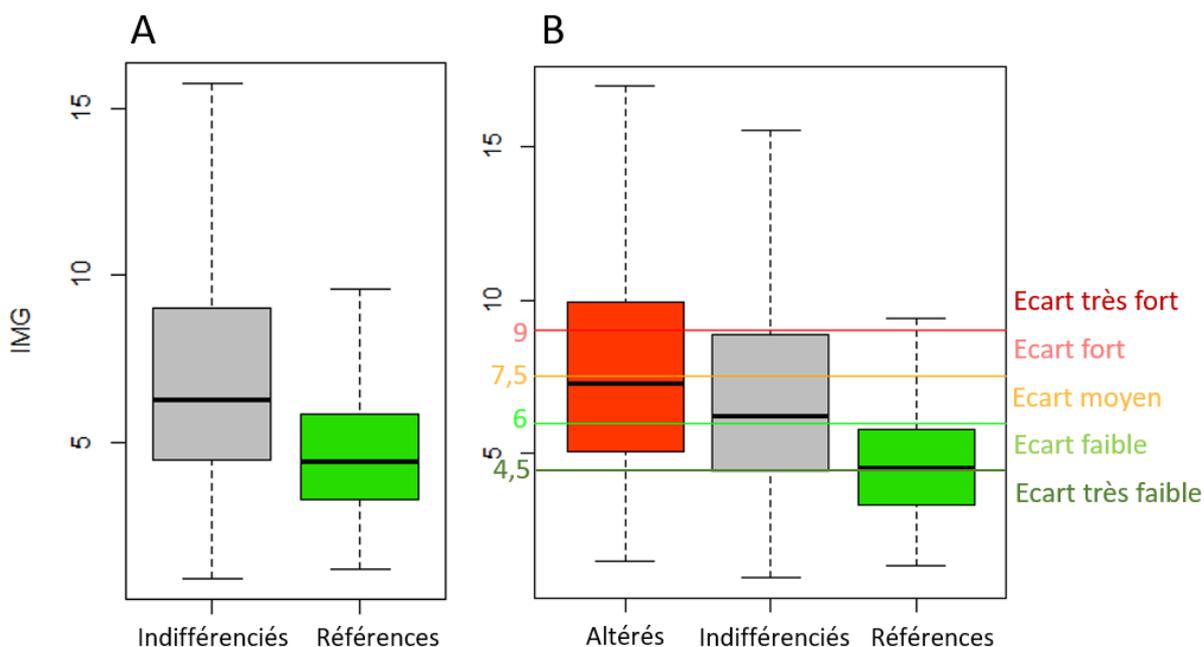


Figure 36 : A. Comparaison des valeurs d'IMG pour les opérations sur stations de référence et les opérations sur stations indifférenciées (nombre d'opérations : 3237 dont 531 références) ; B. Comparaison des valeurs d'IMG pour les opérations sur stations de référence, indifférenciées et/ou altérées (nombre d'opérations : 3237 dont 531 références et 479 altérées)

La *Figure 37* permet de mieux voir la distribution des opérations au sein des trois types (références, altérées, indifférenciées) et ainsi mettre en évidence le fort recouvrement ; indiquant que de nombreuses opérations sur stations identifiées comme altérées ont révélé une morphologie du chenal proche des modèles. Ainsi un peu plus de 30% des opérations sur des stations considérées comme altérées se situent sous ce seuil de 6, un autre tiers se trouve entre 6 et 9 et le dernier tiers au-delà de 9. A l'inverse, la distribution des références est assez homogène. Ainsi, sous le seuil de 6, 78% de ces opérations sont retrouvées. Logiquement, les opérations indifférenciées se trouvent dans une situation intermédiaire puisqu'elles comprennent des situations variées.

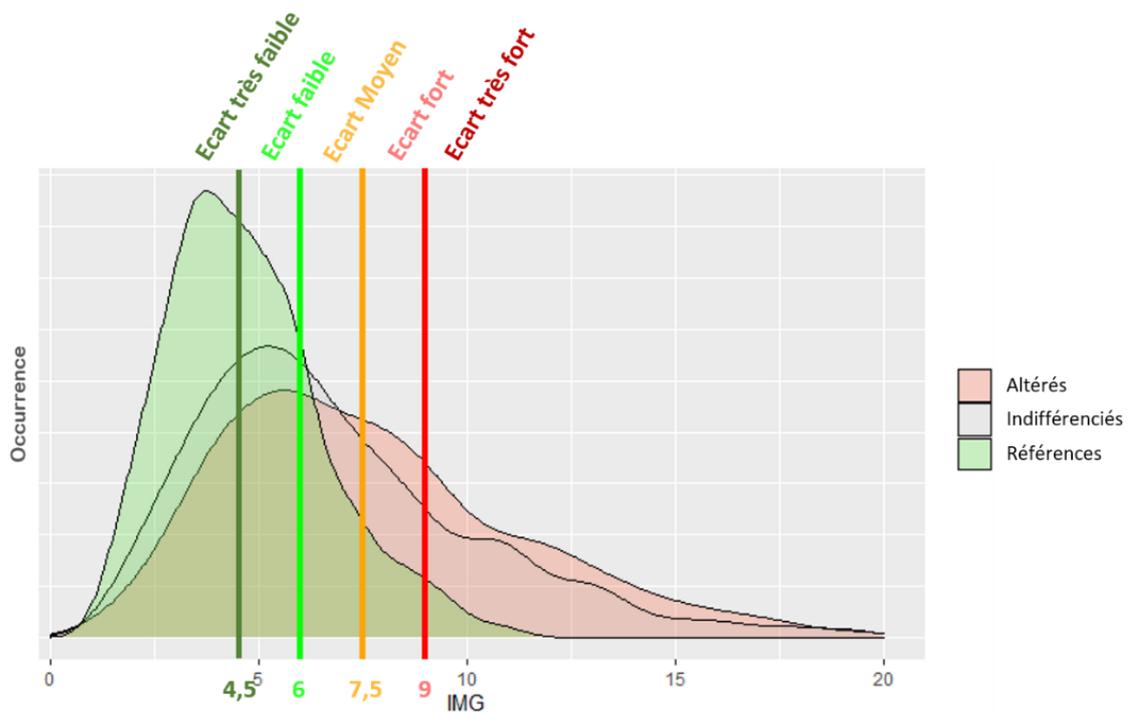


Figure 37 : Distribution des valeurs d'IMG pour les stations de cas références, indifférenciés et altérés

De cette analyse de la distribution des valeurs d'IMG à travers le jeu de données Carhyce et de la comparaison avec le MQI présentée au chapitre précédent, cinq seuils pour caractériser l'écart aux références sont finalement proposés :

- une valeur d'IMG inférieure à 4,5 caractérise les stations ayant un écart très faible à la situation de référence, traduisant une géométrie conforme aux cours d'eau peu anthropisés de la région considérée ;
- une valeur comprise entre 4,5 et 6 est considérée comme un faible écart aux références régionales ;
- une valeur située entre 6 et 7.5 est considérée comme un écart moyen aux références ;
- une valeur entre 7.5 et 9 comme un écart fort ;
- au-delà de 9 l'écart est très fort, caractérisant une géométrie qui s'éloigne fortement des références régionales.

L'écart aux références peut ainsi être utilisé avec précaution comme un indicateur de qualité mais reste par définition un indicateur d'écart ou de conformité à des références régionales. Si un parallèle peut être fait avec les classes proposées par Rinaldi *et al.*, un écart « faible » correspondrait au « très bon » et « bon état » du MQI, l'écart « moyen » à l'état « moyen », le « fort » écart au « mauvais état » et le « très fort » écart au « très mauvais état ». Comme l'a démontré la comparaison avec l'indicateur développé par Rinaldi *et al.*, l'IMG s'écarte parfois fortement du MQI. Un écart important aux modèles de géométrie traduit par l'IMG ne se traduit pas forcément par une faible valeur de MQI et un faible écart aux modèles de référence Carhyce n'est pas toujours synonyme de bon score selon l'indicateur italien. L'IMG ne doit donc pas être utilisé comme un outil qui permettrait l'évaluation générale de la qualité hydromorphologique d'une station. A travers la géométrie, il permet une partie de cette évaluation et la quantification d'un écart à une référence.

Le but est bien ici de fournir une grille de lecture commune de l'IMG d'une part et d'y associer à termes, d'autre part, dans le cadre des futurs travaux, les autres compartiments (ripisylve et substrat notamment), dans un indicateur multi-compartiments, ceci en gardant la richesse du jeu de données Carhyce et surtout sa valeur liée à l'objectivité des données prises sur le terrain, et non de calculer un MQI.

IV. Les potentialités du Lidar pour la caractérisation hydromorphologique

Des réflexions sont actuellement menées sur l'adaptation du protocole Carhyce aux grands cours d'eau à partir de données et méthodes de télédétection, ceci pour des questions d'accessibilité, de dangerosité ou encore de temps d'acquisition. Une des pistes explorées repose sur l'utilisation de données lidar qui sont des données topographiques à forte densité et haute précision. La technologie Lidar (*light detection and ranging*) repose sur un principe de télédétection active (i.e. le capteur produit sa propre énergie). L'émetteur-récepteur émet un signal lumineux vers la surface à cartographier et enregistre le retour d'onde renvoyé par les éléments de la surface (végétation, bâtiment, sol, ...). Cette technologie est utilisée depuis plusieurs années pour différents types d'applications et montrent en particulier en net avantage par rapport à la photogrammétrie dans les secteurs sous couvert végétal. Le Lidar permet en effet de produire des modèles numériques de terrain (MNT), c'est-à-dire de décrire l'altitude du sol, même sous couvert végétal.

En hydromorphologie, deux types de surfaces sont intéressantes : les surfaces immergées (fond du lit) et les surfaces émergées (berges et la plaine alluviale). Les données Lidar utilisées le plus couramment sont des données de Lidar dit topographique utilisant les longueurs d'onde du proche infrarouge (1064 nm). Ces longueurs d'onde permettent bien de caractériser les surfaces émergées mais sont absorbées par les surfaces en eau. Des Lidars dit bathymétriques utilisant les longueurs d'onde du vert (532 nm) permettent eux de caractériser les surfaces immergées.

Depuis quelques années, des instruments dit Lidars topo-bathymétriques permettent la combinaison des deux longueurs d'onde, présentant un fort potentiel pour la caractérisation des corridors fluviaux. Pour explorer le potentiel de ces données, a été acquis un levé Lidar topobathymétrique réalisé par la plateforme « Lidar topo-bathymétrique Nantes-Rennes » sur un tronçon du Cher de 10 km environ à l'aval de Saint-Amand-Montrond. Cette acquisition a permis d'observer les limites de ces données pour des rivières comme le Cher.

Pour rappel préalable, notons que la profondeur atteinte dépend de plusieurs facteurs : la nature du fond (meilleure détection lorsque le fond est clair et réfléchissant), la turbidité de l'écoulement, sa turbulence, la présence de végétation aquatique (Lague et Feldmann, 2020).

Sur le tronçon acquis, le levé n'a pas permis de décrire le fond du lit. Ainsi, les travaux s'orientent vers l'utilisation de données reconstruites à partir de MNT Lidar de l'IGN (RGE Alti) et de données de bathymétrie de terrain. Ces MNT sont issus de données Lidar topographiques acquises dans le cadre de la directive inondation (2007/60/CE) et disponibles sur les grandes plaines d'inondations françaises. Les données sont fournies au format raster avec un pas d'1 m et une précision altimétrique entre 0.2 et 0.5 m.

En exploitation, la première problématique est de savoir comment repérer le niveau à pleins bords des rivières en se basant sur le MNT, lequel va permettre de calculer les variables de géométrie hydraulique (largeur, profondeur, surface de la section mouillée à pleins bords).

Deux stages de master ont ainsi été mis en œuvre sur le sujet (Dunesme, 2015 ; Fermen, 2021). Les travaux réalisés dans le cadre du stage de S. Dunesme (2015) repris dans Thommeret et *al.* (2016) ont permis une première exploration des méthodes à partir de données reconstruites sur différents sites. Ce travail propose une approche pour détecter le niveau à pleins bords sur un tronçon, approche basée sur l'hypothèse forte selon laquelle, pour une berge donnée, le niveau à pleins bords se situe à la même hauteur en moyenne par rapport au fond du lit. Ce niveau est repéré à partir de la courbure longitudinal dérivée du MNT. Celle-ci est égale à la courbure du terrain dans le sens de la pente la plus forte, correspondant ici à la pente dans le sens de la berge (perpendiculairement à l'écoulement). Les valeurs de courbure les plus fortes permettent d'identifier les ruptures de pentes que l'on suppose représenter la limite du haut de la berge. Cette méthode automatique a montré de bon résultat (erreur < 10%) sur un tronçon de l'Yonne possédant une géométrie simple bien marquée avec un chenal unique. Toutefois, cette méthode retient le premier niveau du lit comme le niveau à pleins bords ; ce choix ne permettant pas d'obtenir des résultats satisfaisants dans le cas de rivières comme le Gardon où la détermination du plein bord n'est pas évidente (*Figure 38*).

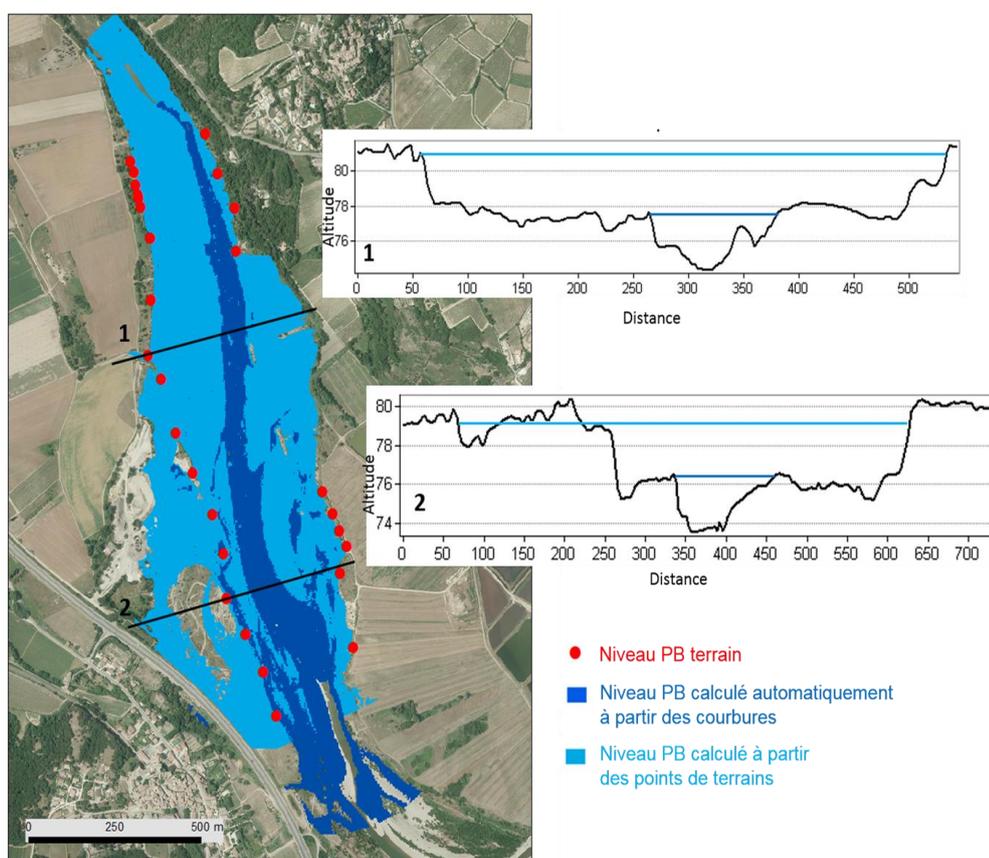


Figure 38 : Comparaison des niveaux obtenus sur le site du Gardon par deux différentes méthodes : le calcul automatique à partir des courbures longitudinales et le calcul guidé par des points de terrain

Dans le cadre des travaux de N. Fermen (2021, en cours), l'étude est menée à l'échelle du transect à partir d'une méthode basée sur la profondeur hydraulique. Ces méthodes ont déjà été mises en œuvre notamment par De Rosa *et al.* (2019) mais montre les mêmes limites dès que le chenal à pleins bords est plus complexe. Sont alors testés différents critères pour : 1) gérer les chenaux multiples et 2) gérer les géométries de berges plus complexes pour notamment ne pas forcément considérer le premier niveau, celui-ci pouvant être une simple

banquette alluviale. La méthode automatisée a été établie sur un tronçon du Cher entre Saint-Amand-Montrond et Bruyères-Allichamps puis appliquée à un plusieurs tronçons présentant des styles de géométrie différents. Les résultats obtenus sont encourageants (*Figure 39*). La comparaison du niveau à pleins bords obtenue sur le secteur test et une détermination experte montre une différence moyenne de 35 cm.

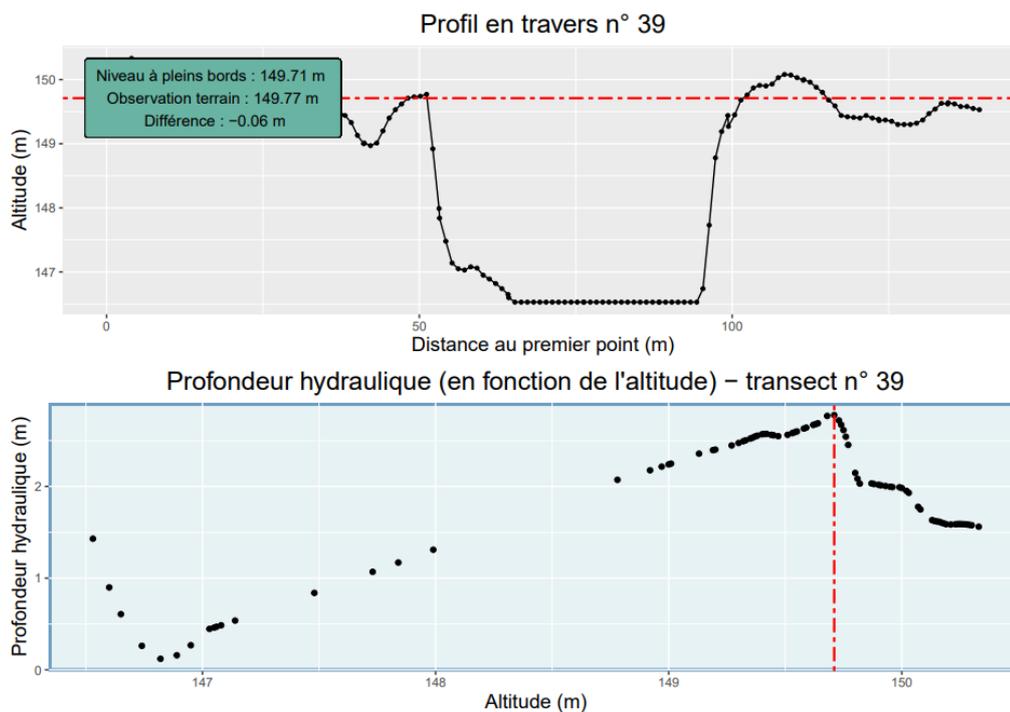


Figure 39 : Exemple d'application de la méthode mise en œuvre dans le cadre du stage de N. Fermen (2021)

La méthode permet de détecter le niveau à pleins bords puis de calculer la largeur associée à partir d'un MNT topographique au pas d'1m. La prochaine étape mise en œuvre dans le cadre de la prochaine convention sera d'intégrer des données bathymétriques pour avoir une continuité chenal en eau-berge pour le calcul de la profondeur et de la surface mouillée.

V. Bibliographie

- Amrhein V., Korner-Nievergelt F. et Roth T., 2017. The earth is flat ($p > 0.05$): significance thresholds and the crisis of unreplicable research. *PeerJ*:e3544, 40p.
- Amrhein V., Greenland S. et McShane B., 2019. Scientists rise up against statistical significance. *Nature*, 567, 305-307.
- Asconit Consultants – Dynamique Hydro – Hydreco, 2014. Développement méthodologique et informatique du Référentiel Hydromorphologique UltraMarin applicable à la Guadeloupe, à la Guyane, à la Martinique, à la Réunion et à Mayotte. Rapport méthodologique avec préface. Maîtrise d'œuvre Asconit, Dynamique Hydro, Hydreco sous maîtrise d'ouvrage Office national de l'eau et des milieux aquatiques, les Offices de l'eau et la Direction de l'environnement, de l'aménagement et du logement de Mayotte, 79 p.
- Bache J.-J., 1982. Les gisements d'or dans le monde, essai de typologie quantitative. Orléans, BRGM, mémoire n° 118, 102 p.
- Baudoin J.-M., Boutet-Berry L., Cagnant M., Gob F., Kreutzenberger K., Lamand J.-M., Malavoi J.-R., Marmonier P., Pénil C., Rivière C., Sadot M., Tamisier V., Tual M., 2017. Carhyce. Protocole de recueil de données hydromorphologiques à l'échelle de la station sur les cours d'eau prospectables à pied. AFB, 56p.
- Belletti B., Rinaldi M., Buijse A. D., Gurnell A. M. et Mosselman E., 2017. A review of assessment methods for river hydromorphology. *Environmental earth sciences*, 22p.
- Charlet L., Roman-Ross G., Spadini L., Rumbach G., 2003. Solid and aqueous mercury in remote river sediments (Litani River, French Guyana, South America). *J. phys.*, IV, *XIIth International Conference on Heavy Metals in the Environment*. vol. 107 (1), 281-284.
- De Rosa P., Fredduzzi A., Cencetti C., 2019. A GIS-Based Tool for Automatic Bankfull Detection from Airborne High Resolution Dem, *ISPRS Int J. Geo-Inf*, 8(11), 480, 10-20.
- Dunesme S., 2015. Caractérisation hydromorphologique des cours d'eau à partir de données LiDAR bathymétrique. Master 1 Géographie, UFR 08, Université Panthéon - Sorbonne (Paris 1)
- Fermen N., 2021. Calcul de la largeur à pleins bords de grands cours d'eau à partir de MNT lidar, Mémoire de fin d'études, Le Cnam-ESGT.
- Fraser D.A.S. et Reid N., 2016. Crisis in science. Or crisis in statistics! Mixed messages in statistics with impact on science. *Journal of statistical research*, vol 48-50, 1-9.
- Fraudin C., 2020. Comparaison des outils d'évaluation hydromorphologique pour la restauration écologique des cours d'eau. Master 1 Géographie, UFR 08, Université Panthéon-Sorbonne (Paris 1)

- Fritsch, J.M. et Sarrailh, J.M., 1986. Les transports solides dans l'écosystème forestier tropical humide Guyanais: effets du défrichement et de l'aménagement de pâturages. Cahiers ORSTOM, Série Pédologie 22 (2), 209-222.
- Gob F., Bilodeau C., Thommeret N., Belliard J., Albert M.-B., Tamisier V., Baudoin J.-M., Kreutzenberger K., 2014. Un outil de caractérisation hydromorphologique des cours d'eau pour l'application de la DCE en France (CARHYCE). *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 1, 57-72.
- Gob F., Bilodeau C., Thommeret N., Tamisier V., Belliard J., Albert M.-B., 2015. Vers la construction d'indicateurs hydromorphologiques soutenant la biologie à partir de la base de données nationale CARHYCE. Rapport scientifique CNRS (LGP-LADYSS)/Université de Paris Panthéon-Sorbonne/ESGT/Irstea/AFB, 71 p.
- Grimaldi M., Gaudet J.-P., Grimaldi C., Melieres M.A., Spadini L., 2001. Sources, stocks et transfert dans les sols et sédiments, Programme mercure en Guyane, Rapport Final, 1ère partie, 4-35.
- Guedron S., 2008. Impact de l'exploitation minière en Guyane française sur les flux de mercure vers les écosystèmes aquatiques. *Géochimie*. Université Joseph-Fourier - Grenoble I.
- Hiez, G. et Dubreuil, P., 1963. Les régimes hydrologiques en Guyane Française. Publication ORSTOM- Paris, 308.
- Kreutzenberger K., Gautier-Costard E., Rhoné M., Clavier S., Rey S. et Gavrila A., 2019. RHYSOG : Réhabilitation hydromorphologique de sites d'orpaillage guyanais. Synthèse de mission d'expertise collective de juin 2019. 35 pages.
- Lague D. et Feldmann B., 2020. Topo-bathymetric airborne LiDAR for fluvial-geomorphology analysis, *Developments in Earth Surface Processes*, 23, 25-54
- Laperche V., Maury-Brachet R., Dominique Y., Durrieu G., Blanchard F., Massabuau J.C., Callier L., Weng P., Bouillard H., Joseph B. et Laporte P., 2007. Répartition régionale du mercure dans les sédiments et les poissons de six fleuves de Guyane - Rapport BRGM/Rp-55613-FR, 61 p.
- Laperche V., Nontanovanh M., Thomassin J.F., 2008. Synthèse critique des connaissances sur les conséquences environnementales de l'orpaillage en Guyane - Rapport BRGM/RP-56652-FR - Décembre 2008, 73 p., 19 ill. et 12 tabl.
- Marzin A., Verdonschot P.F.M., Pont D., 2013. The relative influence of catchment, riparian corridor, and reach-scale anthropogenic pressures on fish and macroinvertebrate assemblages in French rivers. *Hydrobiologia* 704, 375-388.
- Monfort M. et Ruf L., 2005. Régime hydrologique des fleuves guyanais: étude fréquentielle des débits. DIREN, Guyane, 36 p.

- Oberdorff T., Pont D., Hugueny B., Belliard J., Berrebi dit Thomas R., Porcher J.P., 2002. Adaptation et validation d'un indice poisson (FBI) pour l'évaluation de la qualité biologique des cours d'eau français. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture* 365/366, 405-433.
- Orru J.-F., 1995. La nouvelle dynamique de l'exploitation aurifère. Mémoire DEA, univ. Paris-III, 150 p.
- Orru J.-F., 2001. Typologie des exploitations aurifères de Guyane et spécificités du contexte socio-économique local. In : Carmouze Jean-Pierre (ed.), Lucotte M. (ed.), Boudou A. (ed.) Le mercure en Amazonie : rôle de l'homme et de l'environnement, risques sanitaires. Paris : IRD, 425-446. (Expertise Collégiale). ISBN 2-7099-1467-0
- Préfecture de la région Guyane, 2011. Schéma Départemental d'Orientation Minière (SDOM).
- Rinaldi M., Surian N., Comiti F., Bussetini M., 2011. The Morphological Quality Index (MQI) for stream evaluation and hydromorphological classification. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 11, 17-36.
- Rinaldi M., Surian N., Comiti F., Bussetini M., 2013. A method for the assessment and analysis of the hydromorphological condition of Italian streams: The Morphological Quality Index (MQI). *Geomorphology* 180–181, 96-108.
- Rinaldi M., Surian N., Comiti F. and Bussetini M., 2014. IDRAIM – Sistema di valutazione idromorfologica, analisi e monitoraggio dei corsi d'acqua. ISPRA, Manuali e Linee Guida 113/2014. Roma, giugno 2014, 402 p.
- Rinaldi M., Surian N., Comiti F. and Bussetini M., 2016. Guidebook for the evaluation of stream morphological conditions by the Morphological Quality Index (MQI). ISPRA, 177 p.
- Rinaldi M., Belletti B., Bussetini M., Comiti F., Golfieri B., Lastoria B., Marchese E., Nardi L., Surian N., 2017. New tools for the hydromorphological assessment and monitoring of European streams. *Journal of environmental management*, 202, 363-378.
- Roche M. A., 1978. Les bassins versants expérimentaux Ecérex en Guyane française : étude comparative des écoulements et de l'érosion sous forêt tropicale humide. Cahiers ORSTOM, Série Hydrologie 15 (4), 365-378.
- Roulet M., Lucotte M., 1995. Geochemistry of mercury in pristine and flooded ferralitic soils of a tropical rain forest in French Guiana, South America. *Water, Air and Soil Pollution*, 80 : 1079-1088. DOI : 10.1007/BF01189768
- Sondag F., Guyot J.L., Moquet J.S., Laraque A., Adele G., Cochonneau G., Doudou J.C., Lagane C., Vauchel P., 2010. Suspended sediment and dissolved load budgets of two Amazonian rivers from the Guiana shield : Maroni river at Langa Tabiki and Oyapock river at Saut Maripa (rench Guiana). *Hydrological Processes* 24 (11), 1433-1445.

Tamisier V., Gob F., Bilodeau C. et Thommeret N., 2017a. Caractérisation hydromorphologique des cours d'eau français (Carhyce). Valorisation des données Carhyce pour la construction d'un outil d'aide à la gestion des cours d'eau. Rapport scientifique CNRS (LGP - LADYSS) / Université de Paris Panthéon-Sorbonne / ESGT / AFB, 142 p.

Tamisier V., Raufaste S., Gob F., Thommeret N. et Bilodeau C., 2017b. Caractérisation hydromorphologique des cours d'eau français d'Outre-mer (Carhyce). Spécificités, modalités d'application et valorisation des données Carhyce pour la construction d'un outil d'aide à la gestion des cours d'eau. Rapport scientifique CNRS (LGP - LADYSS) / Université de Paris Panthéon-Sorbonne / ESGT / AFB, 128 p.

Thomassin J.-F., Urien, P., Verneyre, L., Charles N., Galin R., Guillon, D., Boudrie, M., Cailleau A., Matheus P., Ostorero C., Tamagno D., 2017. Exploration et exploitation minière en Guyane. Collection « La mine en France ». Tome 8, 141 p., 41 fig., 2 tabl., 7 ann.

Wasson J.-G., Chandesris A., Pella H., Blanc L., 2002. Metropolitan France Hydro-Ecoregions. Regional Approach to the Typology of Flowing-Water and Components for the Definition of Reference Invertebrate Populations. French Ministry of Ecology and Sustainable Development, Cemagref BEA / LHQ, 190 p.

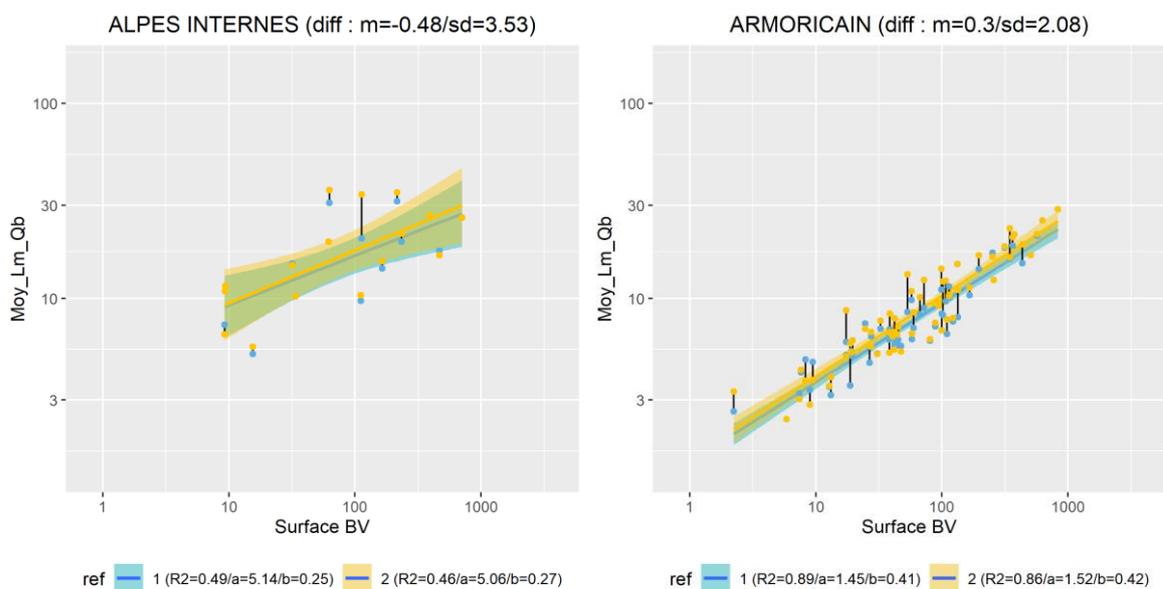
VI. Annexes

VI.1 Comparaisons des référentiels

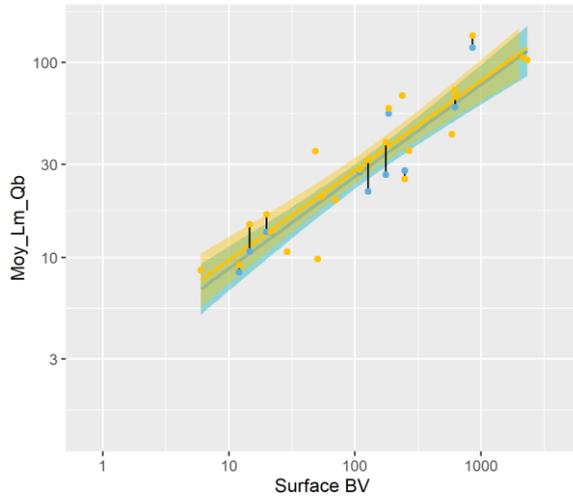
Sur ces graphiques sont indiqués : la moyenne (moy) et l'écart-type (sd) liant les différences entre les deux passages, ainsi que les coefficients des équations (1 : Référentiel v1.0 ; 2 : Référentiel v2.0).

Les points en bleu correspondent aux opérations propres au Référentiel v1.0. Les points en jaune représentent l'ensemble des opérations du Référentiel v2.0. Une station qui n'a fait l'objet que d'un seul passage (i.e. une seule opération) apparaît en jaune. Les segments en noirs permettent d'évaluer la différence entre les deux passages lorsqu'ils existent. Lorsqu'il y a une très grande différence, on peut se poser la question d'une erreur de saisie. Les erreurs de saisies vont notamment ressortir sur la profondeur des mouilles du fait du mode de calcul.

VI.1.1 Largeur à pleins bords

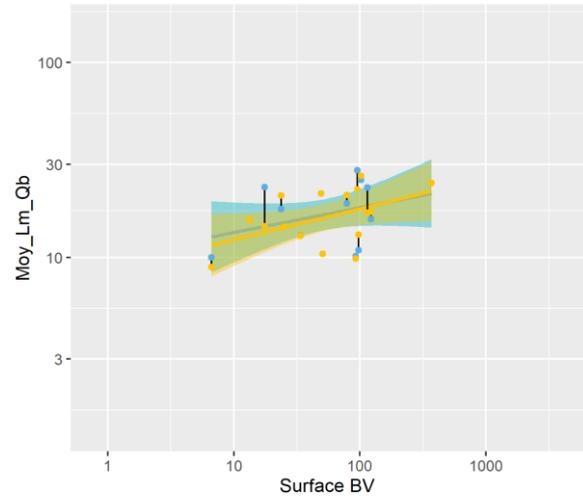


CEVENNES (diff : m=1.65/sd=6.28)



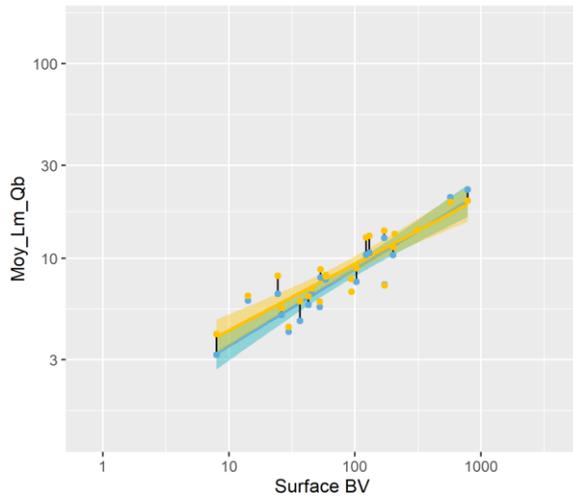
ref 1 (R2=0.86/a=2.96/b=0.47) 2 (R2=0.84/a=3.35/b=0.46)

CORSE (diff : m=-0.09/sd=0.89)



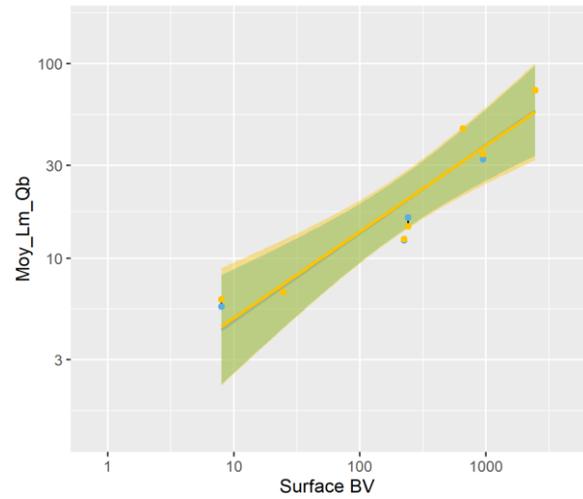
ref 1 (R2=0.14/a=10.01/b=0.13) 2 (R2=0.24/a=8.56/b=0.16)

COTES CALCAIRES EST (diff : m=0.44/sd=2.68)



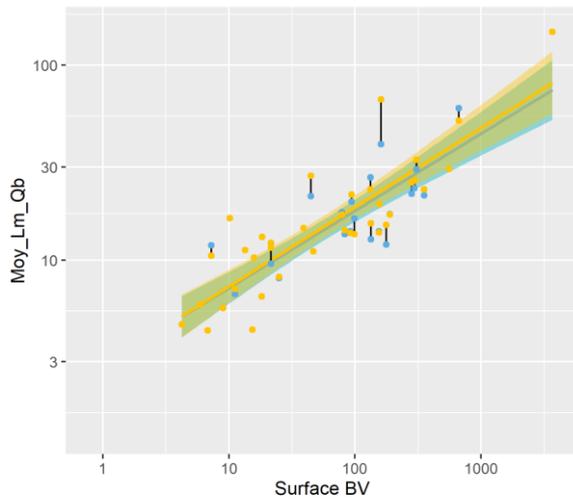
ref 1 (R2=0.85/a=1.43/b=0.39) 2 (R2=0.78/a=1.94/b=0.34)

GRANDS CAUSSES (diff : m=5.23/sd=12.8)



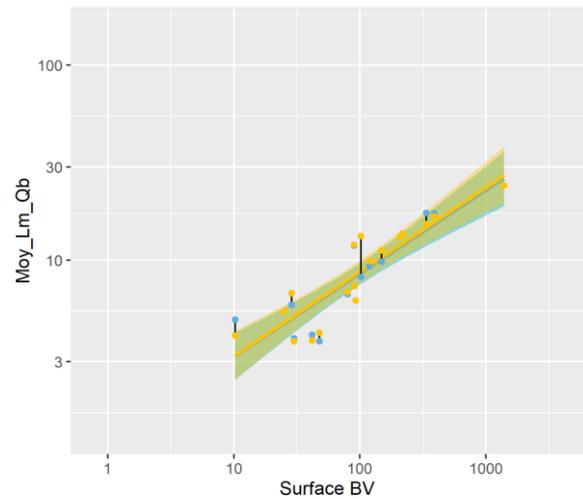
ref 1 (R2=0.9/a=1.68/b=0.45) 2 (R2=0.88/a=1.77/b=0.44)

JURA-PREALPES DU NORD (diff : m=0.32/sd=2.26)



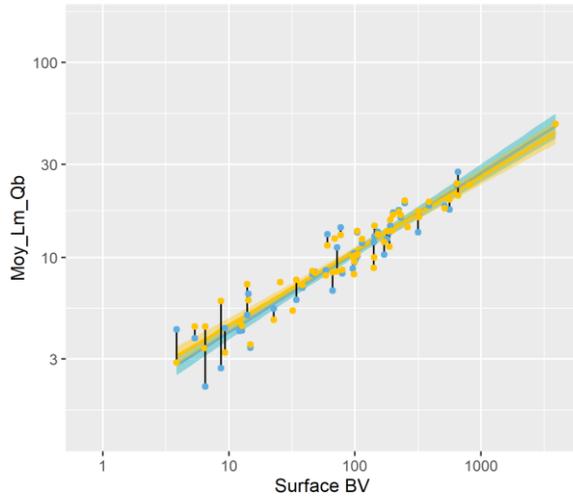
ref 1 (R2=0.74/a=2.89/b=0.4) 2 (R2=0.74/a=2.86/b=0.41)

LANDES (diff : m=1.42/sd=4.06)



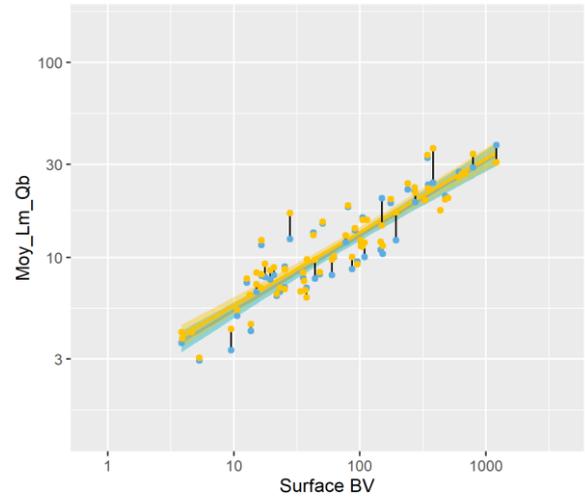
ref 1 (R2=0.81/a=1.19/b=0.43) 2 (R2=0.8/a=1.18/b=0.43)

MASSIF CENTRAL NORD (diff : m=1.43/sd=2.57)



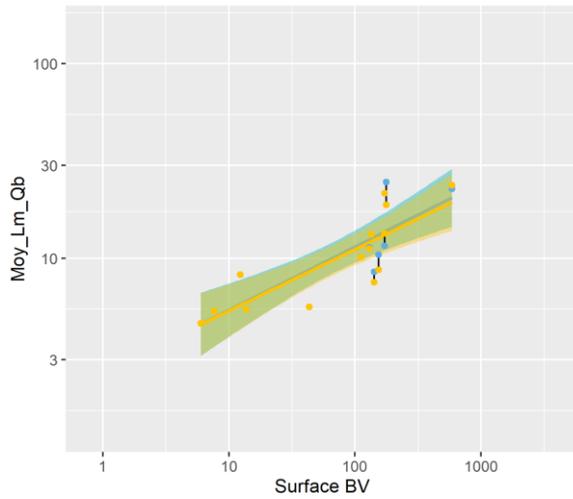
ref 1 (R2=0.9/a=1.62/b=0.41) 2 (R2=0.91/a=1.86/b=0.38)

MASSIF CENTRAL SUD (diff : m=0.22/sd=2.09)



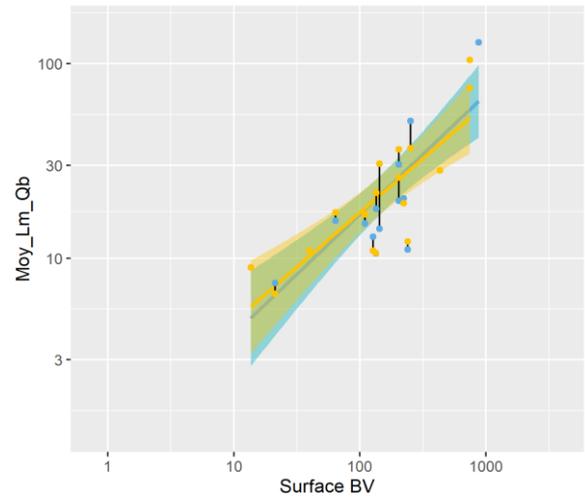
ref 1 (R2=0.85/a=2.21/b=0.38) 2 (R2=0.84/a=2.39/b=0.38)

MEDITERRANEEN (diff : m=0.11/sd=0.42)



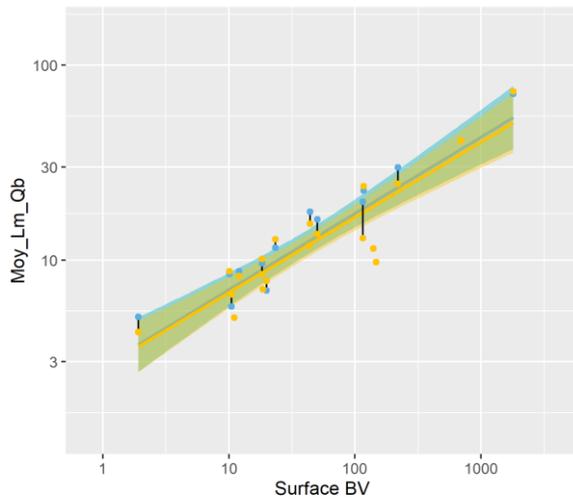
ref 1 (R2=0.7/a=2.55/b=0.33) 2 (R2=0.69/a=2.6/b=0.32)

PREALPES DU SUD (diff : m=-0.89/sd=3.72)



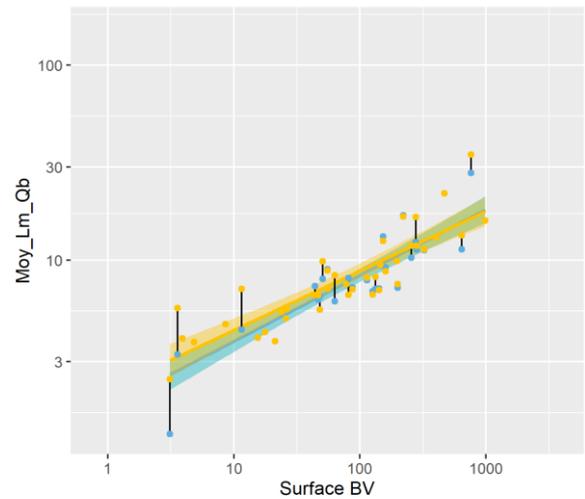
ref 1 (R2=0.69/a=0.98/b=0.62) 2 (R2=0.71/a=0.94/b=0.64)

PYRENEES (diff : m=0.82/sd=1.48)



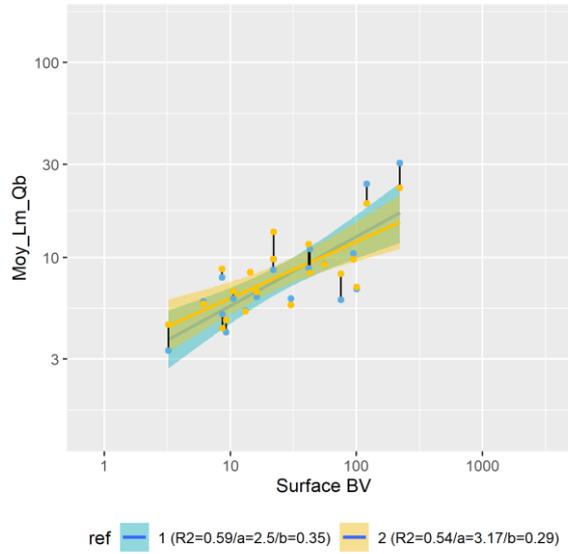
ref 1 (R2=0.82/a=2.86/b=0.39) 2 (R2=0.83/a=2.8/b=0.39)

TABLES CALCAIRES (diff : m=1.29/sd=4.36)



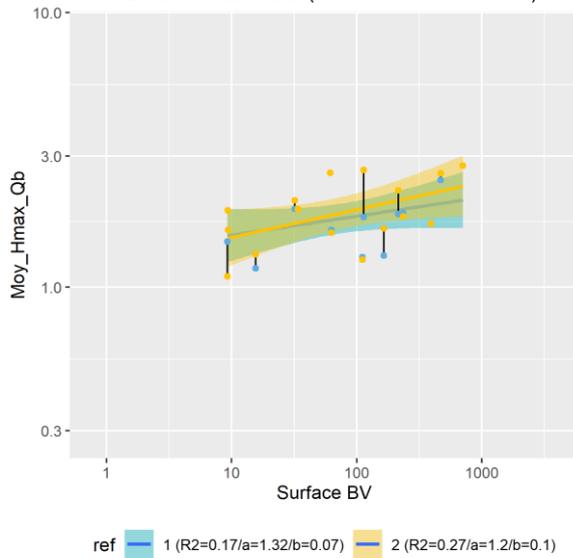
ref 1 (R2=0.82/a=1.76/b=0.34) 2 (R2=0.75/a=2.16/b=0.31)

VOSGES (diff : m=1.67/sd=5.68)

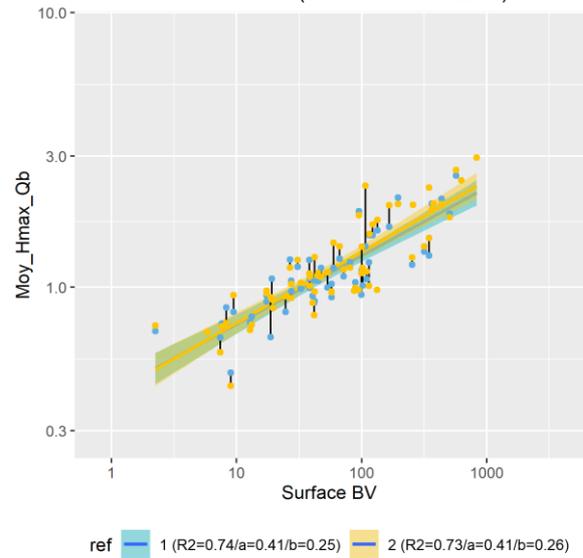


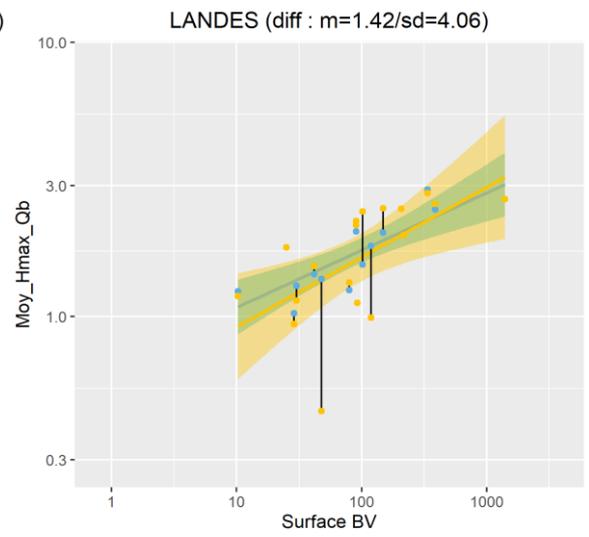
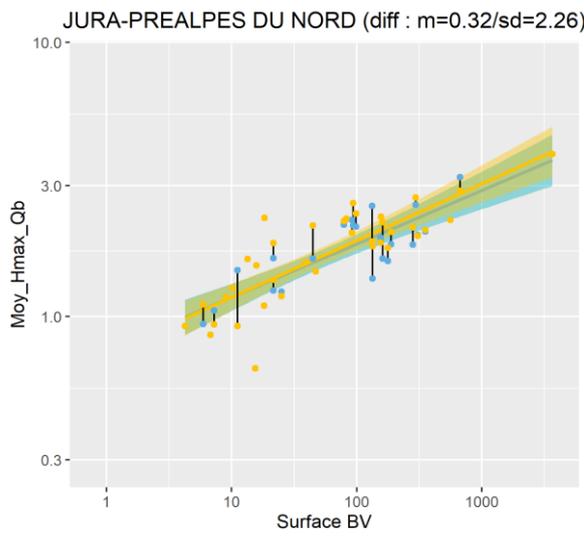
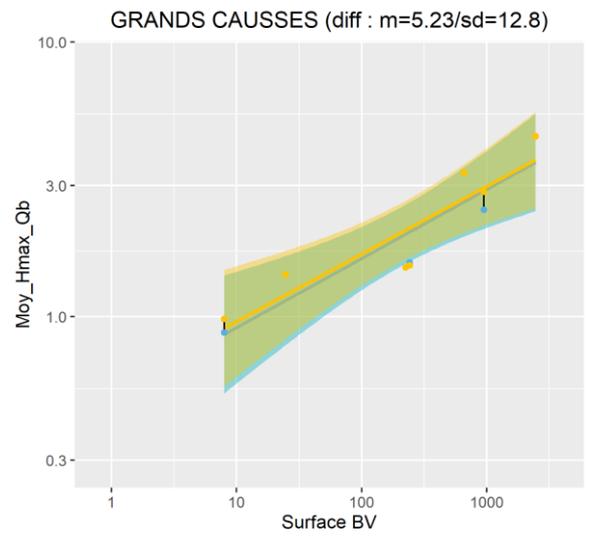
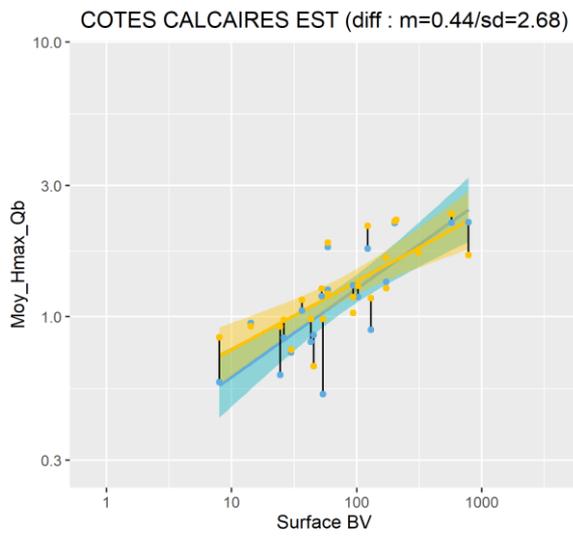
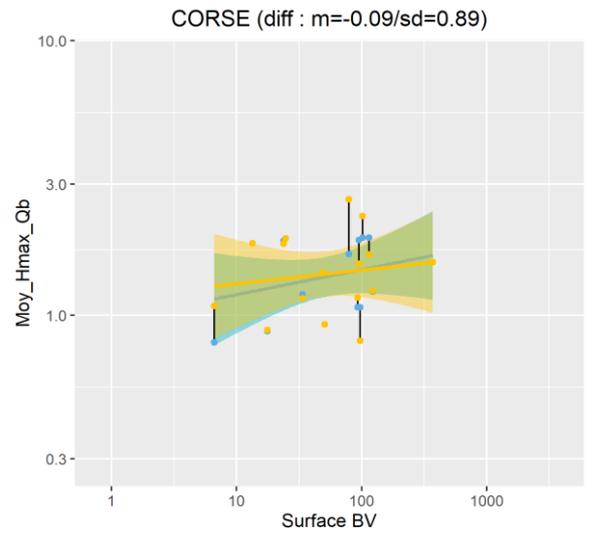
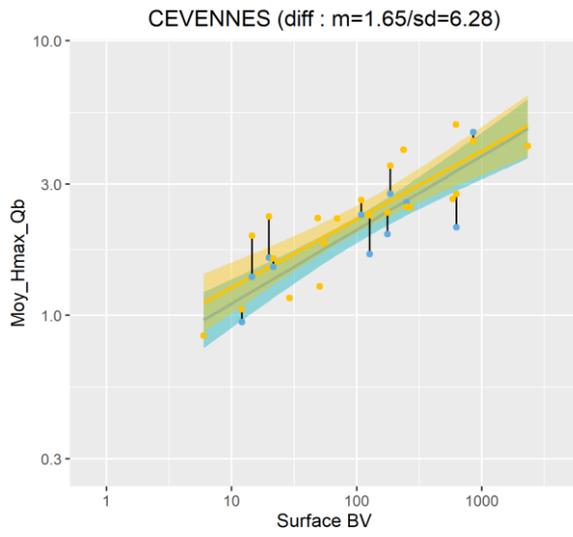
VI.1.2 Profondeur à pleins bords

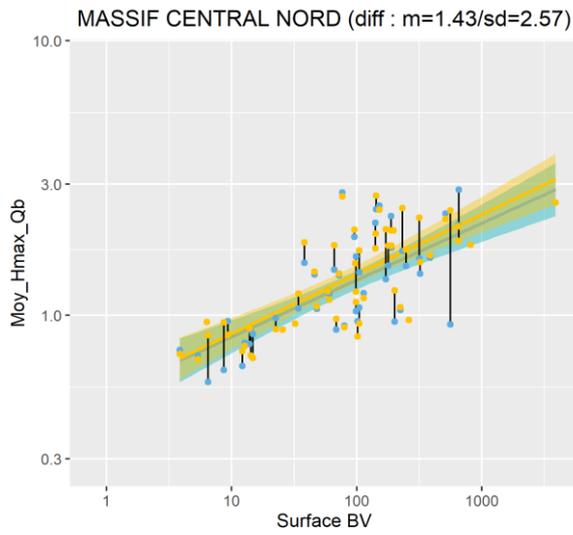
ALPES INTERNES (diff : m=-0.48/sd=3.53)



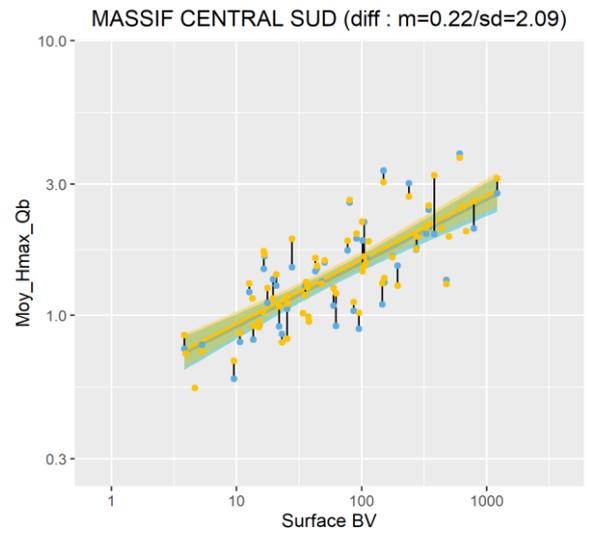
ARMORICAIN (diff : m=0.3/sd=2.08)



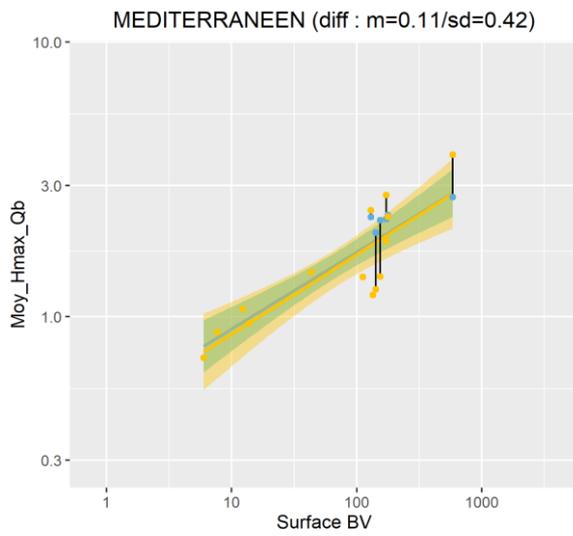




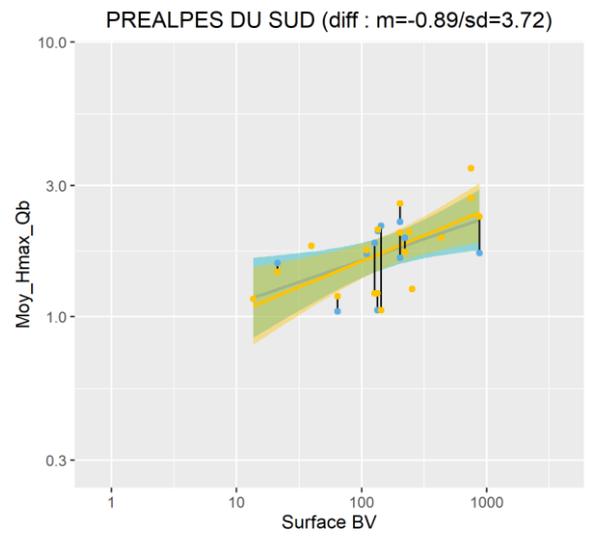
ref 1 (R2=0.52/a=0.52/b=0.21) 2 (R2=0.57/a=0.52/b=0.22)



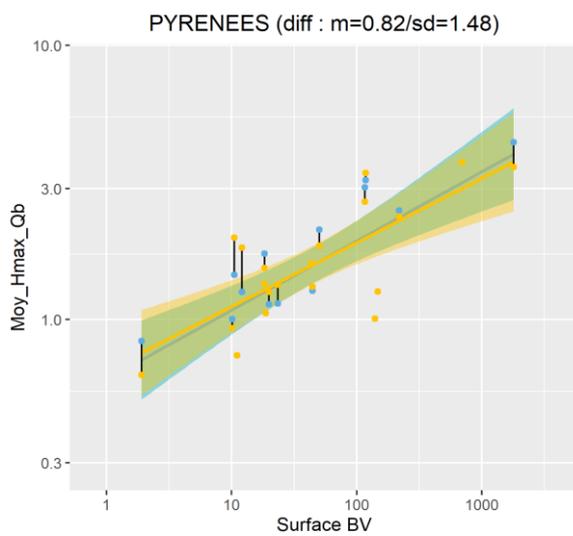
ref 1 (R2=0.62/a=0.53/b=0.23) 2 (R2=0.64/a=0.54/b=0.23)



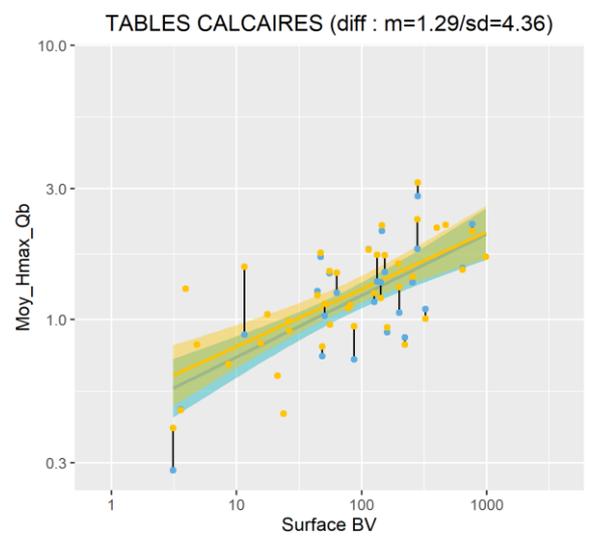
ref 1 (R2=0.84/a=0.47/b=0.28) 2 (R2=0.72/a=0.44/b=0.29)



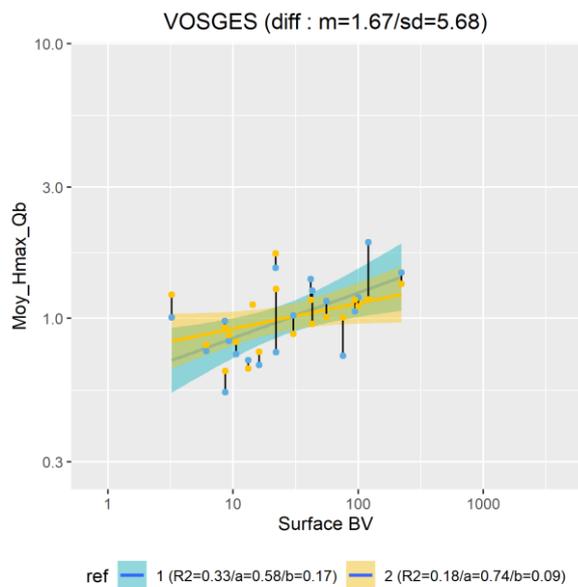
ref 1 (R2=0.29/a=0.78/b=0.16) 2 (R2=0.4/a=0.67/b=0.19)



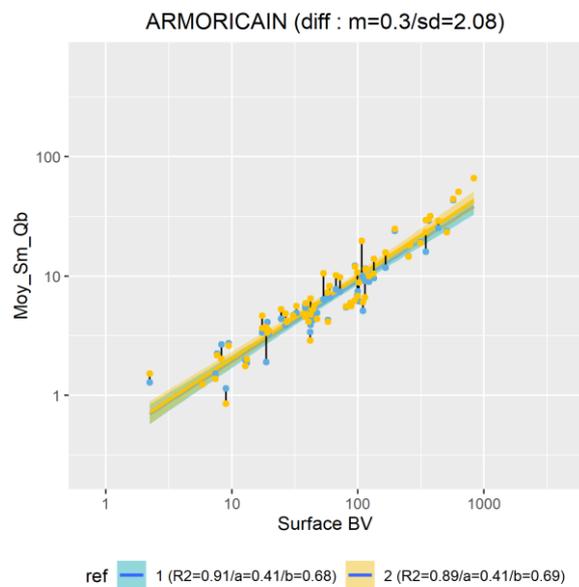
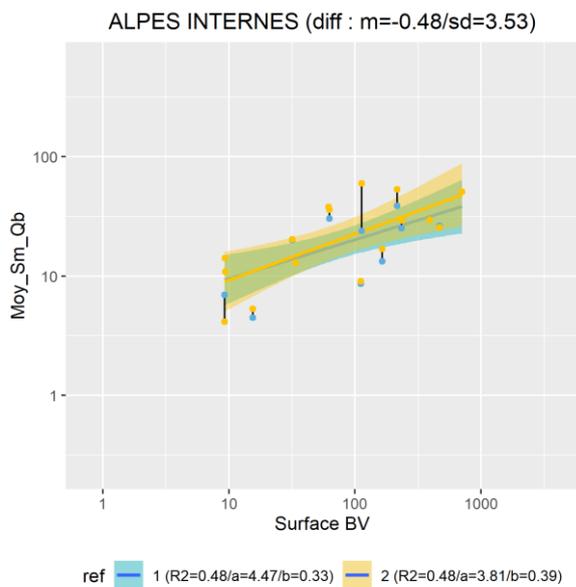
ref 1 (R2=0.63/a=0.61/b=0.25) 2 (R2=0.56/a=0.65/b=0.23)



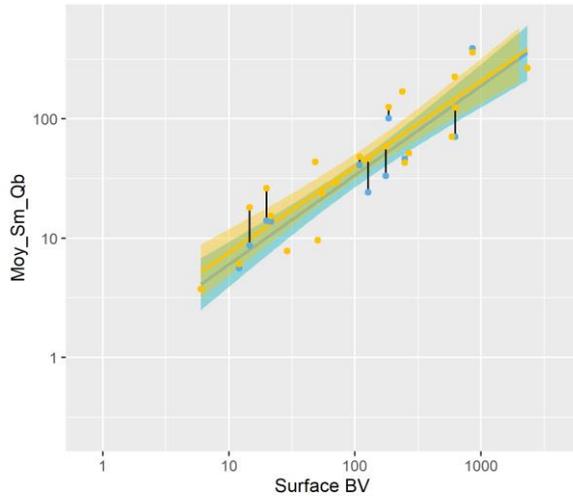
ref 1 (R2=0.51/a=0.44/b=0.22) 2 (R2=0.46/a=0.49/b=0.21)



VI.1.3 Surface de la section mouillée à pleins bords

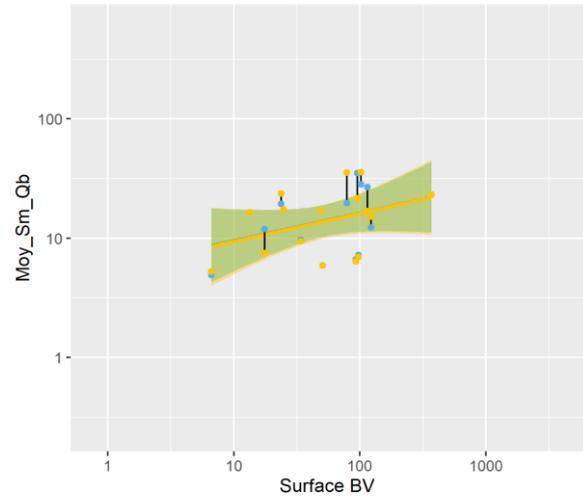


CEVENNES (diff : m=1.65/sd=6.28)



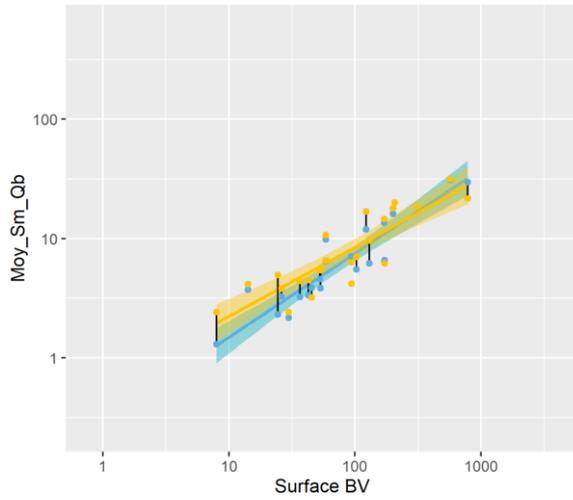
ref 1 (R2=0.86/a=0.96/b=0.78) 2 (R2=0.84/a=1.32/b=0.74)

CORSE (diff : m=-0.09/sd=0.89)



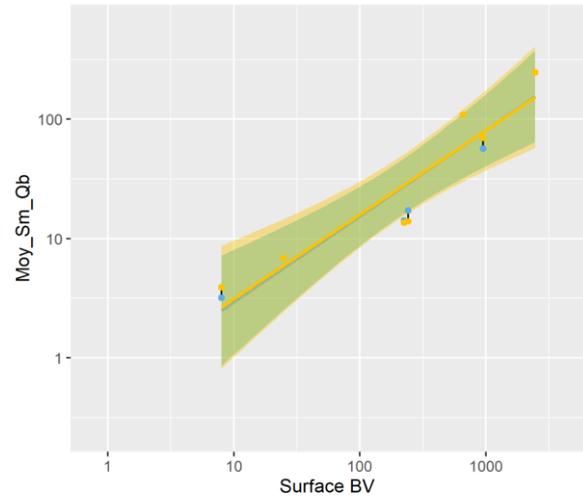
ref 1 (R2=0.15/a=5.64/b=0.23) 2 (R2=0.15/a=5.44/b=0.24)

COTES CALCAIRES EST (diff : m=0.44/sd=2.68)



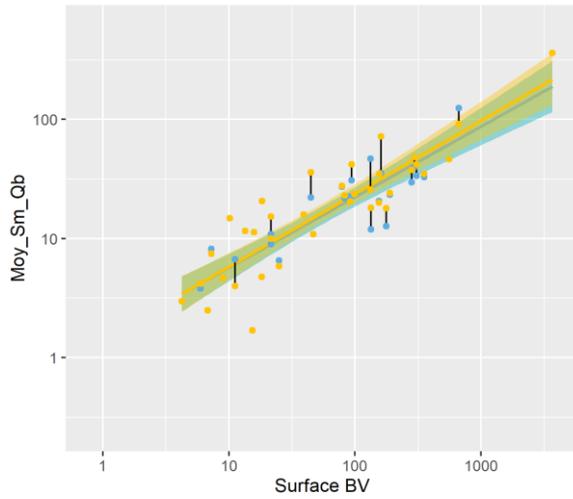
ref 1 (R2=0.85/a=0.29/b=0.7) 2 (R2=0.76/a=0.59/b=0.58)

GRANDS CAUSSES (diff : m=5.23/sd=12.8)



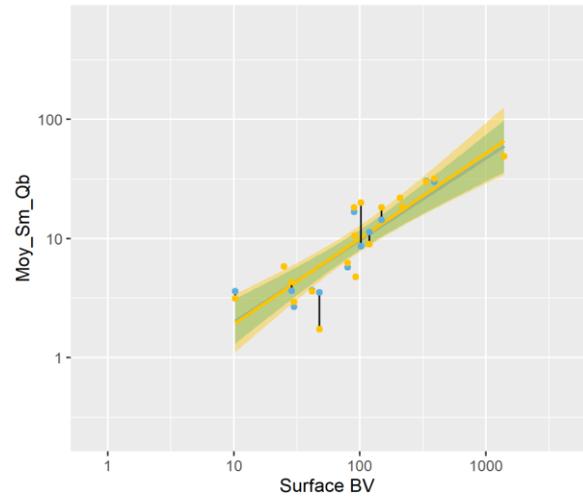
ref 1 (R2=0.9/a=0.56/b=0.72) 2 (R2=0.87/a=0.62/b=0.71)

JURA-PREALPES DU NORD (diff : m=0.32/sd=2.26)



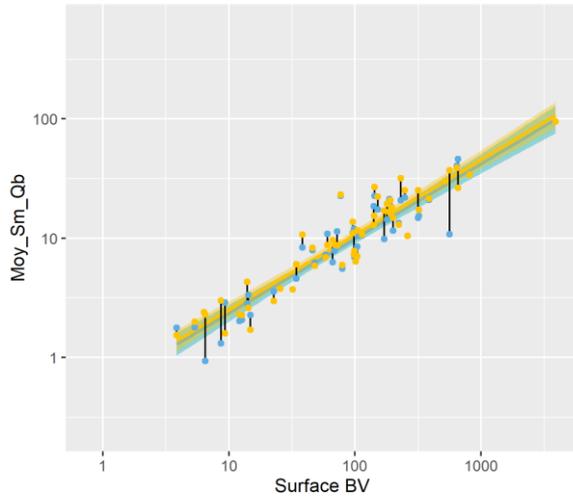
ref 1 (R2=0.77/a=1.46/b=0.59) 2 (R2=0.78/a=1.41/b=0.61)

LANDES (diff : m=1.42/sd=4.06)



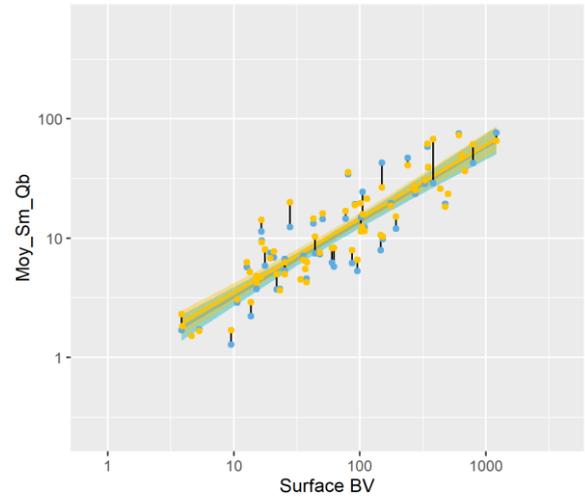
ref 1 (R2=0.82/a=0.41/b=0.69) 2 (R2=0.74/a=0.37/b=0.72)

MASSIF CENTRAL NORD (diff : m=1.43/sd=2.57)



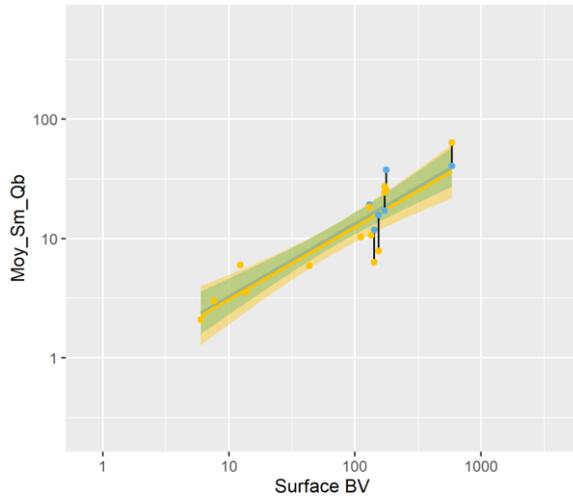
ref 1 (R2=0.88/a=0.55/b=0.63) 2 (R2=0.89/a=0.59/b=0.63)

MASSIF CENTRAL SUD (diff : m=0.22/sd=2.09)



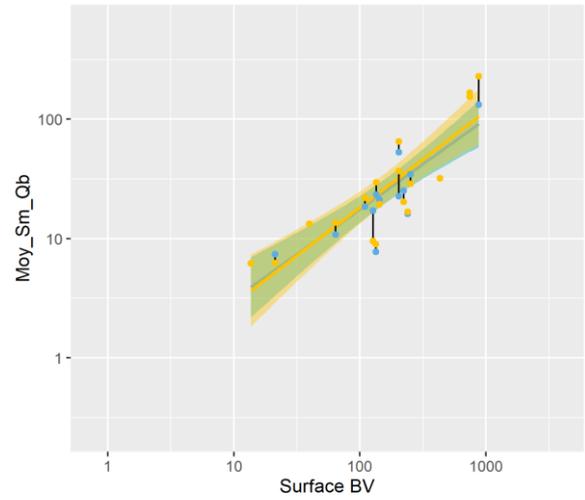
ref 1 (R2=0.8/a=0.76/b=0.63) 2 (R2=0.8/a=0.85/b=0.62)

MEDITERRANEEN (diff : m=0.11/sd=0.42)



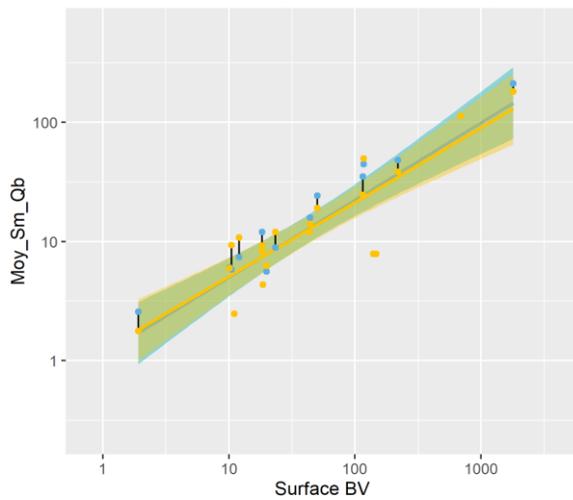
ref 1 (R2=0.87/a=0.8/b=0.61) 2 (R2=0.78/a=0.76/b=0.61)

PREALPES DU SUD (diff : m=-0.89/sd=3.72)



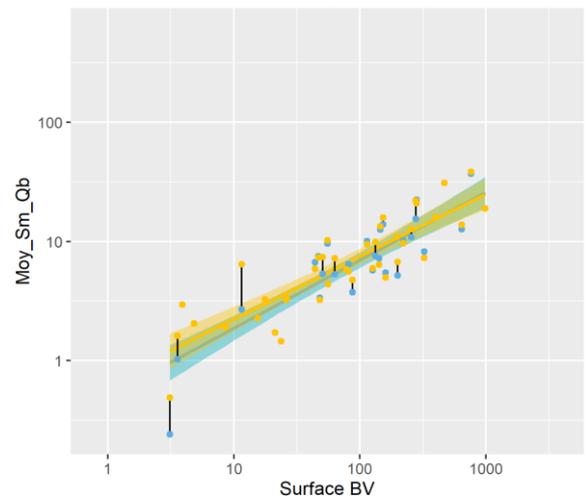
ref 1 (R2=0.76/a=0.54/b=0.76) 2 (R2=0.73/a=0.44/b=0.81)

PYRENEES (diff : m=0.82/sd=1.48)



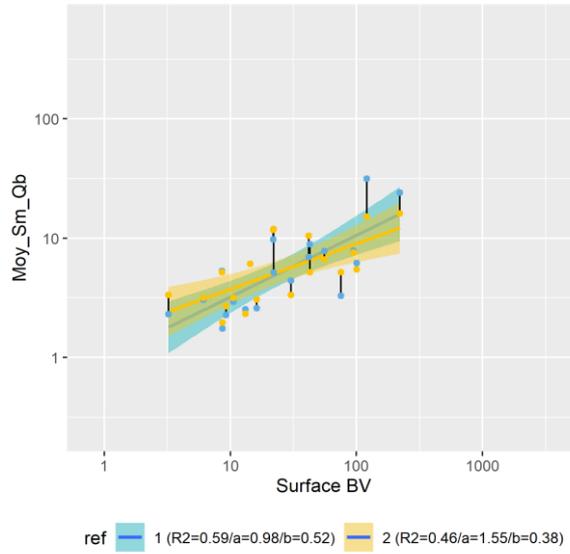
ref 1 (R2=0.78/a=1.12/b=0.65) 2 (R2=0.77/a=1.21/b=0.62)

TABLES CALCAIRES (diff : m=1.29/sd=4.36)



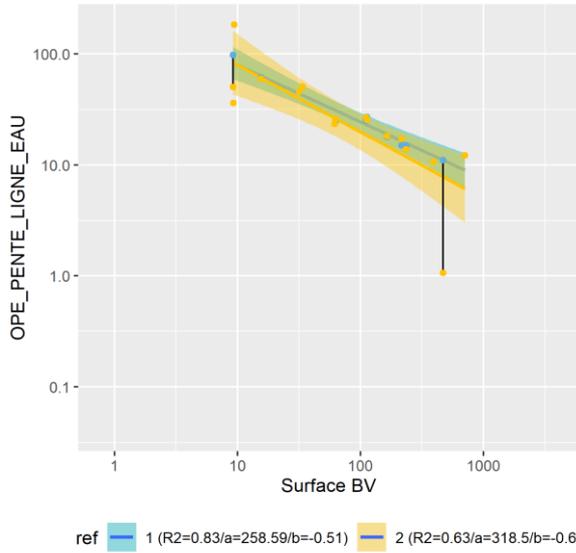
ref 1 (R2=0.78/a=0.5/b=0.57) 2 (R2=0.75/a=0.66/b=0.53)

VOSGES (diff : m=1.67/sd=5.68)

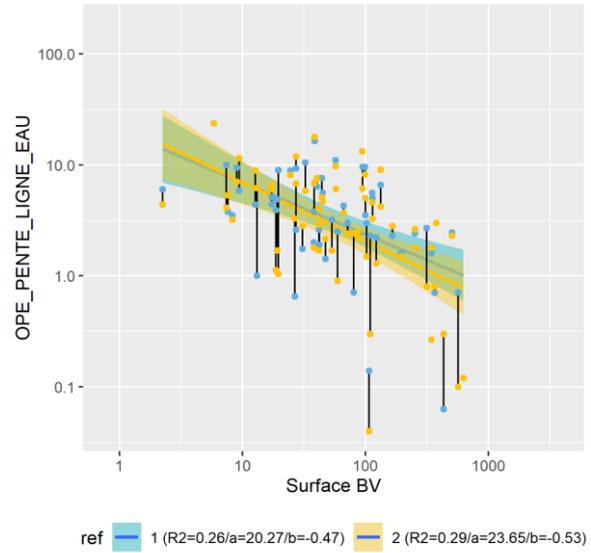


VI.1.4 Pente de la ligne d'eau

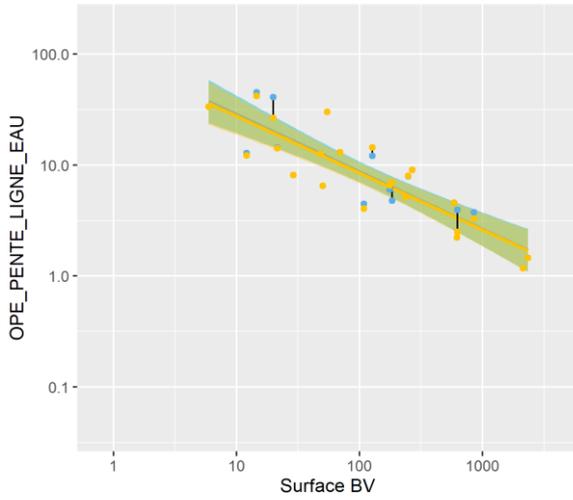
ALPES INTERNES (diff : m=-0.48/sd=3.53)



ARMORICAIN (diff : m=0.3/sd=2.08)

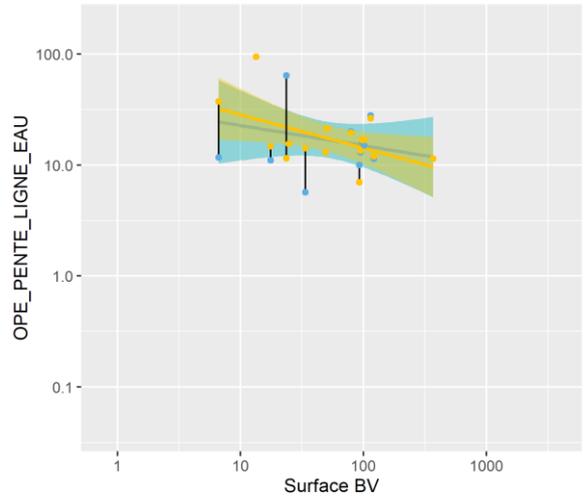


CEVENNES (diff : m=1.65/sd=6.28)



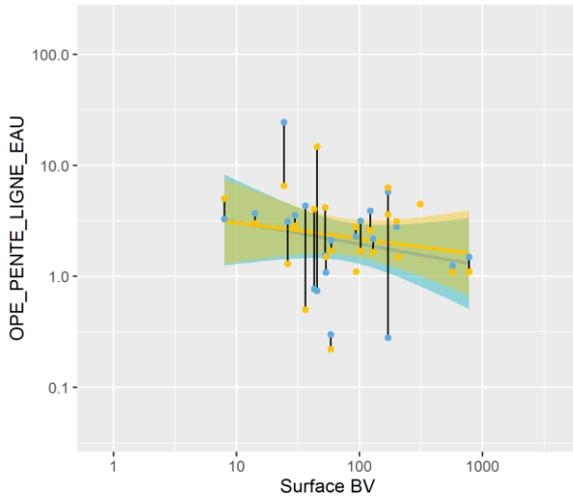
ref 1 (R2=0.76/a=94.48/b=-0.52) 2 (R2=0.77/a=89.68/b=-0.51)

CORSE (diff : m=-0.09/sd=0.89)



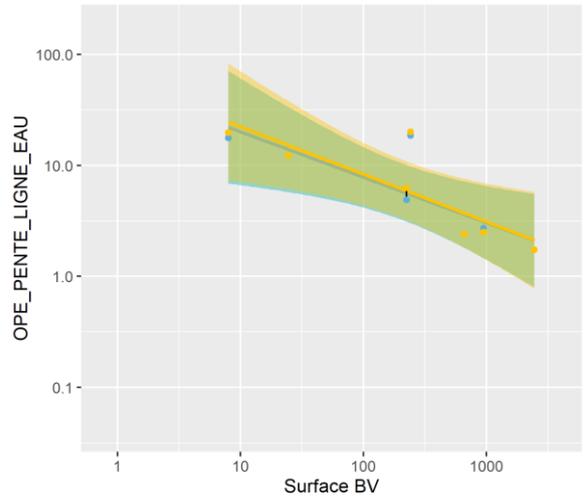
ref 1 (R2=0.07/a=34.59/b=-0.18) 2 (R2=0.27/a=56.99/b=-0.3)

COTES CALCAIRES EST (diff : m=0.44/sd=2.68)



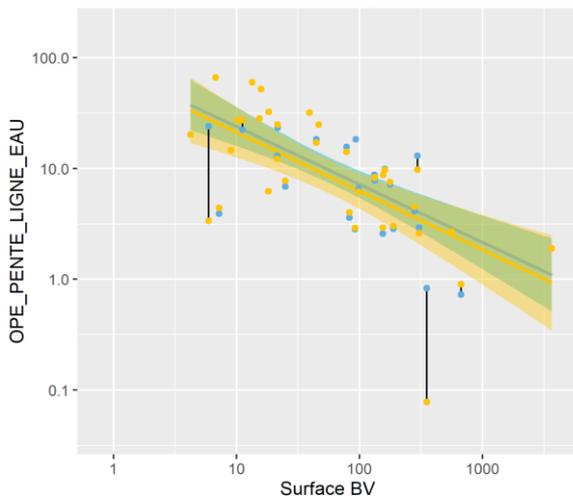
ref 1 (R2=0.052/a=4.86/b=-0.2) 2 (R2=0.032/a=4.25/b=-0.14)

GRANDS CAUSSES (diff : m=5.23/sd=12.8)



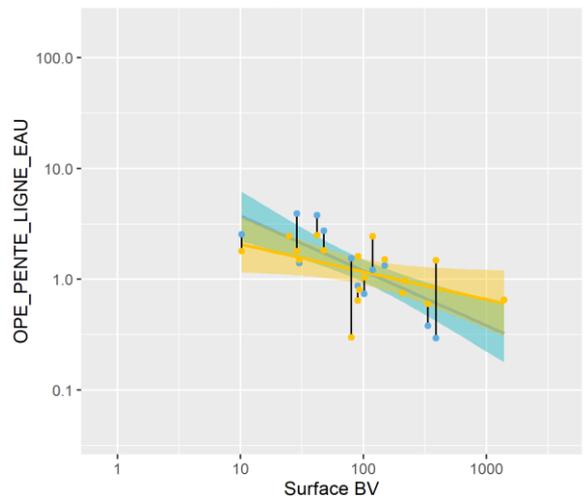
ref 1 (R2=0.7/a=51.8/b=-0.41) 2 (R2=0.7/a=59.88/b=-0.43)

JURA-PREALPES DU NORD (diff : m=0.32/sd=2.26)

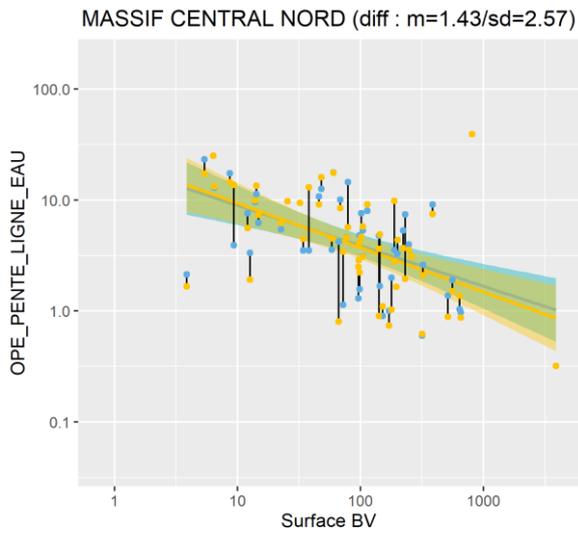


ref 1 (R2=0.52/a=79.93/b=-0.52) 2 (R2=0.41/a=72.24/b=-0.53)

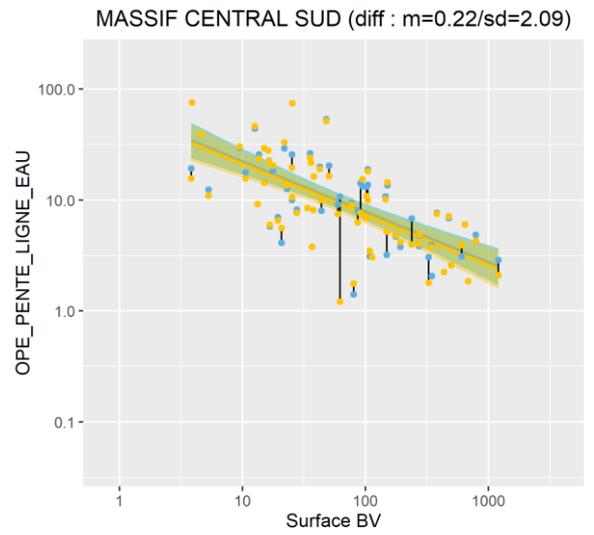
LANDES (diff : m=1.42/sd=4.06)



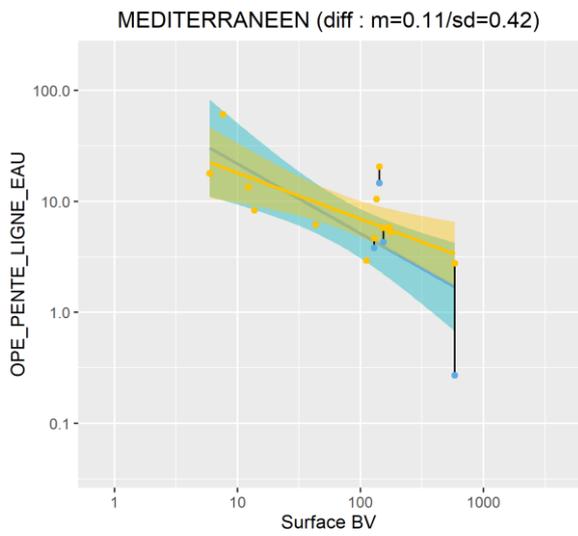
ref 1 (R2=0.62/a=11.65/b=-0.49) 2 (R2=0.24/a=3.69/b=-0.25)



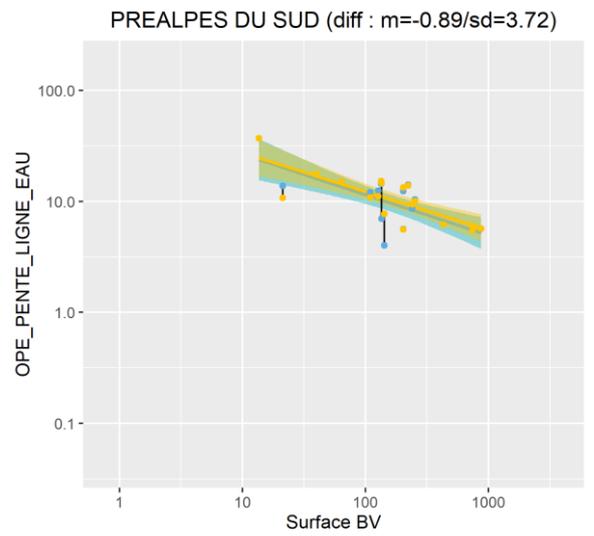
ref 1 ($R^2=0.28/a=20.8/b=-0.36$) 2 ($R^2=0.3/a=23.58/b=-0.4$)



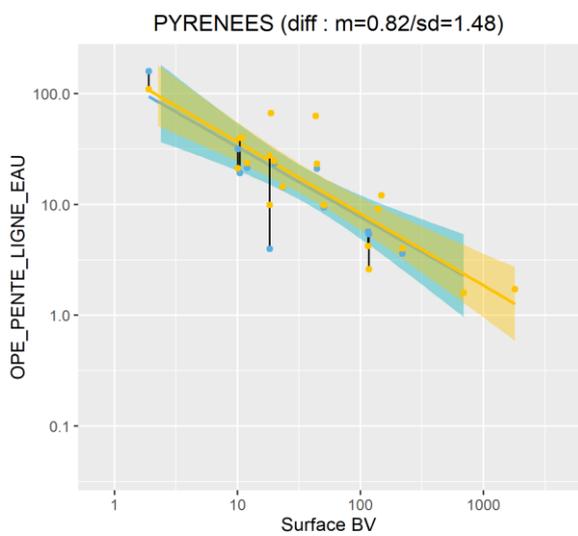
ref 1 ($R^2=0.49/a=63.66/b=-0.46$) 2 ($R^2=0.47/a=60.44/b=-0.46$)



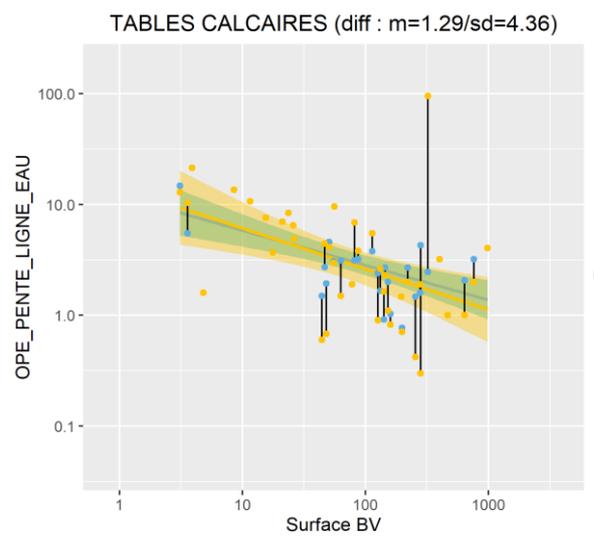
ref 1 ($R^2=0.55/a=93.07/b=-0.63$) 2 ($R^2=0.5/a=47.03/b=-0.41$)



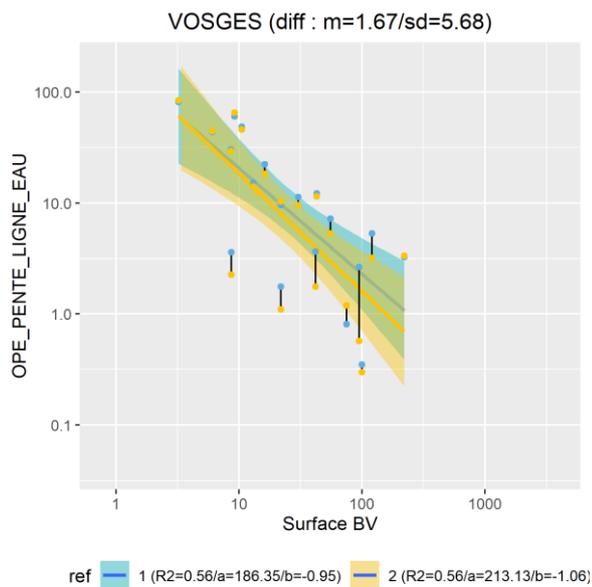
ref 1 ($R^2=0.57/a=61.92/b=-0.37$) 2 ($R^2=0.64/a=61.01/b=-0.35$)



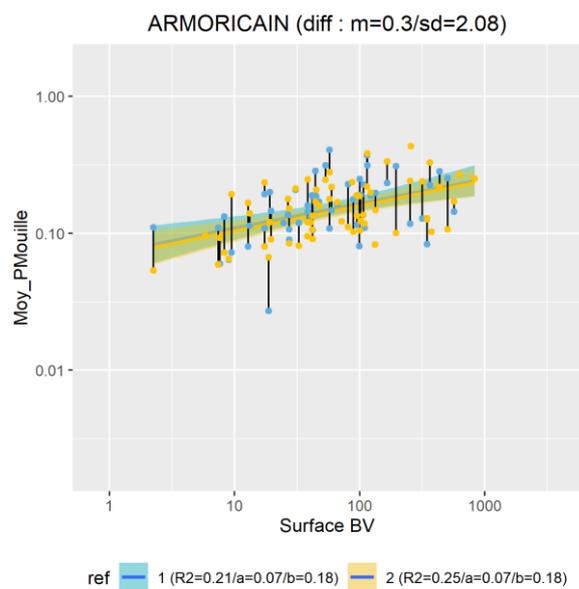
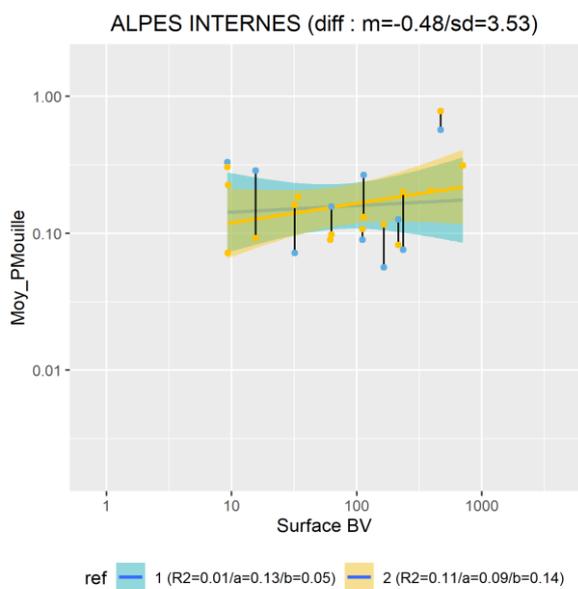
ref 1 ($R^2=0.6/a=141.95/b=-0.63$) 2 ($R^2=0.74/a=163.5/b=-0.65$)



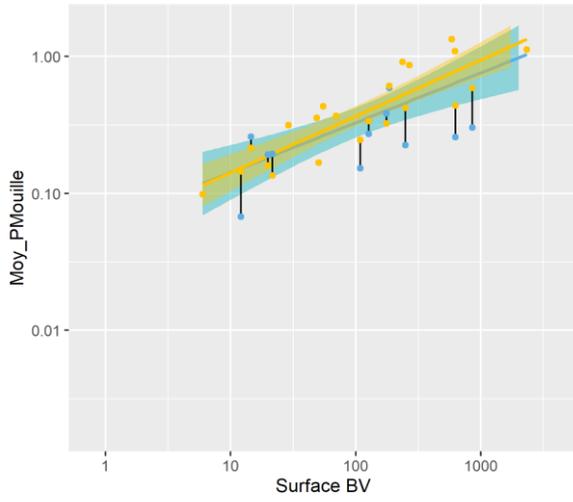
ref 1 ($R^2=0.37/a=12.04/b=-0.31$) 2 ($R^2=0.22/a=14.24/b=-0.37$)



VI.1.5 Profondeur des mouilles

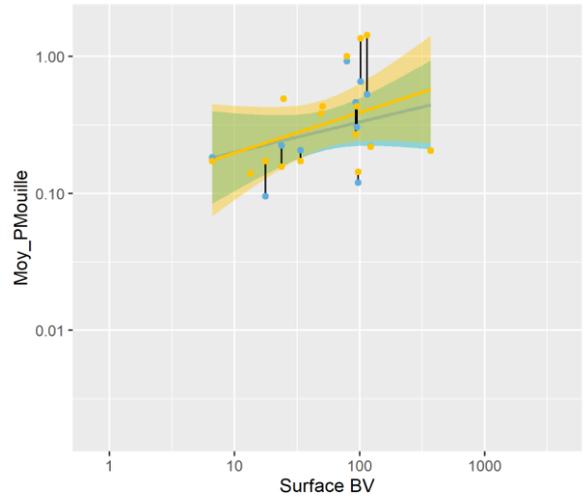


CEVENNES (diff : m=1.65/sd=6.28)



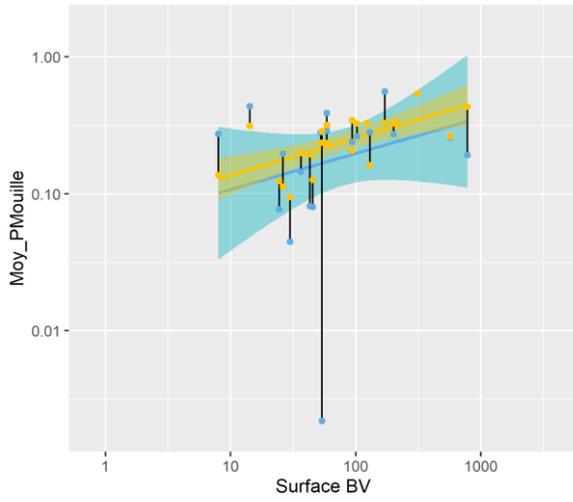
ref 1 (R2=0.58/a=0.06/b=0.39) 2 (R2=0.79/a=0.05/b=0.42)

CORSE (diff : m=-0.09/sd=0.89)



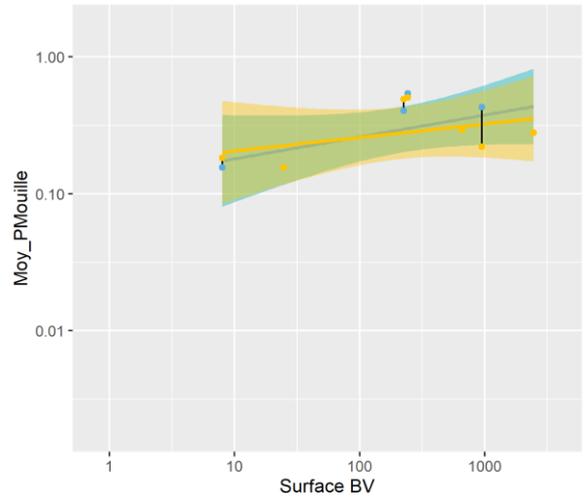
ref 1 (R2=0.12/a=0.12/b=0.22) 2 (R2=0.14/a=0.1/b=0.3)

COTES CALCAIRES EST (diff : m=0.44/sd=2.68)



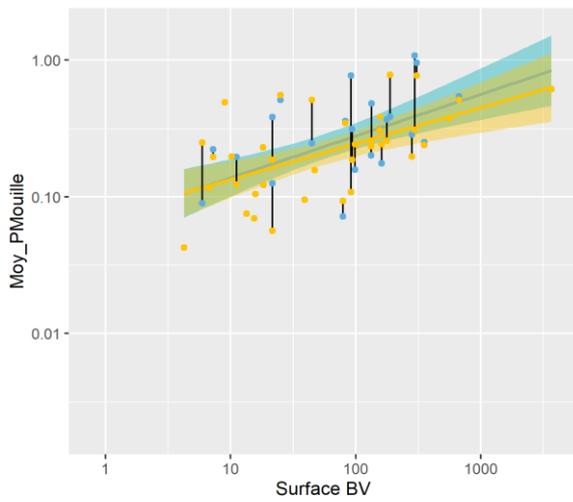
ref 1 (R2=0.066/a=0.06/b=0.26) 2 (R2=0.43/a=0.07/b=0.27)

GRANDS CAUSSES (diff : m=5.23/sd=12.8)



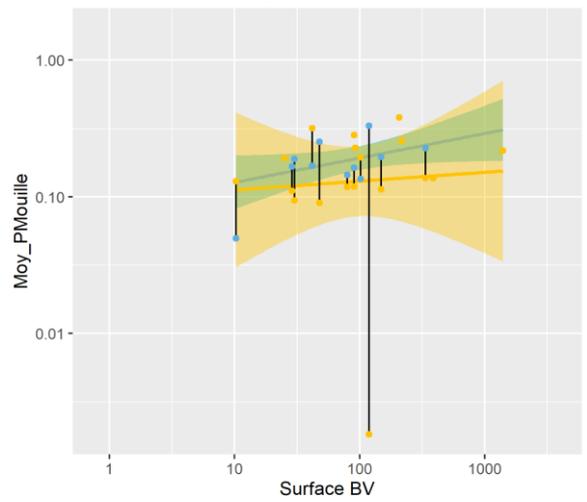
ref 1 (R2=0.45/a=0.12/b=0.16) 2 (R2=0.19/a=0.16/b=0.1)

JURA-PREALPES DU NORD (diff : m=0.32/sd=2.26)

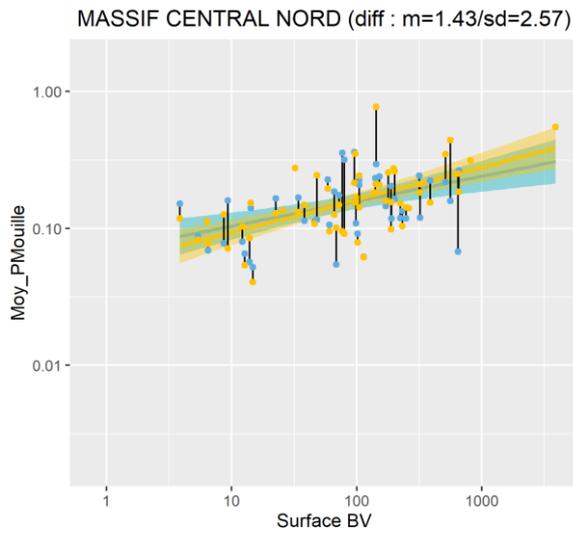


ref 1 (R2=0.38/a=0.07/b=0.31) 2 (R2=0.32/a=0.07/b=0.26)

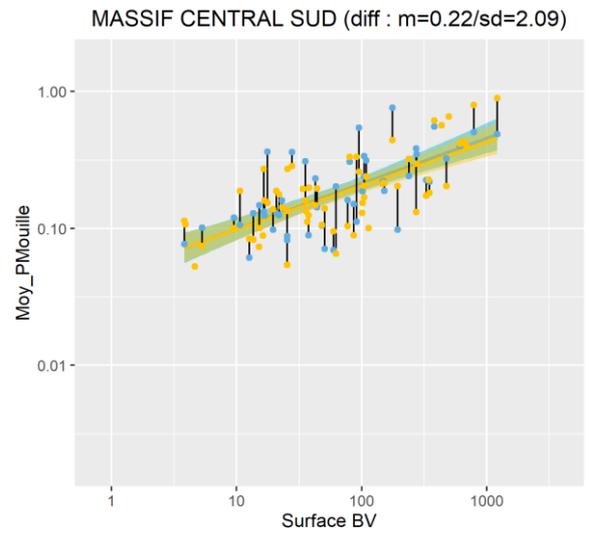
LANDES (diff : m=1.42/sd=4.06)



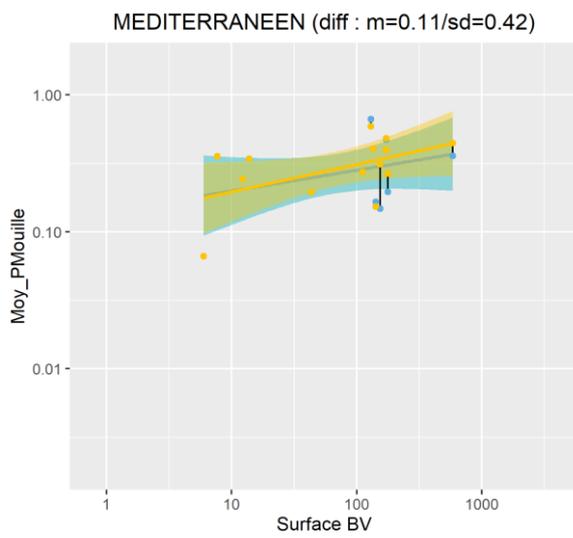
ref 1 (R2=0.22/a=0.08/b=0.18) 2 (R2=0.0043/a=0.1/b=0.06)



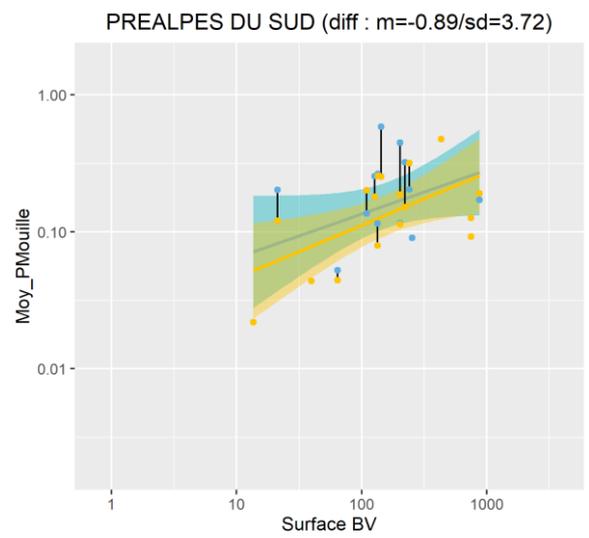
ref 1 (R2=0.23/a=0.07/b=0.18) 2 (R2=0.37/a=0.05/b=0.24)



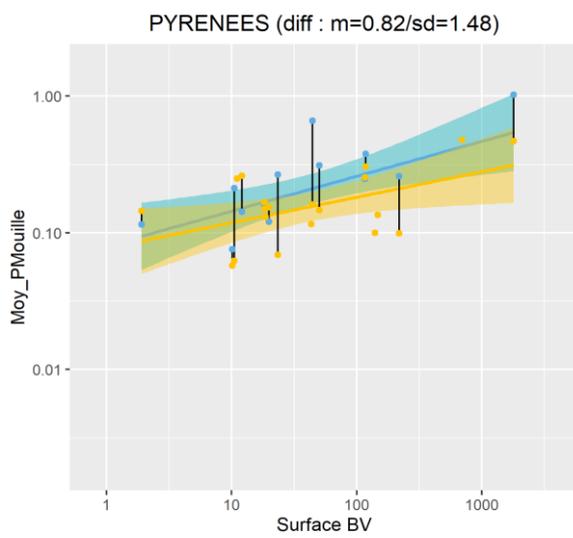
ref 1 (R2=0.51/a=0.05/b=0.33) 2 (R2=0.51/a=0.05/b=0.32)



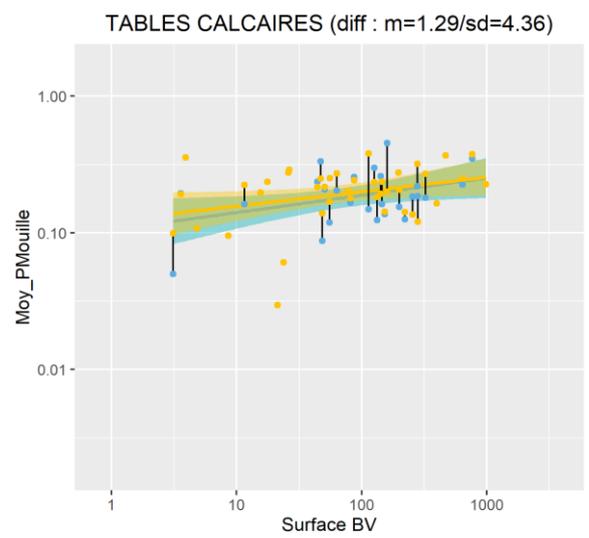
ref 1 (R2=0.14/a=0.14/b=0.15) 2 (R2=0.26/a=0.12/b=0.2)



ref 1 (R2=0.18/a=0.03/b=0.32) 2 (R2=0.33/a=0.02/b=0.39)

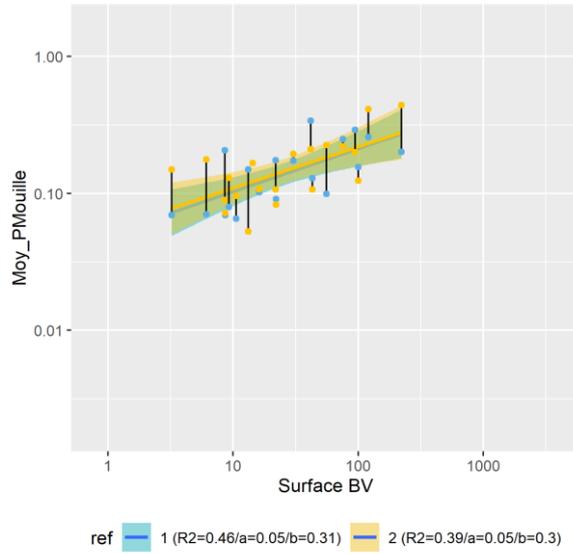


ref 1 (R2=0.38/a=0.08/b=0.26) 2 (R2=0.26/a=0.08/b=0.19)



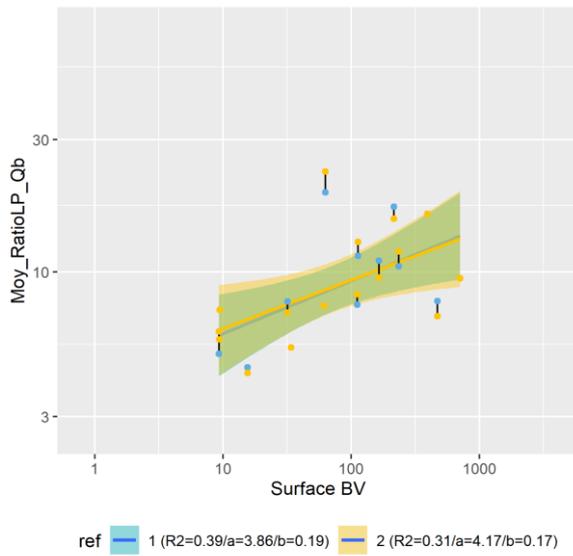
ref 1 (R2=0.12/a=0.11/b=0.13) 2 (R2=0.1/a=0.12/b=0.11)

VOSGES (diff : m=1.67/sd=5.68)

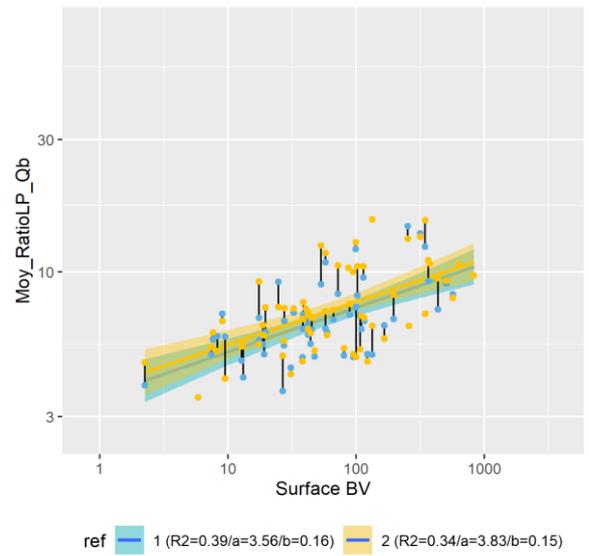


VI.1.6 Rapport largeur/profondeur à pleins bords

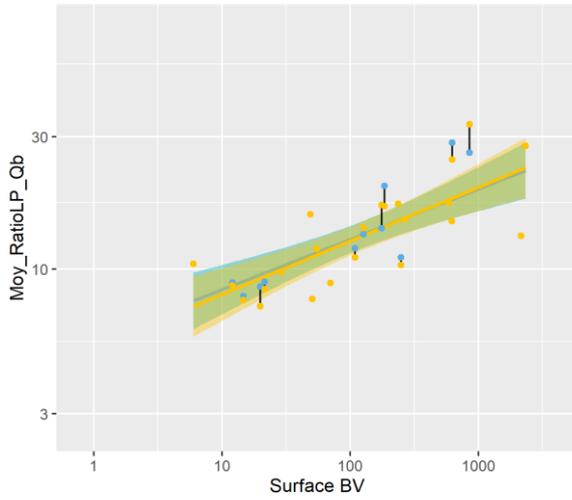
ALPES INTERNES (diff : m=-0.48/sd=3.53)



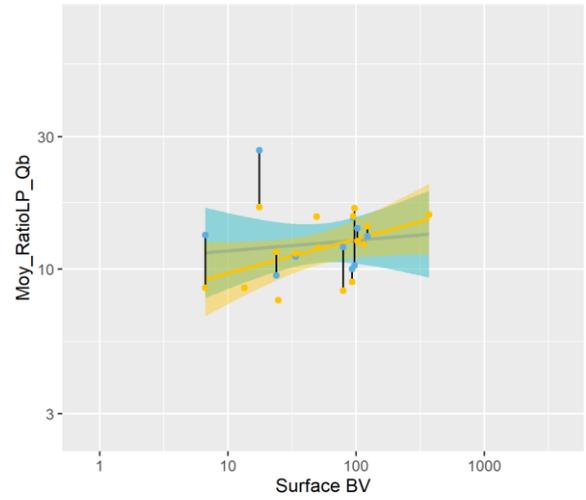
ARMORICAIN (diff : m=0.3/sd=2.08)



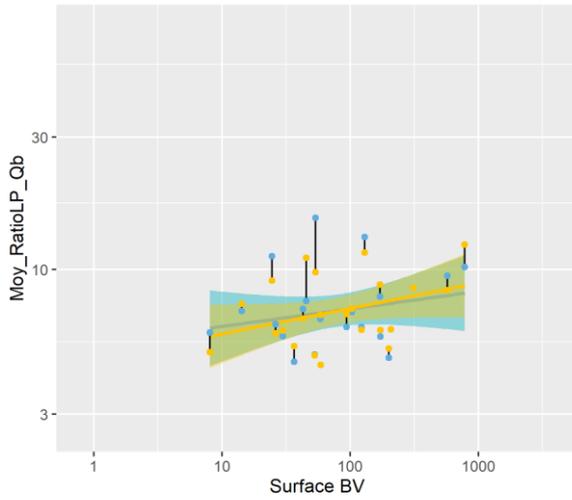
CEVENNES (diff : m=1.65/sd=6.28)



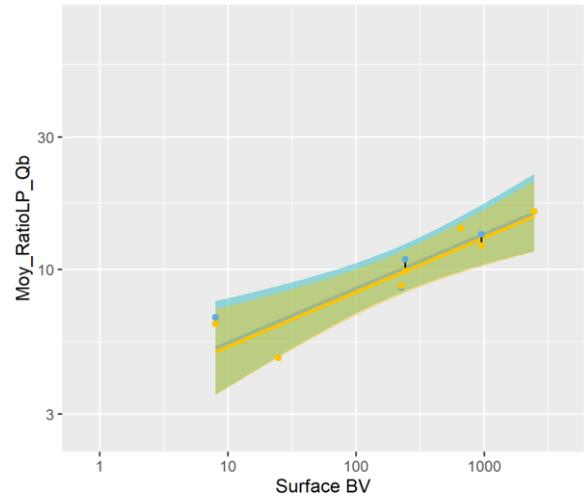
CORSE (diff : m=-0.09/sd=0.89)



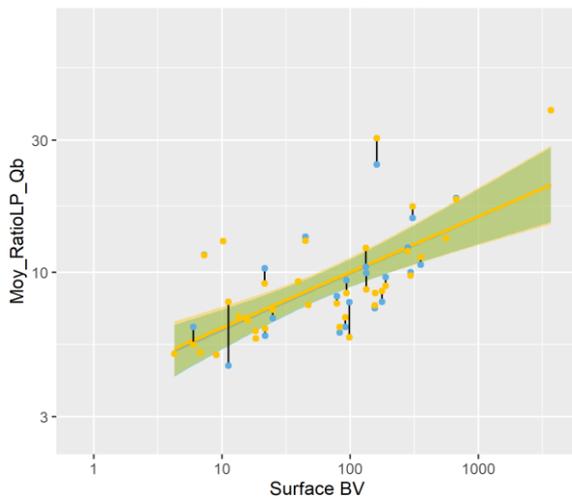
COTES CALCAIRES EST (diff : m=0.44/sd=2.68)



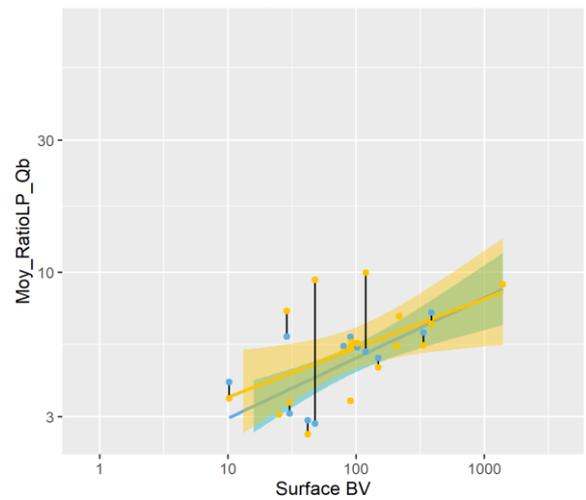
GRANDS CAUSSES (diff : m=5.23/sd=12.8)



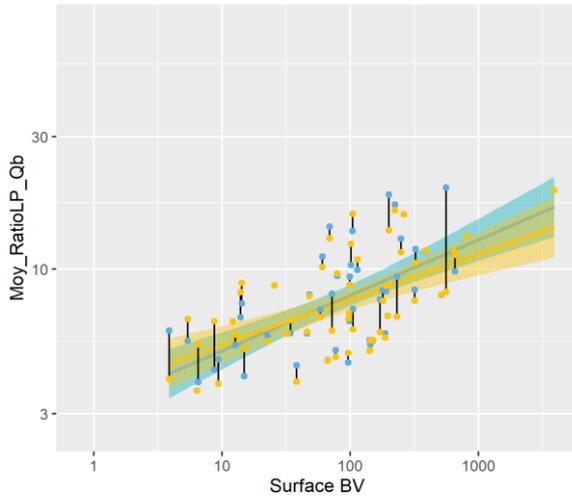
JURA-PREALPES DU NORD (diff : m=0.32/sd=2.26)



LANDES (diff : m=1.42/sd=4.06)

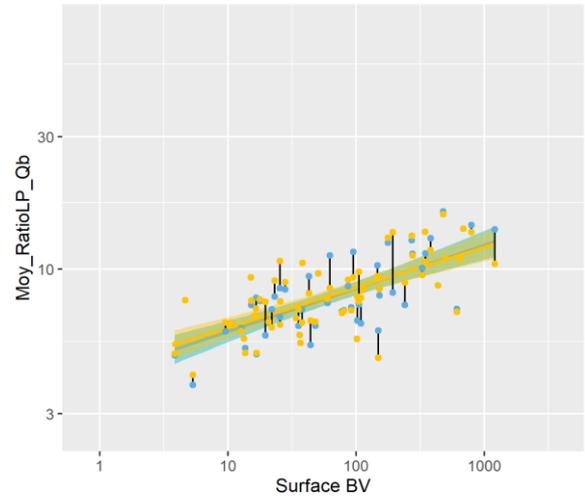


MASSIF CENTRAL NORD (diff : m=1.43/sd=2.57)



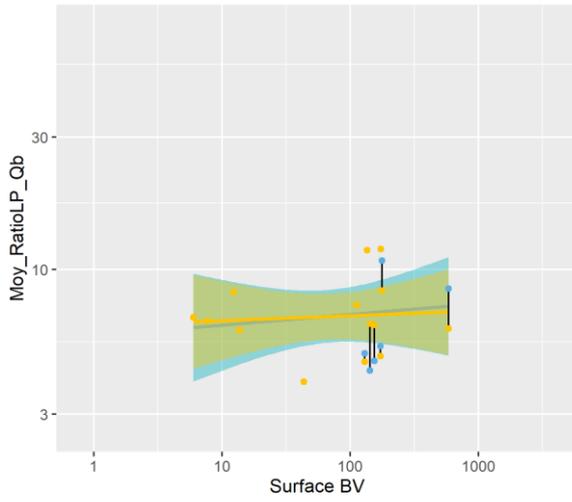
ref 1 (R2=0.45/a=3.2/b=0.2) 2 (R2=0.35/a=3.65/b=0.16)

MASSIF CENTRAL SUD (diff : m=0.22/sd=2.09)



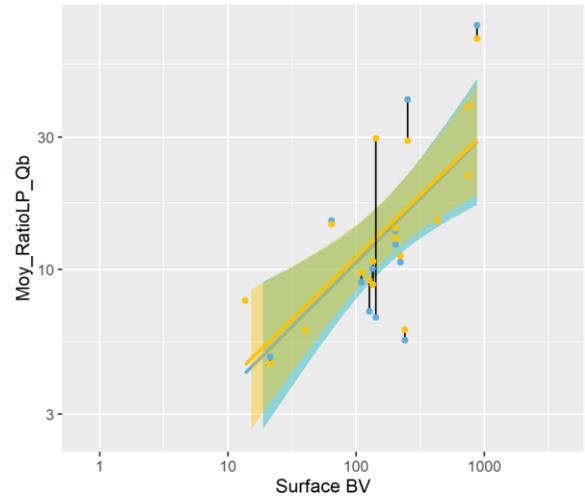
ref 1 (R2=0.51/a=4.16/b=0.16) 2 (R2=0.48/a=4.39/b=0.15)

MEDITERRANEEN (diff : m=0.11/sd=0.42)



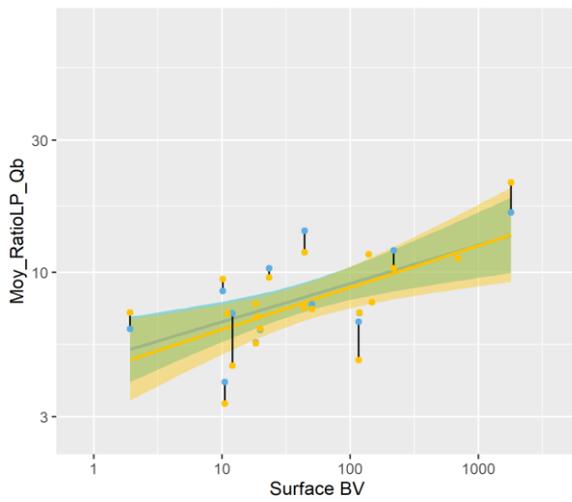
ref 1 (R2=0.022/a=5.75/b=0.04) 2 (R2=0.0064/a=6.26/b=0.02)

PREALPES DU SUD (diff : m=-0.89/sd=3.72)



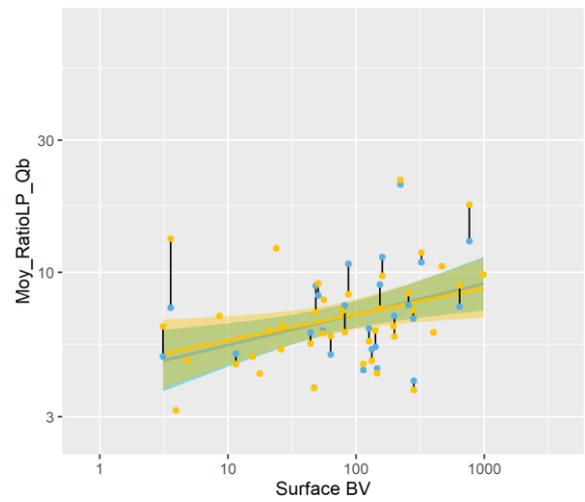
ref 1 (R2=0.46/a=1.27/b=0.46) 2 (R2=0.53/a=1.41/b=0.45)

PYRENEES (diff : m=0.82/sd=1.48)



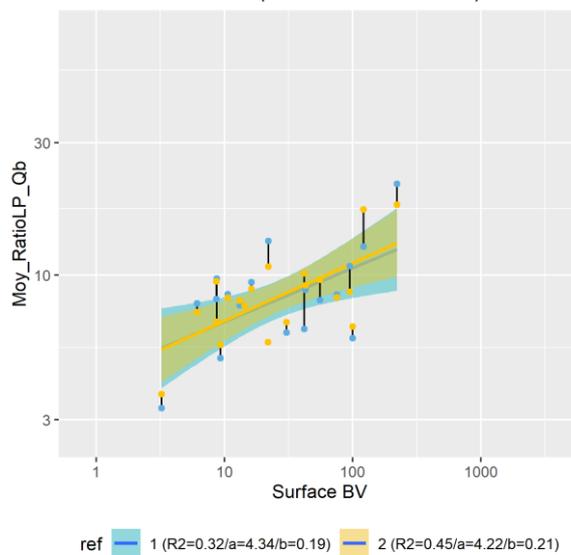
ref 1 (R2=0.44/a=4.81/b=0.14) 2 (R2=0.38/a=4.38/b=0.15)

TABLES CALCAIRES (diff : m=1.29/sd=4.36)



ref 1 (R2=0.19/a=4.23/b=0.11) 2 (R2=0.12/a=4.55/b=0.1)

VOSGES (diff : m=1.67/sd=5.68)



VI.2 Récapitulatif des données et méthodes utilisées pour le calcul du MQI (Fraudin, 2020)

| Indicateur et paramètres évalués | Méthode d'évaluation | Champ d'application |
|--|---|---|
| Fonctionnalités | | |
| Continuité | | |
| F1 continuité longitudinale dans les flux de sédiments et de bois Présence de structures de franchissement (déversoirs, barrages, ponts, etc.) susceptibles d'altérer le flux naturel de sédiments et de bois le long du tronçon | Téledétection et/ou base de données des interventions : identification des structures de croisement Etude de terrain : évaluation visuelle de l'interception partielle ou complète (qualitative) | Tous les types de rivières |
| F2 présence d'une plaine inondable récente | Téledétection / SIG : mesure de la largeur et de la longueur (quantitative) Etude de terrain : identification / vérification des plaines inondables modernes (quali) | PC-U ; non évalué dans le cas des ruisseaux de montagne le long de pentes alluviales abruptes (>3%) |
| F3 connexion entre les pentes et le cours d'eau Présence et longueur des éléments de déconnexion (<i>ex</i> : les routes), dans une zone tampon de 50m de large de chaque côté de la rivière | Téledétection / SIG : identification et mesure de la longueur des éléments de déconnexion (quanti) Etude de terrain : vérification des éléments de déconnexion (quali) | C |
| F4 processus de recul des berges Présence / absence de berges | Téledétection et/ou enquête de terrain : identification des berges en érosion (quali) | PC-U ; non évalué dans le cas des ERT basse énergie de 17 à 22 |
| Morphologie | | |
| Configuration morphologique | | |
| F5 présence d'une ceinture potentiellement érodable Largeur et longueur longitudinale de la ceinture érodable, c'est-à-dire zone sans structures pertinentes (<i>ex</i> : protection des berges, levée) ou infrastructures (maisons, routes) | Téledétection / SIG : mesure de la largeur et de la longueur du CE (quanti) | PC-U |
| F6 configuration du fond du lit – pentes de la vallée Identification de la configuration du fond du lit (cd cascade, step and pool) dans les cas où les structures de lits transversaux sont présentes en comparaison avec la configuration de lit prévue en fonction de la pente de la vallée | Cartes topographiques : pente moyenne de la vallée (quanti) Etude de terrain : identification de la configuration des lits (quali) | Mono chenal- alluvial de type C (ERT de 4 à 7) sauf dans le cas des cours d'eau profonds où l'observation du lit n'est pas possible |

| | | |
|--|--|---|
| F7 formes et processus typiques de la configuration morphologique Pourcentage de la portée avec la configuration morphologique altérée et les unités géomorphiques | Téledétection / SIG : identification et mesure de la longueur des portions modifiées (quanti) Etude de terrain : identification / vérification (quali) | PC-U ERT confinés de type 8-9-10-11-15-19-22 |
| F8 présence de formes fluviales typiques dans la plaine inondable Présence / absence de formes de relief appropriées dans la plaine d'inondation | Téledétection et/ou enquête de terrain : identification et vérification des formes fluviales (quali) | PC-U |
| Configuration de la section | | |
| F9 variabilité de la section Pourcentage de la longueur de la portée avec altération de l'hétérogénéité naturelle de la section transversale attendue pour ce type de rivière et causée par des facteurs humains | Etude de terrain : identification / vérification (quali) Téledétection / SIG : identification et mesure de la longueur des portions altérées (quanti) | Tous les types |
| Structure et substrat du lit de la rivière | | |
| F10 structure du lit du chenal / du substrat Présence/absence d'altérations des sédiments du lit (pavage, colmatage, affleurements rocheux, revêtement de lit) | Etude de terrain : évaluation visuelle (quali) | Tous sauf les chenaux profonds où l'observation du lit n'est pas possible |
| F11 présence de gros matériaux ligneux Présence / absence de gros bois | Etude de terrain : évaluation visuelle (quali) | Tous, non évalué au-dessus de la limite climassique et dans les ruisseaux avec une absence naturelle de végétation |
| Végétation de la ripisylve | | |
| F12 largeur des formations fonctionnelles présentes dans la ripisylve Largeur moyenne (ou extension dans le milieu) de la ripisylve dans le couloir fluvial potentiellement connectée aux processus des chenaux | Téledétection / SIG : identification et mesure de la largeur moyenne de la végétation fonctionnelle (quanti) | Tous : non évalué au-dessus de la limite des arbres et dans les cours d'eau avec une absence naturelle de ripisylve |
| F13 extension linéaire de la végétation active le long des rives Longueur de la ripisylve active le long des berges avec des connexions directes au chenal | Téledétection / SIG : identification et mesure de la longueur de la végétation (quanti) | Tous, non évalué au-dessus de la limite des arbres et dans les cours d'eau avec une absence naturelle de ripisylve |

| Artificialité | | |
|---|--|------|
| Travaux de modification de la continuité longitudinale en amont | | |
| A1 travaux de modification des flux liquides Quantité de changements de débit causés par les interventions en amont (barrage, dérivations, déversoirs, bassins de rétention, etc.) | Données hydrologiques : évaluation des débits réduits / augmentés provoqués par les interventions (quanti) En l'absence de données disponibles, l'évaluation est basée sur la présence d'une intervention de débit et son utilisation (quali) | Tous |
| A2 travaux de modification des flux solides Présence, type et emplacement (zone de drainage) des structures pertinentes responsables de l'interception de la charge de fond (barrages, barrages de retenue, déversoirs) | Téledétection /SIG / base de données d'interventions : identification des structures et de l'aire de drainage relative (quanti) | Tous |
| Travaux de modification de la continuité longitudinale dans la section | | |
| A3 altération des flux liquides dans le tronçon Importance de l'altération du débit provoqué par les interventions dans le périmètre | Voir A1 | Tous |
| A4 altération des flux solides dans le tronçon Type et densité spatiale des structures interceptant la charge de lit (barrages de contrôle, déversoirs) le long du tronçon | Téledétection / SIG/ base de données d'interventions : identification et nombre de structures (quanti) | Tous |
| A5 les structures franchissantes (ouvrages d'art) Densité spatiale des structures franchissantes (pont, gués, ponceaux) | Téledétection /SIG / base de données d'interventions : identification et nb de structures (quanti) | Tous |
| Travaux qui altèrent la continuité latérale | | |
| A6 protection des berges Longueur des berges protégées (murs enrochements, gabions, épis, mesures bio-ingénierie) | Téledétection / SIG/ base de données des interventions : longueur des structures (quanti) | Tous |
| A7 levées artificielles /digues Longueur et du chenal des levées artificielles | Téledétection / SIG / base de données des interventions (quanti) | PC-U |
| Travaux de modification de la morphologie du lit de la rivière et/ou du substrat | | |
| A8 variations artificielles du tracé du cours d'eau Pourcentage de la longueur de la portée avec des modifications artificielles documentées du cours d'eau (coupure de méandre, déplacement du chenal de la rivière, etc.) | Informations historiques / bibliographiques / base de données des interventions (quanti) | PC-U |
| A9 autres travaux de consolidation et de stabilisation du lit Présence, densité spatiale et typologie d'autres structures stabilisatrices de lit (seuils, rampes) et revêtements | Téledétection / SIG / base de données d'interventions : identification, nombre et/ou longueur des structures | Tous |

| Opérations d'entretien et de collecte | | |
|--|--|---|
| A10 enlèvement des sédiments Existence et intensité relative de l'activité d'extraction de sédiments passée (au cours des 100 dernières années, avec un accent part sur les 20 dernières années) | Base de données des interventions / info disponibles auprès des organismes publics Etude de terrain/téledétection preuves indirectes (quali) | Tous – non évalué pour les ERT de type 1 |
| A11 enlèvement du bois Existence et intensité (partielle ou totale) de l'enlèvement du bois du chenal au cours des 20 dernières années | Base de données des interventions / info disponibles par les agences publiques Etude de terrain : preuves supplémentaires (quali) | Tous – non évalué au-dessus de la limite des arbres et dans les ruisseaux avec absence de ripisylve nat |
| A12 gestion de la végétation/ coupe de la végétation dans la ceinture périphérique Existence et intensité relative (sélective ou totale) des coupes de végétation au cours des 20 dernières années | Base de données des interventions et/informations disponibles par les agences publiques Etude de terrain : preuves supplémentaires (quali) | Tous – non évalué au-dessus de la limite des arbres et dans les rivières avec absence nat de ripisylve |
| Variations morphologiques | | |
| V1 variation de la configuration morphologique Variations morphologiques de 1930 à 1960, basé sur les changements d'indice de sinuosité, de chenaux en tresse et d'anastomose | Téledétection / SIG (quanti) | Tous – uniquement pour les chenaux assez grands |
| V2 variation de la largeur Variation de la largeur des chenaux des années 1930 aux années 1960 | Téledétection/ SIG (quanti) | Tous – uniquement pour les chenaux suffisamment grands |
| V3 variations altimétriques Variation au niveau du lit au cours des 100 dernières années | Coupes transversales/ profils longitudinaux (si dispo) Etude de terrain : preuves d'incision ou d'aggradation (quali et quanti) | Tous – dans le cas où des preuves ou des infos sont disponibles |

VI.3 Notes et périmètres de cadrage visant la consolidation des modèles d'évaluation Carhyce pour le calcul de l'Indicateur morphologique global (IMG) en métropole et en Guyane



| | |
|----------------------|--|
| Titre | Consolidation des modèles d'évaluation Carhyce pour le calcul de l'Indicateur morphologique global (IMG) |
| Description | Note de cadrage |
| Éditeur | Agence française pour la biodiversité (AFB) |
| Rédacteur | Karl Kreutzenberger (Direction de la recherche, de l'expertise et des données) Frédéric Gob (UMR CNRS LGP - Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne) |
| Date de création | 2019-02-19 |
| Dernier modification | 2019-02-28 |
| Diffusion | Interne uniquement |
| Version finale | 1.1 – Validée, Diffusée |

1. Objectif

L'objectif de cette note est de présenter les éléments à mettre en œuvre pour consolider les modèles régionaux de géométrie hydraulique Carhyce dans les HER comptant trop peu de stations de référence (*i.e.* amélioration du plan d'échantillonnage). La mise en œuvre se veut capitaliser sur les collectes déjà réalisées avant d'envisager de nouvelles collectes de données.

2. Contexte

La construction des modèles Carhyce montre que certaines HER ont trop de peu de stations de références (en absolu ou compte tenu de la diversité naturelle de ces HER) pour atteindre une bonne à très bonne significativité statistique pour une ou plusieurs relations de géométrie hydraulique (Figure 1).

Les stations dites de référence sont identifiées sur la base de l'expertise de terrain. Ce sont des stations peu impactées par les activités et les aménagements anthropiques récents (dernières décennies) (Figure 2). Une chenalisation ou un recalibrage exclut de fait une station du pool de référence, les autres marqueurs de pressions tels que les extractions de sédiments, les contrôles des lignes d'eau ou encore la perturbation des débits solides sont vérifiés au cas par cas. Le mode d'identification des stations de référence, au sens du fonctionnement hydromorphologique, est par ailleurs décrit plus précisément dans Tamisier *et al.* (2017).

| Hydro-éco Région | Nb de stations | Largeur | | Profondeur | | Largeur/Prof. | | Prof. mouilles | | Pente | | Surf. mouillée | |
|------------------|----------------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|--------|
| | | R ² | Pvalue |
| 1 | 24 | 0.81 | *** | 0.66 | *** | 0.3 | ** | 0.42 | *** | 0.66 | *** | 0.79 | *** |
| 2 | 16 | 0.49 | ** | 0.17 | NS | 0.39 | ** | 0.01 | NS | 0.83 | *** | 0.48 | ** |
| 3 | 71 | 0.86 | *** | 0.66 | *** | 0.49 | *** | 0.5 | *** | 0.42 | *** | 0.81 | *** |
| 4 | 21 | 0.51 | *** | 0.31 | ** | 0.29 | * | 0.46 | *** | 0.55 | *** | 0.52 | *** |
| 5 | 37 | 0.74 | *** | 0.65 | *** | 0.5 | *** | 0.38 | *** | 0.52 | *** | 0.77 | *** |
| 6 | 13 | 0.73 | *** | 0.77 | *** | 0.19 | NS | 0.12 | NS | 0.54 | *** | 0.84 | *** |
| 7 | 17 | 0.58 | *** | 0.28 | * | 0.27 | * | 0.26 | * | 0.52 | ** | 0.68 | *** |
| 8 | 27 | 0.81 | *** | 0.76 | *** | 0.52 | *** | 0.51 | *** | 0.74 | *** | 0.83 | *** |
| 9 | 32 | 0.77 | *** | 0.55 | *** | 0.12 | NS | 0.23 | ** | 0.16 | * | 0.73 | *** |
| 10 | 32 | 0.82 | *** | 0.7 | *** | 0.14 | * | 0.13 | * | 0.074 | NS | 0.81 | *** |
| 11 | <7 | | | | | | | | | | | | |
| 12 | 64 | 0.88 | *** | 0.75 | *** | 0.36 | *** | 0.17 | *** | 0.21 | *** | 0.91 | *** |
| 13 | 15 | 0.86 | *** | 0.13 | NS | 0.55 | ** | 0.28 | * | 0.59 | *** | 0.88 | *** |
| 14 | 8 | 0.52 | * | 0.45 | NS | 0.012 | NS | 0.46 | NS | 0.74 | ** | 0.52 | * |
| 15 | <7 | | | | | | | | | | | | |
| 16 | 16 | 0.14 | NS | 0.087 | NS | 0.018 | NS | 0.12 | NS | 0.07 | NS | 0.15 | NS |
| 17 | <7 | | | | | | | | | | | | |
| 18 | <7 | | | | | | | | | | | | |
| 19 | 8 | 0.89 | *** | 0.78 | *** | 0.77 | *** | 0.61 | * | 0.94 | *** | 0.87 | *** |
| 20 | <7 | | | | | | | | | | | | |
| 21 | 64 | 0.91 | *** | 0.57 | *** | 0.47 | *** | 0.23 | *** | 0.28 | *** | 0.89 | *** |
| 22 | <7 | | | | | | | | | | | | |

■ Très significatif

■ Significatif

■ Non significatif

Figure 1 : Significativité statistique des modèles: 6 paramètres en fonction de la taille du bassin versant ($y=aQb$)



Figure 2 : Marqueurs de pression servant à la définition des stations de référence

3. Mise en œuvre

- **Périmètre** : Le nombre de stations de référence cibles, référence au sens du fonctionnement hydromorphologique, est généralement d'une dizaine par HER, parfois plus en fonction du contexte de chaque HER (Figure 3).

Pour permettre de compléter le jeu de données existant, deux axes de travail sont privilégiés :

- A. A partir de l'IED, vérifier parmi les stations de type « inconnu / indéterminé » mais déjà collectées avec au moins une opération Carhyce, celles qui pourraient être considérées comme « référence ». C'est à dire ayant connu dans leur histoire récente (quelques décennies) peu de perturbations anthropiques ayant modifié leurs débits liquide et/ou solide (Tamisier et al, 2017). Il convient de s'intéresser particulièrement aux stations dans les gammes manquantes de tailles de bassins versants.

! IMPORTANT : Il s'agira alors de faire preuve d'objectivité et d'impartialité et donc de ne pas s'intéresser uniquement aux stations bordant la droite de régression, sous risque sinon de biaiser les modèles. Pour cela, dans les représentations suivantes des modèles par HER, la droite de régression n'est généralement pas représentée.

- B. Compléter le jeu de données par de la collecte de données Carhyce sur de nouvelles stations, toujours dans les gammes manquantes de tailles de bassins versants.

La figure 15 en fin de document synthétise les HER et directions régionales potentiellement concernées par l'exercice, afin d'organiser au mieux les travaux inter-directions selon cas et d'identifier les risques.

! Attention, pour cet exercice, il ne s'agit pas ici et à ce stade de supprimer des modèles d'évaluation les stations injustement identifiées comme des références. Ces stations peuvent toutefois profiter de l'analyse menée pour être relevées et proposées en déclassement. Elles ne seront toutefois traitées que dans un second temps.

- **Éléments à remonter au niveau national en fin d'exercice, via le fichier joint** :

- (1) Liste des codes stations (Sandre) à 8 chiffres nouvellement identifiées comme des références en précisant si elles font parties de l'axe A ou de l'axe B présentés ci-dessus
- (2) Le cas échéant, liste des codes stations (Sandre) à 8 chiffres anciennement identifiées comme des références et proposées en déclassement, avec un court commentaire justificatif

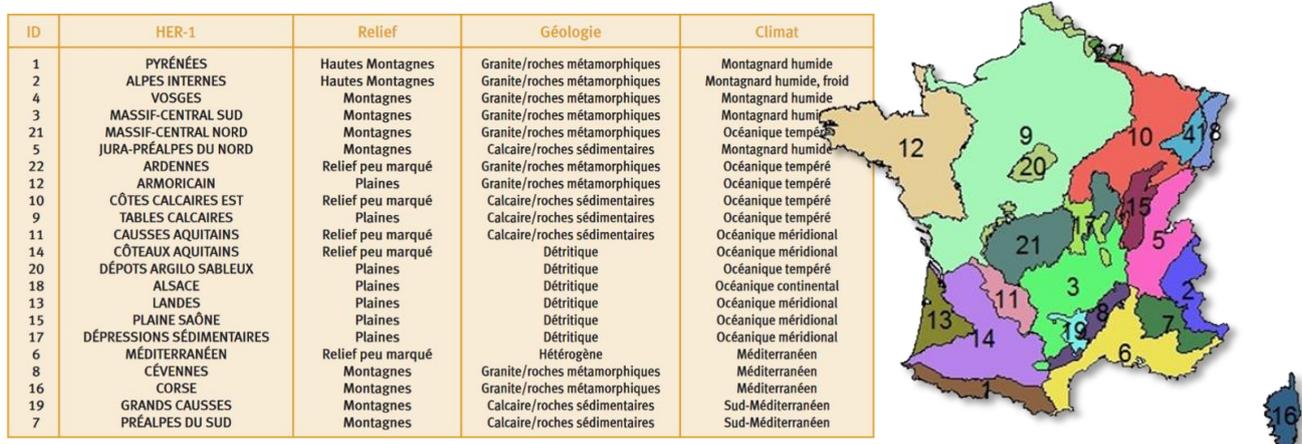


Figure 3 : Carte et caractéristiques de base des hydro-écorégions de niveau 1

A- Pour l'HER « Vosges » (4)

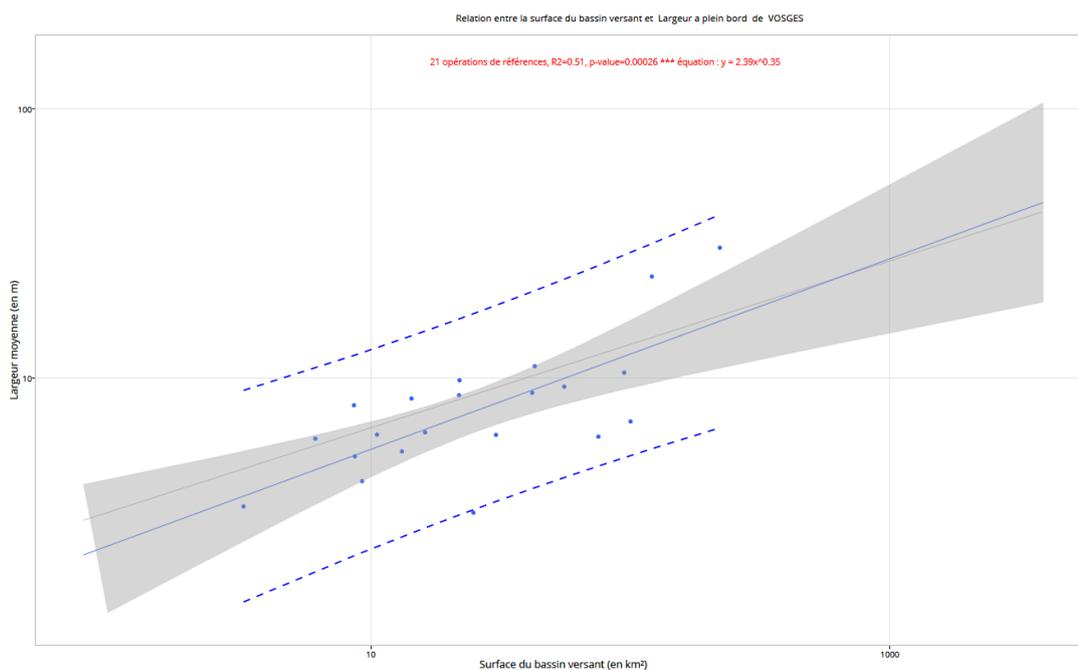


Figure 4 : Représentation IED du modèle largeur à pleins bords vs superficie du bassin versant pour l'HER Vosges

Nous avons :

- 21 stations de référence avec BV compris entre 3 et 220 km²

Nous cherchons :

- 4 à 5 stations de référence avec BV supérieurs à 300 km²

Direction(s) régionale(s) potentiellement concernée(s) : Grand-Est, Bourgogne Franche-Comté

B- Pour l'HER « Méditerranéen » (6)

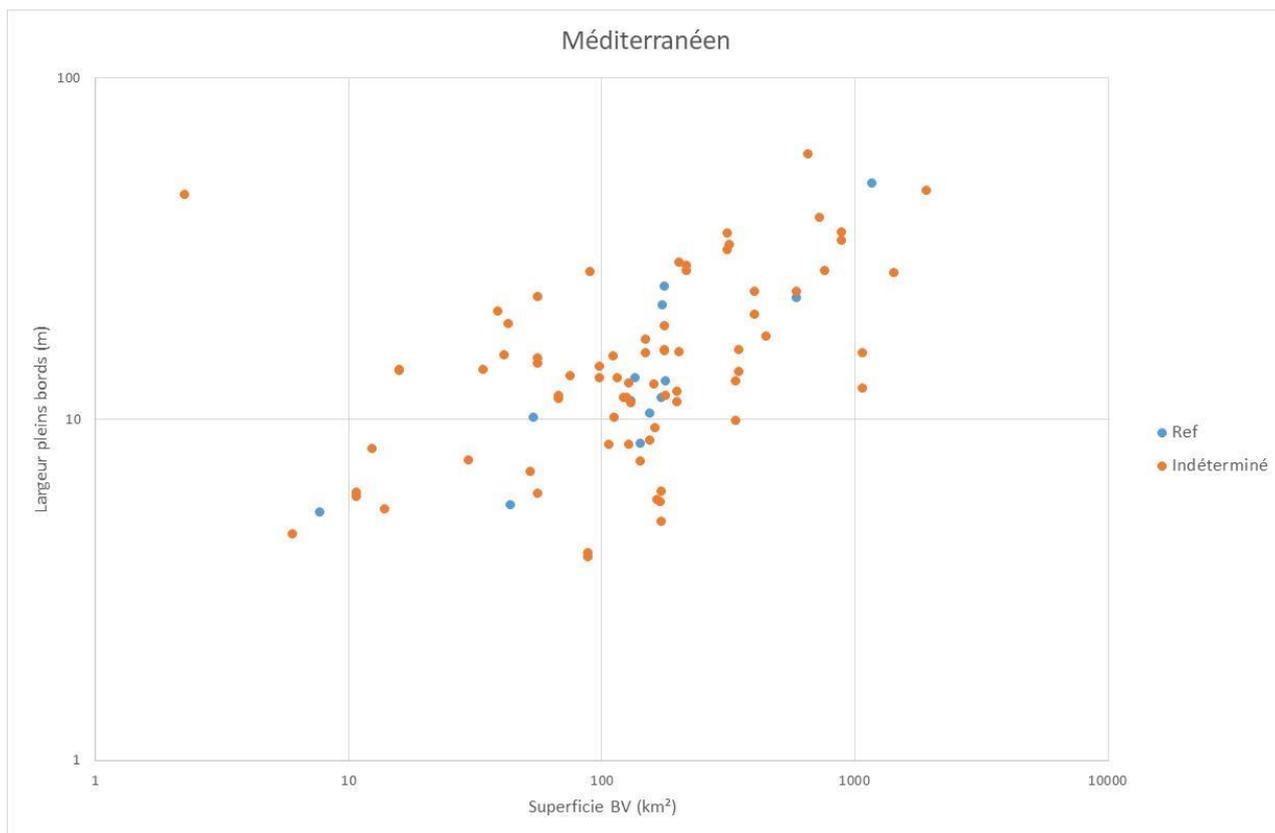


Figure 5 : Représentation du modèle largeur à pleins bords vs superficie du bassin versant pour l'HER Méditerranéen (construite à partir d'une extraction des données d'IED en date du 8 février 2019)

Nous avons :

- 13 stations de référence avec BV compris entre 8 et 1200 km²

Nous cherchons :

- 4 à 5 stations de référence avec BV inférieurs à 50 km²
- 4 à 5 stations de référence avec BV compris entre 200 et 2000 km²

Direction(s) régionale(s) potentiellement concernée(s) : Occitanie, PACA

C- Pour l'HER « Tables calcaires » (9)

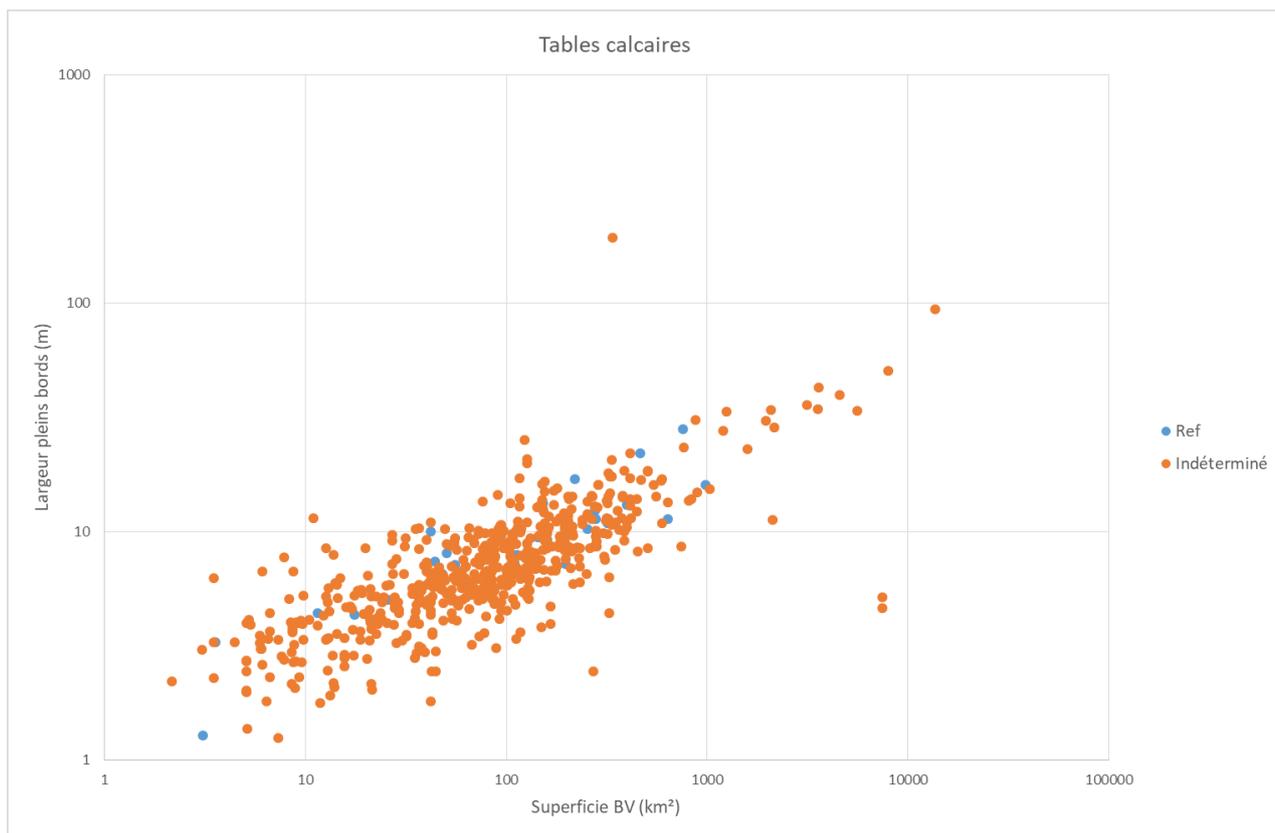


Figure 6 : Représentation du modèle largeur à pleins bords vs superficie du bassin versant pour l'HER Tables calcaires (construite à partir d'une extraction des données d'IED en date du 8 février 2019)

Nous avons :

- 32 stations de référence avec BV compris entre 5 et 1000 km²

Nous cherchons :

- 4 à 5 stations de référence avec BV inférieurs à 30 km²
- A compléter au mieux le bassin parisien

Direction(s) régionale(s) potentiellement concernée(s) : Centre Val-de-Loire, Haut-de-France/Ile-de-France, Nouvelle-Aquitaine

Nb : l'analyse pour cette HER sera consolidée également en parallèle dans le cadre d'une réflexion menée avec le LGP (recrutement en cours)

D- Pour l'HER « Causses aquitains » (11)

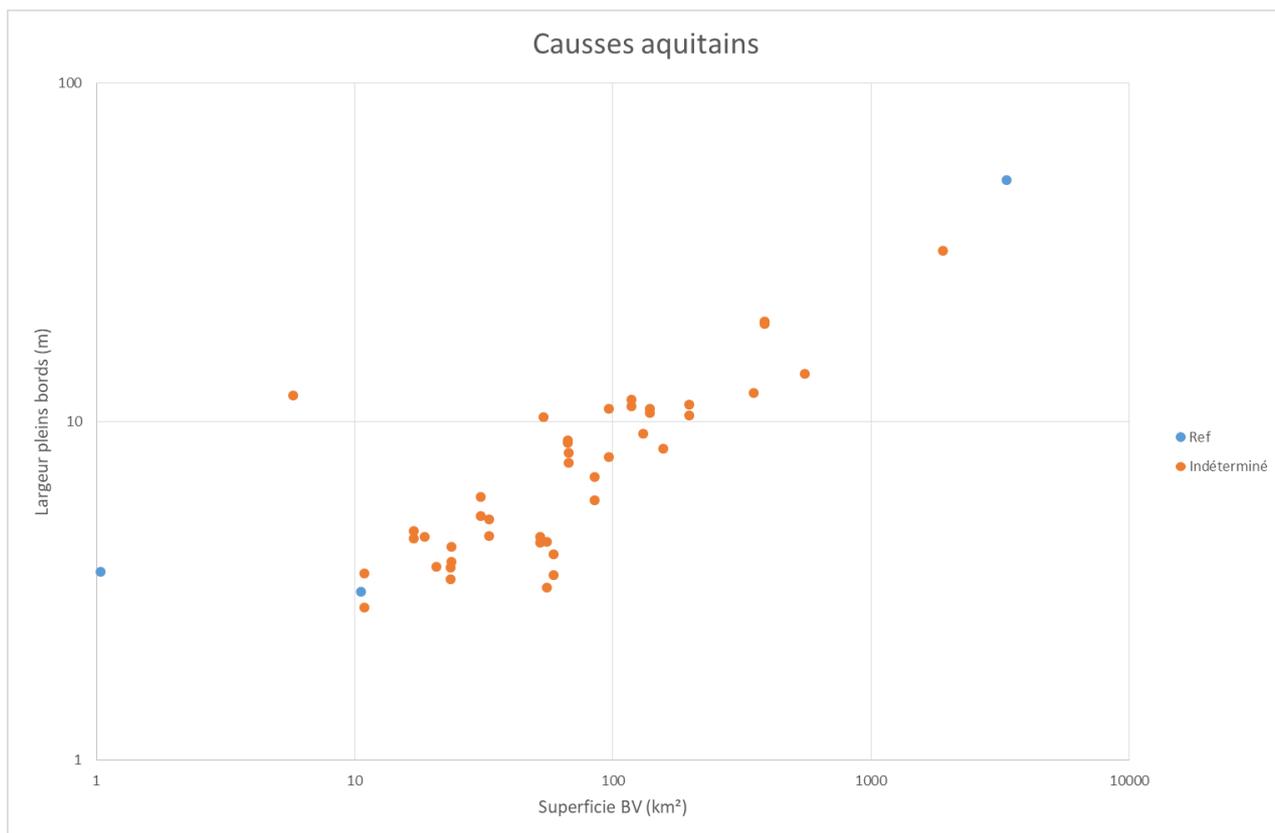


Figure 7 : Représentation du modèle largeur à pleins bords vs superficie du bassin versant pour l'HER Causses aquitains (construite à partir d'une extraction des données d'IED en date du 8 février 2019)

Nous avons :

- 3 stations de référence avec BV compris entre 1 et 3300 km²

Nous cherchons :

- 7 à 8 stations de référence avec BV compris entre 10 et 3000 km²

Direction(s) régionale(s) potentiellement concernée(s) : Nouvelle-Aquitaine, Occitanie

E- Pour l'HER « Landes » (13)

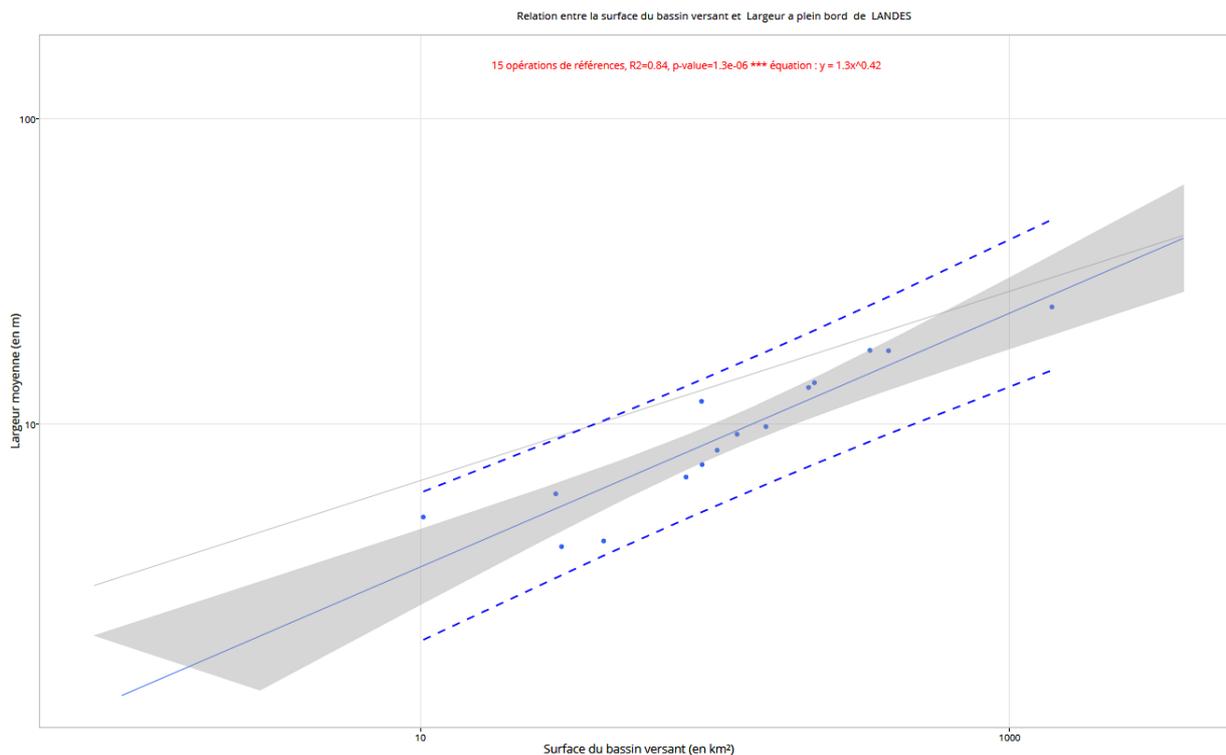


Figure 8 : Représentation IED du modèle largeur à pleins bords vs superficie du bassin versant pour l'HER Landes

Nous avons :

- 15 stations de référence avec BV compris entre 10 et 1400 km²

Nous cherchons :

- 4 à 5 stations de référence avec BV inférieurs à 50 km²
- 3 à 4 stations de référence avec BV compris entre 400 et 1000 km²

Direction(s) régionale(s) potentiellement concernée(s) : Nouvelle-Aquitaine, Occitanie

F- Pour l'HER « Coteaux aquitains » (14)

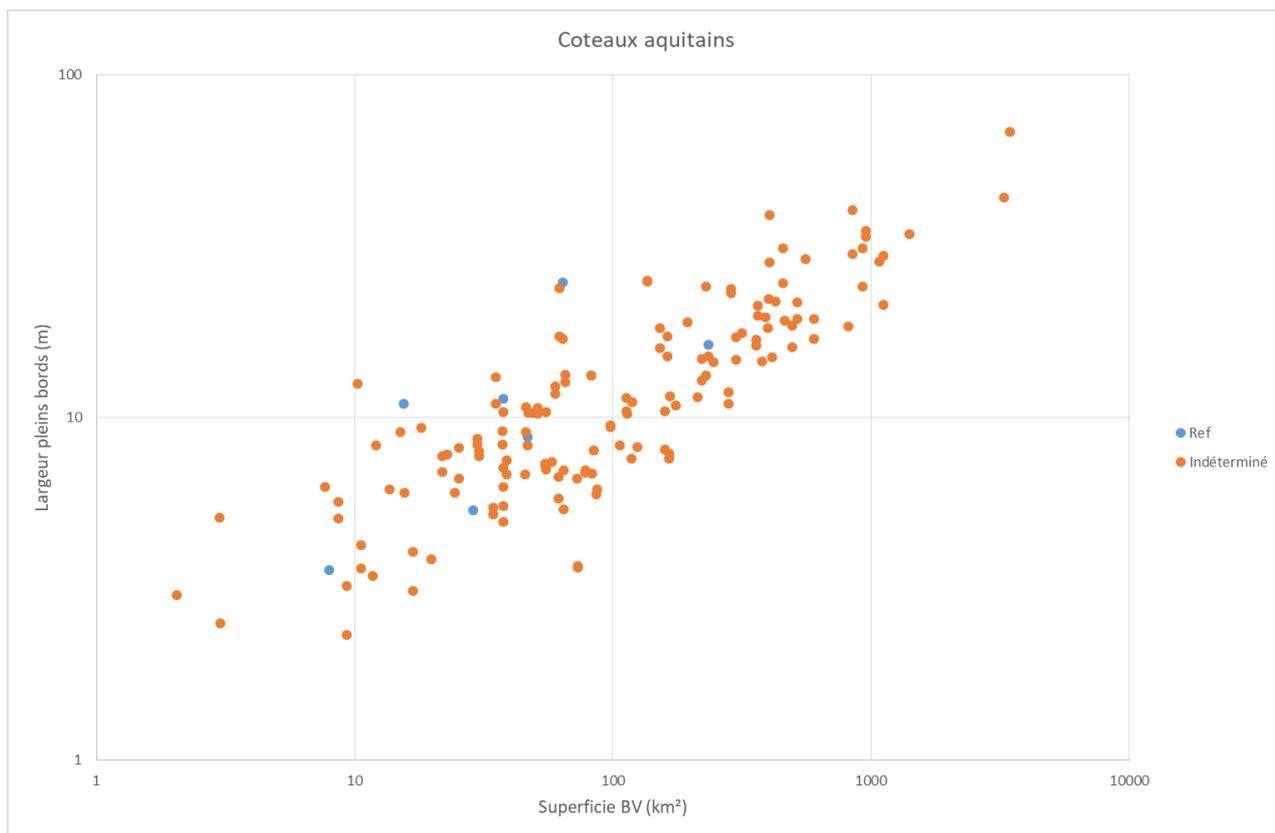


Figure 9 : Représentation du modèle largeur à pleins bords vs superficie du bassin versant pour l'HER Coteaux aquitains (construite à partir d'une extraction des données d'IED en date du 8 février 2019)

Nous avons :

- 8 stations de référence avec BV compris entre 8 et 240 km²

Nous cherchons :

- 2 stations de référence avec BV compris entre 1 et 10 km²
- 5 à 6 stations de référence avec BV compris entre 100 et 3000 km²

Direction(s) régionale(s) potentiellement concernée(s) : Nouvelle-Aquitaine, Occitanie

G- Pour l'HER « Plaine de Saône » (15)

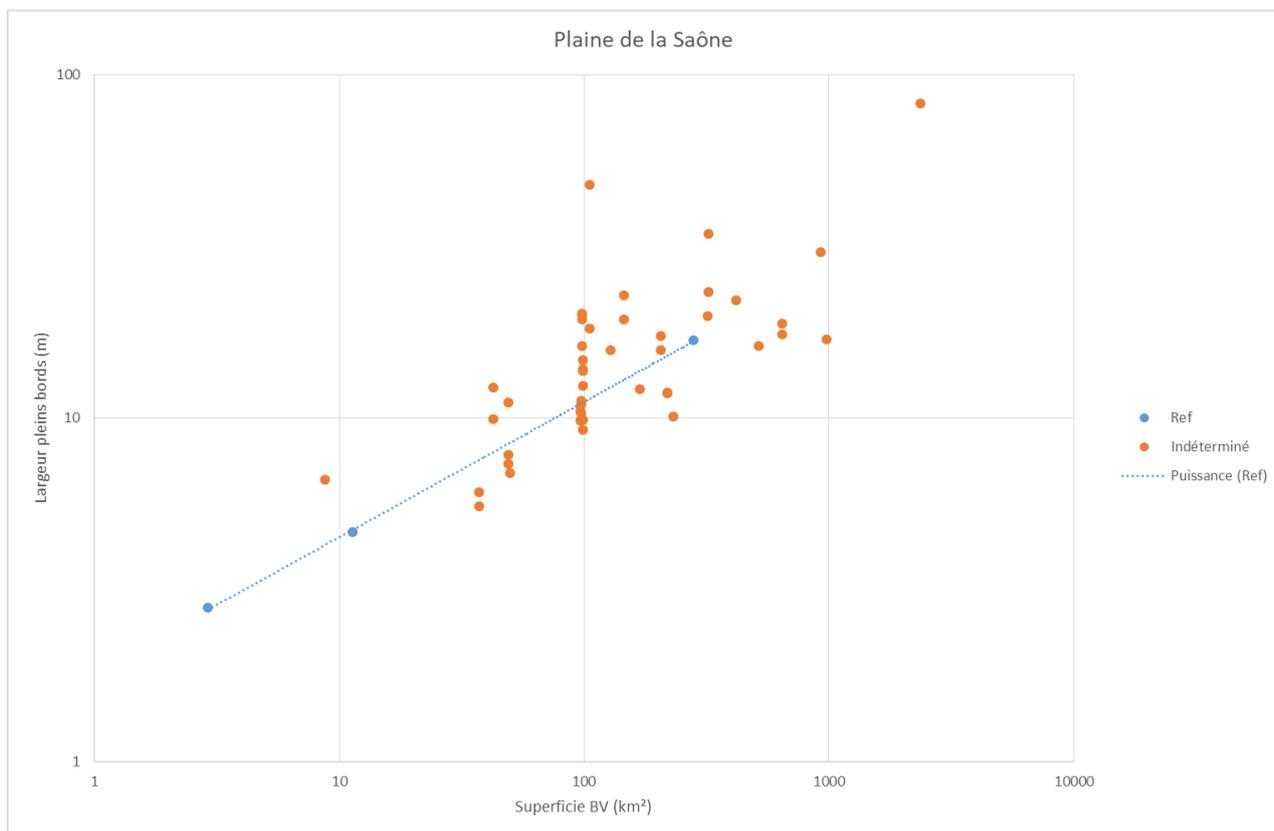


Figure 10 : Représentation du modèle largeur à pleins bords vs superficie du bassin versant pour l'HER Plaine de Saône (construite à partir d'une extraction des données d'IED en date du 8 février 2019)

Nous avons :

- 3 stations de référence avec BV compris entre 3 et 280 km²

Nous cherchons :

- 7 à 8 stations de référence avec BV compris entre 50 et 1000 km²

Direction(s) régionale(s) potentiellement concernée(s) : Bourgogne Franche-Comté, Auvergne Rhône-Alpes, Grand-Est

H- Pour l'HER « Dépressions sédimentaires » (17)

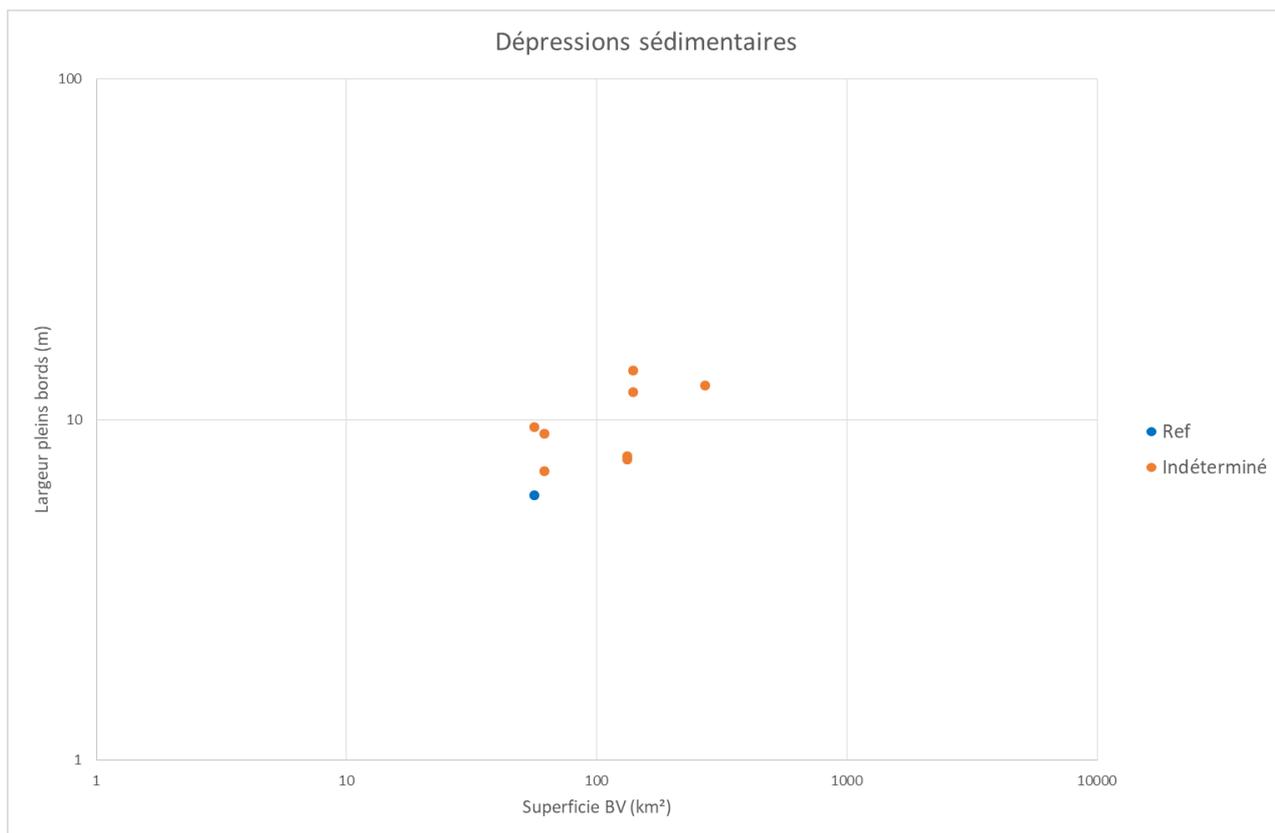


Figure 11 : Représentation du modèle largeur à pleins bords vs superficie du bassin versant pour l'HER Dépressions sédimentaires (construite à partir d'une extraction des données d'IED en date du 8 février 2019)

Nous avons :

- 1 station de référence avec un BV de 56 km²

Nous cherchons :

- ~10 stations de référence avec
 - ➔ Soit BV compris entre 50 et 1000 km² pour celles déjà collectées
 - ➔ Soit BV compris entre 1 et 20 km² puis 300-1000 km² si nouvelle collecte de données

Direction(s) régionale(s) potentiellement concernée(s) : Bourgogne Franche-Comté, Auvergne Rhône-Alpes

I- Pour l'HER « Alsace » (18)

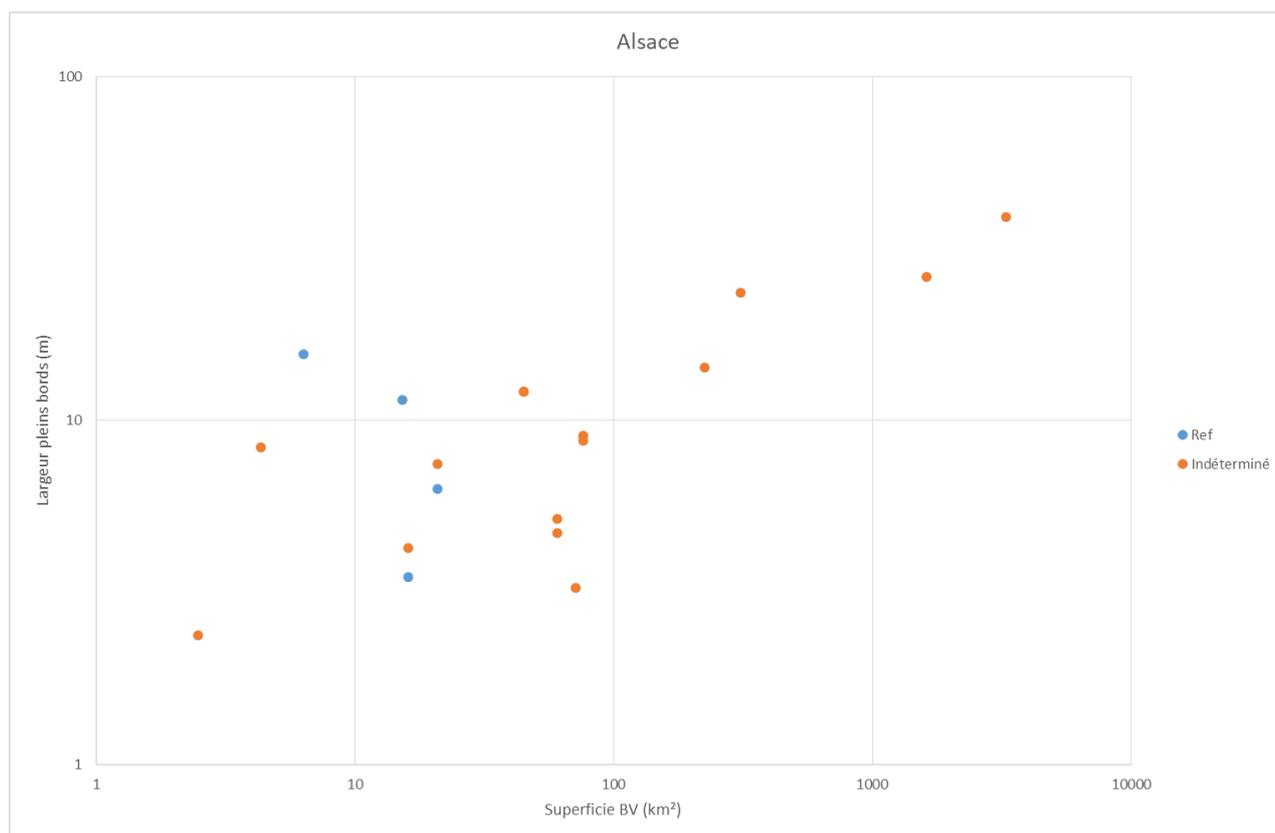


Figure 12 : Représentation du modèle largeur à pleins bords vs superficie du bassin versant pour l'HER Alsace (construite à partir d'une extraction des données d'IED en date du 8 février 2019)

Nous avons :

- 4 stations de référence avec BV compris entre 6 et 20 km²

Nous cherchons :

- 8 à 10 stations de référence avec BV compris entre 10 et 3000 km²

Direction(s) régionale(s) potentiellement concernée(s) : Grand-Est

J- Pour l'HER « Grands causses » (19)

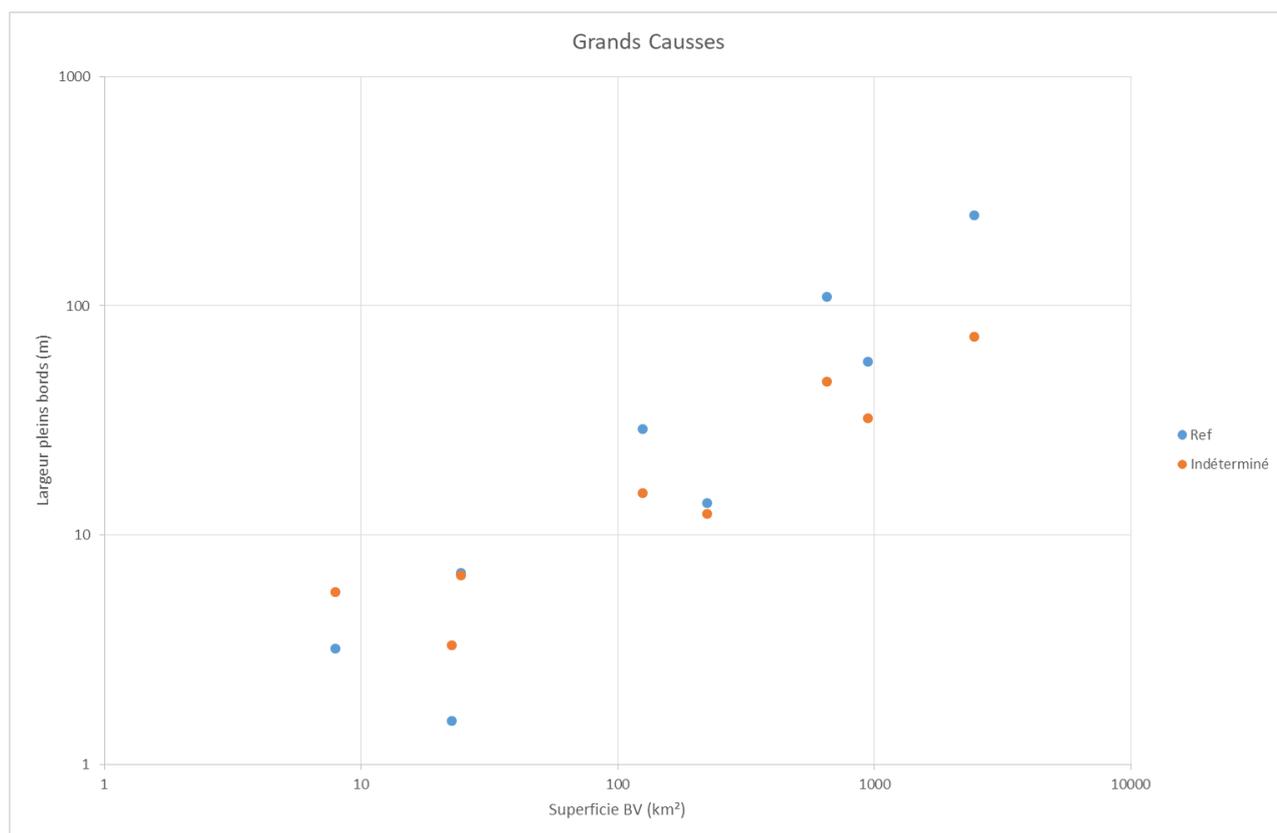


Figure 13 : Représentation du modèle largeur à pleins bords vs superficie du bassin versant pour l'HER Grandes causses (construite à partir d'une extraction des données d'IED en date du 8 février 2019)

Nous avons :

- 8 stations de référence avec BV compris entre 8 et 1400 km²

Nous cherchons :

- 6 à 7 stations de référence avec BV compris entre 10 et 2000 km²

Direction(s) régionale(s) potentiellement concernée(s) : Occitanie, Auvergne Rhône-Alpes

K- Pour l'HER « Dépôts argilo-sableux » (20)

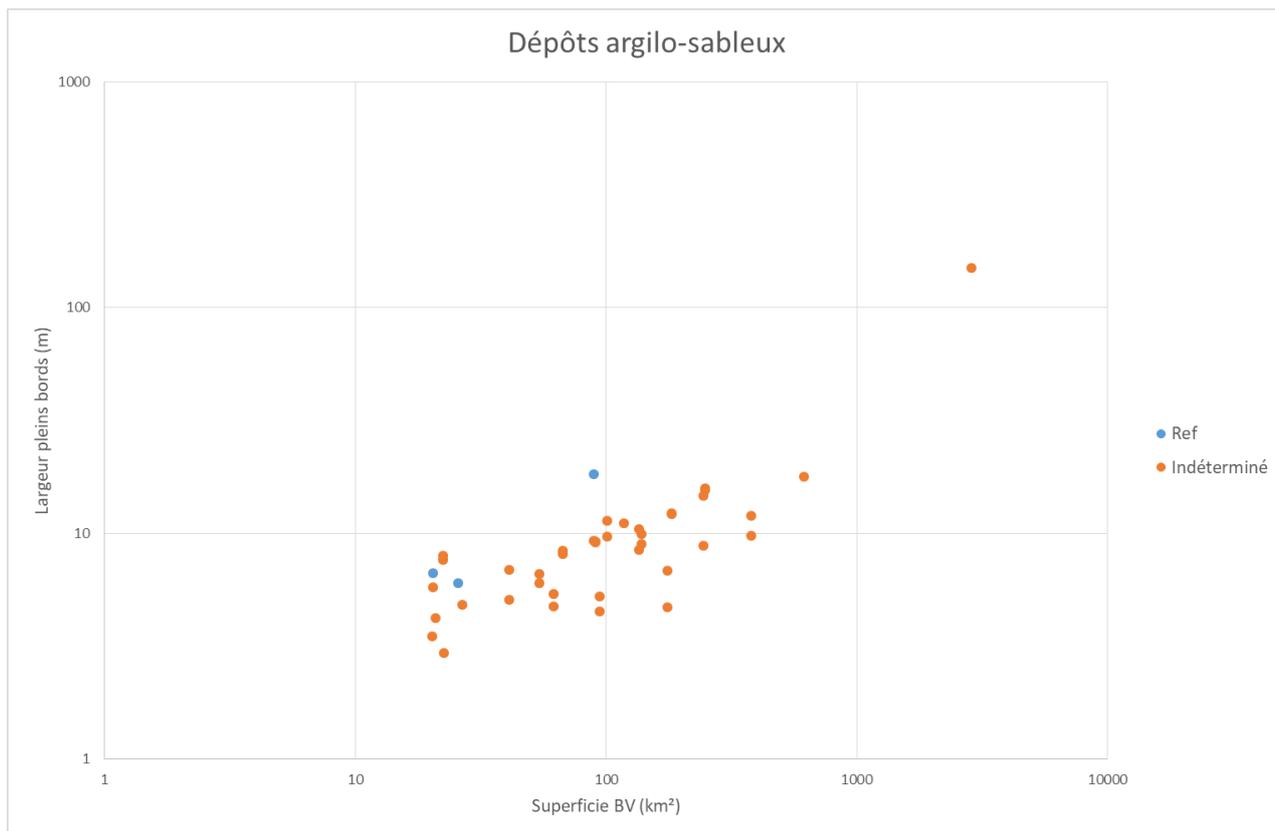


Figure 14 : Représentation du modèle largeur à pleins bords vs superficie du bassin versant pour l'HER Dépôts argilo-sableux (construite à partir d'une extraction des données d'IED en date du 8 février 2019)

Nous avons :

- 3 stations de référence avec BV compris entre 20 et 90 km²

Nous cherchons :

- 7 à 8 stations de référence avec BV compris entre 100 et 1000 km²

Direction(s) régionale(s) potentiellement concernée(s) : Nouvelle-Aquitaine, Centre Val-de-Loire, Haut-de-France/Ile-de-France

M- Pour les HER « Alpes internes » (2) et « Pré-Alpes du sud » (7)

Nb : assez de stations de référence, l'analyse pour ces HER sera consolidée en parallèle dans le cadre d'une réflexion menée avec le LGP (recrutement en cours)

N- Pour l'HER « Côtes calcaires est » (10)

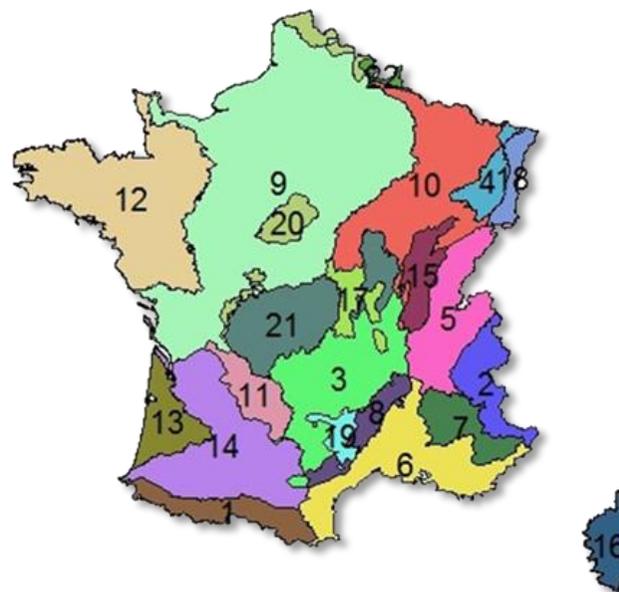
Nb : assez de stations de référence, l'analyse pour ces HER sera consolidée en parallèle dans le cadre d'une réflexion menée avec le LGP (recrutement en cours)

O- Pour l'HER « Corse » (16)

Nb : l'analyse pour cette HER sera consolidée en parallèle dans le cadre d'une réflexion menée avec le LGP (recrutement en cours)

4. Bibliographie

Tamisier V., Gob F., Bilodeau C. et Thommeret N. (2017) – Caractérisation hydromorphologique des cours d'eau français (Carhyce). Valorisation des données Carhyce pour la construction d'un outil d'aide à la gestion des cours d'eau. Rapport scientifique CNRS (LGP-LADYSS)/Université de Paris Panthéon-Sorbonne/ESGT/AFB, 142 p.



| HER consolidée | Haut-de-France Ile-de-France | Bretagne | Grand-Est | Centre Val-de-Loire | Auvergne Rhône-Alpes | Occitanie | PACA | Bourgogne Franche-Comté | Nouvelle- Aquitaine | Total DR cibles |
|--------------------------------|---------------------------------|----------|-----------|------------------------|-------------------------|-----------|----------|----------------------------|------------------------|-----------------|
| Vosges (4) | | | X | | | | | | | 1 |
| Méditerranéen (6) | | | | | | X | X | | | 2 |
| Tables calcaires (9) | X | | | X | | | | | X | 3 |
| Causses aquitains (11) | | | | | | X | | | X | 2 |
| Landes (13) | | | | | | X | | | X | 2 |
| Coteaux aquitains (14) | | | | | | X | | | X | 2 |
| Plaine de Saône (15) | | | X | | X | | | X | | 3 |
| Dépressions sédimentaires (17) | | | | | X | | | X | | 2 |
| Alsace (18) | | | X | | | | | | | 1 |
| Grands causses (19) | | | | | X | X | | | | 2 |
| Dépôts argilo-sableux (20) | X | | | X | | | | | X | 3 |
| Ardennes (22) | X | | | | | | | | | 1 |
| Total HER cibles | 3 | 0 | 3 | 2 | 3 | 5 | 1 | 2 | 5 | |

Figure 16 : Synthèse des HER et directions régionales AFB potentiellement concernées par la consolidation des modèles d'évaluation Carhyce

| | |
|-----------------------|--|
| Titre | Consolidation des modèles d'évaluation Carhyce pour le calcul de l'Indicateur morphologique global (IMG) en Guyane |
| Description | Note de cadrage |
| Éditeur | Agence française pour la biodiversité (AFB) |
| Rédacteur | Karl Kreutzenberger (Direction de la recherche, de l'expertise et des données) Frédéric Gob (UMR CNRS LGP - Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne) |
| Date de création | 2019-04-19 |
| Dernière modification | 2019-06-30 |
| Diffusion | Interne et partenaires du projet uniquement |
| Version finale | 1.0 validée |

1. Objectif

L'objectif de cette note est de présenter les éléments à mettre en œuvre pour consolider les modèles régionaux de géométrie hydraulique Carhyce pour la Guyane (*i.e.* amélioration du plan d'échantillonnage).

2. Contexte

La construction des modèles Carhyce montre que la Guyane présente trop de peu de stations échantillonnées et notamment de références (en absolu ou compte tenu de la diversité naturelle du territoire) pour atteindre une bonne à très bonne significativité statistique pour une ou plusieurs relations de géométrie hydraulique (Figure 1) (Tamisier *et al.*, 2017b).

Les stations dites de référence sont identifiées sur la base de l'expertise de terrain. Ce sont des stations peu impactées par les activités et les aménagements anthropiques récents (dernières décennies) (Figure 2). Une chenalisation ou un recalibrage exclut de fait une station du pool de référence, les autres marqueurs de pressions tels que les extractions de sédiments, les contrôles des lignes d'eau ou encore la perturbation des débits solides sont vérifiés au cas par cas. Le mode d'identification des stations de référence, au sens du fonctionnement hydromorphologique, est par ailleurs décrit plus précisément dans Tamisier *et al.* (2017a).

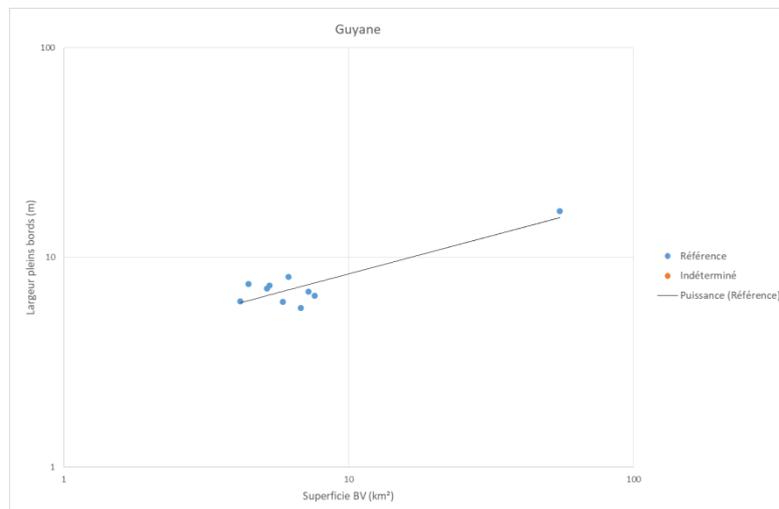


Figure 1 : Présentation du modèle de géométrie hydraulique liant la largeur à pleins bords (m) à la superficie du bassin versant (km²) pour l'échantillonnage Carhyce en Guyane



Figure 2 : Marqueurs de pression servant à la définition des stations de référence

3. Mise en œuvre

- **Périmètre** : Le réseau hydrographique de Guyane comprend des cours d'eau de dimension très variables mais à plus de 70 % composé de petits cours d'eau. Comme pour tout autre territoire, la taille des bassins versants, variable, y est un facteur important conditionnant le fonctionnement et le style fluvial des cours d'eau. Or, si l'on ne tient compte que des cours d'eau sur lesquels le protocole Carhyce a été appliqué (10 stations entre 2014 et 2015), il s'agit généralement de petits cours d'eau à petits bassins versants (< 15-20km²) (parmi les 70% du réseau recouvrant le territoire donc) et toujours dans les mêmes spécificités. Ce manque de variabilités dans les données rend peu fiable la construction de modèles statistiques (et donc d'indicateurs) représentatifs du fonctionnement hydromorphologique des cours d'eau guyanais.

Il s'agirait donc d'échantillonner des tailles de bassins versants plus importantes (dans la gamme des 20 à 100km²). La collecte de données visera 15 stations en plus des 10 déjà collectées entre 2014 et 2015, exclusivement des références, en respectant les prescriptions du protocole.

A priori en effectif comme en longueur de linéaire hydrographique, les ruisseaux à énergie faible ou modérée dans des pentes inférieures à 6% représentent 90 à 95% des cours d'eau rencontrés en Guyane, pour des rangs de Strahler 0-3. Les 5 autres % sont pour l'essentiel des ravines, quelques rivières à fond de vallée modéré à large (réparties à l'équilibre entre fonds rocheux et rivières alluviales), ainsi que quelques grands cours d'eau. D'un point de vue typologique, il s'agira donc de viser, pour ces 15 stations, des cours d'eau alluviaux de rang réduit.

- **Éléments à remonter au niveau national en fin d'exercice** :

- (1) Données saisies dans l'application web Carhyce : <http://carhyce.eaufrance.fr/>
- (2) Liste des codes stations (Sandre) à 8 chiffres nouvellement identifiées comme des références, via le fichier joint

4. Bibliographie

Tamisier V., Gob F., Bilodeau C. et Thommeret N. (2017a) – Caractérisation hydromorphologique des cours d'eau français (Carhyce). Valorisation des données Carhyce pour la construction d'un outil d'aide à la gestion des cours d'eau. Rapport scientifique CNRS (LGP-LADYSS)/Université de Paris Panthéon-Sorbonne/ESGT/AFB, 142 p.

Tamisier V., Raufaste S., Gob F., Thommeret N. et Bilodeau C. (2017b) – Caractérisation hydromorphologique des cours d'eau français d'outremer (Carhyce). Spécificités, modalités d'application et valorisation des données Carhyce pour la construction d'un outil d'aide à la gestion des cours d'eau. Rapport scientifique CNRS (LGP-LADYSS)/Université de Paris Panthéon-Sorbonne/ESGT/AFB, 128 p.