



Tous engagés
pour la biodiversité

Comparaison des outils d'évaluation hydromorphologique pour la restauration écologique des cours d'eau

Sous la direction de Frédéric Gob



Mémoire de recherche de **Camille FRAUDIN** (n° étudiant : 11542894)

Membres du jury :

- **Frédéric Gob** : Tuteur de mémoire, Maitre de conférences (Paris 1 Panthéon Sorbonne, LGP)
- **Laurent Lespez** : Professeur des Université en Géographie (Paris-Est Créteil Val de Marne)
- **Clément Pont** : Ingénieur d'étude (LGP)

Couverture : La Glane à Ouradour sur Glane (Photographie personnelle)

Sommaire

Remerciements	I
Index des Figures	II
Index des Tableaux	III
Table des Annexes	IV
Introduction	1
Etat de la question	4
La notion de « situation de référence » (DCE, 2000)	4
La cohérence régionale des situations de référence	6
CARactérisation Hydromorphologique des Cours d'Eau (Carhyce)	9
Principe & Théorie	9
Définition des stations Carhyce de référence	9
Traitements des données Carhyce	11
Sur le terrain	14
Traitement <i>post</i> enquête	16
La granulométrie	17
La ripisylve	19
Les données géographiques complémentaires	21
L'indice de sinuosité	21
The Morphological Quality Index	23
Principe & théorie	23
Mise en pratique	25
Le degré de confinement	26
Typologie morphologique des chenaux	28
Autres éléments de délimitation	29
Les outils	29
L'évaluation	30
L'Indice Poisson Rivière	33
Données utilisées	35
Zone d'étude	36
Le Massif Central Nord	37
Méthodologie	38
Analyse SIG	38
Relevés de terrain	41
Automatisation de la méthode	42
Résultats	44

1 ^{er} résultats : les stations prospectées à pied	44
Score IMG et analyse	44
Scores MQI et analyses.....	57
Résultats de la systématisation du MQI.....	63
Calcul du MQI global	63
Calcul du MQI avec des éléments de géométrie du lit uniquement.....	69
Discussion.....	75
Les résultats des stations prospectées à pied	75
Les résultats de la systématisation de la méthode avec un MQI global	76
Les résultats de la systématisation de la méthode avec un MQI basé essentiellement sur la géométrie du lit.....	77
Perspectives.....	77
Conclusion	79
Bibliographie.....	80
Ouvrages et articles.....	80
Webographie.....	83
Annexes	84

Remerciements

Je tiens à remercier en tout premier lieu mon tuteur de mémoire, Frédéric Gob, qui m'a donné l'occasion d'effectuer un stage de recherche au sein du LGP alors que ma situation était quelque peu compliquée. Il m'a accompagnée dans mes recherches tout au long de l'année. Sa disponibilité et sa patience durant la réalisation de ce mémoire m'ont également beaucoup aidée.

Je tiens ensuite à remercier Clément Pont, pour son aide précieuse en informatique et en traitement de données, qui m'a permis de faire une étude statistique poussée et précise, ainsi que pour ces conseils très utiles en SIG.

Leur aide conjointe et la place qu'ils m'ont donnée au sein de cette équipe de travail a pour moi été le moyen de découvrir le monde professionnel de la recherche, qui s'est avéré être une expérience très enrichissante et très plaisante, que j'espère avoir l'occasion de réitérer l'année prochaine.

Je remercie également Nathalie Thommeret, pour les corrections qu'elle a apportées à mes résultats ainsi qu'à mes graphiques, qui ont permises une meilleure interprétation de ces derniers.

Je souhaite aussi remercier Jean-Marc Rohrbasser pour les relectures et les corrections apportées à mon mémoire, qui sont toujours d'une grande aide.

Enfin je voudrais remercier Alicia Ringeisen et Andy Eme pour leurs conseils afin que ce mémoire soit plus accessible aux non géomorphologues.

Cette étude n'aurait pu être menée à bien sans l'aide financière de l'Office Français de la Biodiversité. Mes remerciements leur sont également adressés.

Index des Figures

Figure 1 : répartition des stations Carhyce de référence en France métropolitaine	10
Figure 2 : carte des stations IPR+ considérées comme peu altérées, altérées ou non définies, d'après Tamisier et al., 2014.....	11
Figure 3 : exemple de modèle à plein bord par HER pour la largeur à plein bord en fonction de la surface du bassin versant (d'après Gob et al., 2014).....	12
Figure 4 : schéma récapitulatif des différentes étapes de traitement des données Carhyce	13
Figure 5 : délimitation de la largeur à plein bord pour les rivières en gorge (d'après Kreutzenberger et al., 2017)	14
Figure 6 : délimitation de la largeur à plein bord (d'après Kreutzenberger et al., 2017)	14
Figure 7 : délimitation de la largeur à plein bord pour les rivières avec des îles et des bancs (d'après Kreutzenberger et al., 2017).....	14
Figure 8 : courbe granulométrique de la station Aixette à Aixe sur Vienne (d'après la base de données en ligne Carhyce)	17
Figure 9 : Classification de WentWorth utilisée pour les relevés granulométriques Carhyce	18
Figure 10 : diagramme triangulaire de la répartition granulométrique à Aixette à Aixe sur Vienne par rapport au reste du Massif Central Nord (d'après la base de données en ligne Carhyce).....	18
Figure 11 : typologie de la ripisylve utilisée dans le traitement des données Carhyce (d'après Tamisier et al., 2014)	19
Figure 12 : diagramme triangulaire du score ripisylve d'Aixette à Aixe sur Vienne (d'après la base de données en ligne Carhyce).....	19
Figure 13 : Bassin versant des stations Carhyce visitées sur le terrain lors de ce mémoire	21
Figure 14 : méthode de calcul de l'indice de sinuosité (d'après Bravard & Malavoi, 2010)	22
Figure 15 : Schéma des différentes phases d'analyse du MQI (traduit de Rinaldi et al, 2014)	23
Figure 16 : classes de confinement illustrées	27
Figure 17 : illustration de la Basic River Tipology d'après (Rinaldi et al., 2011)	29
Figure 18 : Carte des stations sur lesquelles se basent les modèles d'évaluation de l'IPR, réparties dans huit unités hydrologiques (in Oberdorff et al., 2002)	33
Figure 19 : Les hydro éco régions de niveau 1, classées selon leurs particularités climatiques, lithologiques, hydrologiques et de relief (d'après Wasson et al., 2002)	36
Figure 20 : Exemple type d'une étude SIG pré enquête de terrain, dans l'HER 21	39
Figure 21 : Etude orthophographique menée sur Briance sur Vienne dans le Massif Central Nord à l'époque actuelle.....	40
Figure 22 : Etude photographique de la station de Briance sur Vienne, dans le Massif Central Nord, dans les années 1950-1965.....	40
Figure 23 : Exemple d'observation de la station de la Creuse à Clairavaux (photographie personnelle)	41
Figure 24 : Localisation des stations Carhyce prospectées dans le Massif Central Nord	44
Figure 25 : diagrammes des IMG des stations prospectées dans le Massif Central Nord, dont les valeurs se situent entre 0 et 1 et correspondent à 68% du total des résidus des stations de référence pour cette HER, ce qui montre un écart au modèle très faible.....	46
Figure 26 : Photographie de la Bouzanne à la Cluis	47
Figure 27 : Photographie de la Diège au Moulin de Beaune	48
Figure 28 : diagrammes des IMG des stations prospectées dans le Massif Central Nord, dont les valeurs se situent entre 0 et 2 et correspondent à 95% du total des résidus des stations de référence pour cette HER, ce qui montre un écart au modèle moyen.....	51
Figure 29 : Photographie de la Petite Creuse à Fresselines (1), de l'Aurence à Aixe du Vienne (2), de l'Aixette à Aixe sur Vienne (3), de la Creuse à Clairavaux (4), de la Vienne à Saint Setier (5), de l'Indre à Briantes (6), et de la Creuse à Fresselines (7)	52
Figure 30 : diagrammes des IMG des stations prospectées dans le Massif Central Nord, dont les valeurs se situent entre 0 et 3 et correspondent à 98% du total des résidus des stations de référence pour cette HER, ce qui montre un écart au modèle assez fort	55
Figure 31 : Photographies de la Glane à Ouradour (1), de l'Indre à Ardentès (2), du Taurion à Gentoux Pigerolles (3), de la Creuse à Glénic (4), de la Vienne à Saint Priest (5) et de la Briance à Condat sur Vienne (6)	56
Figure 32 : répartition des occurrences des scores MQI pour les stations prospectées du Massif Central Nord ..	57

Figure 33 : Nuage de point de la répartition des scores MQI et IMG des stations prospectées dans le Massif Central Nord	58
Figure 34: Boîtes à moustaches de l'ensemble stations prospectées dans le Massif Central Nord	59
Figure 35 : Etude du tronçon Carhyce par rapport au tronçon du MQI et des la répartition des ROE sur ces tronçons	60
Figure 36 : Nuage de points du MQI par rapport à l'IMG des stations Carhyce altérées et non altérées	63
Figure 37: Courbe d'occurrence du MQI global des stations altérées et non altérées	64
Figure 39 : Boîtes à moustache des stations de la France pour un MQI global sans différenciation des stations de référence et des stations altérées	66
Figure 38 : Boîte à moustache des stations altérées et non altérées pour un MQI global	66
Figure 40 : Boîte à moustache par HER des stations altérées et non altérées pour un MQI global	68
Figure 41 : Nuage de points du MQI selon la géométrie du lit des cours d'eau par rapport à l'IMG des stations non altérées et altérées.....	69
Figure 42 : Courbe d'occurrence du MQI selon la géométrie du lit des cours d'eau des stations altérées et non altérées.....	70
Figure 43 : Boîte à moustache des stations altérées et non altérées pour un MQI selon la géométrie du lit	71
Figure 44 : Boîtes à moustache des stations de la France pour un MQI basé sur la géométrie du lit sans différenciation des stations de référence et des stations altérées	72
Figure 45 : Boîte à moustache par HER des stations altérées et non altérées pour un MQI basé sur la géométrie du lit	74
Figure 46 : Carte de la répartition des stations Carhyce à l'échelle de la France métropolitaine ainsi que de leur IMG comparés à ceux du Massif Central nord	76

Index des Tableaux

Tableau 1: Tableau résumant les coefficients <i>a</i> et <i>b</i> , issus de différentes sources, des premières études faites sur les équations régionales de différentes régions des Etats-Unis (d'après Johnson & Fecko, 2008).....	7
Tableau 2 : Synthèse des coefficients des équations de géométrie hydrauliques régionalisées pour la France (d'après Gob et al., 2014).....	8
Tableau 3 : Tableau récapitulatif des éléments de géométrie du lit et de composition du lit pris en compte dans les relevés Carhyce	15
Tableau 4 : Tableau récapitulatif des paramètres géométriques calculé par point (d'après Tamisier et al., 2014)	16
Tableau 5 : Tableau récapitulatif des paramètres géométriques calculés par transect (d'après Tamisier et al, 2014)	16
Tableau 6 : Tableau récapitulatif des paramètres calculés par station (d'après Tamisier et al., 2014)	17
Tableau 7 : tableau du score de ripisylve Carhyce (d'après Tamisier et al., 2014)	20
Tableau 8 : tableau récapitulatif des différents éléments de délimitation d'un cours d'eau	25
Tableau 9 : tableau récapitulatif des trois classes de confinement d'un cours d'eau (d'après Rinaldi et al., 2016)	27
Tableau 10 : tableau récapitulatif des indices de sinuosité, de tressage et d'anabrancheage	28
Tableau 11 : Tableau 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	30
Tableau 12 : tableau de la classification de la qualité hydromorphologique des cours d'eau selon le MQI	32
Tableau 13 : Tableau des données d'IPR utilisées pour l'automatisation de l'évaluation MQI	42
Tableau 14 : Tableau présentant les caractéristiques principales des cours d'eau prospectés.....	44
Tableau 15 : Tableau résumé des calculs du score MQI pour les quinze stations du Massif Central Nord	62
Tableau 16 : Tableau récapitulatif du nombre de stations Carhyce par HER et des HER contenant trop peu de stations pour une étude statistique représentative	67

Table des Annexes

<i>Annexe 1 : tableau récapitulatif des données et des méthodes utilisées pour chaque notion évaluée</i>	84
<i>Annexe 2 : tableau évaluatif type d'un cours d'eau grâce au MQI (d'après Rinaldi et al., 2016).....</i>	88
<i>Annexe 3 : Tableau récapitulatif des données utilisées pour automatiser l'évaluation du MQI</i>	93

Introduction

L'objectif de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE, 2000/60/CE) est de garantir la gestion durable de la ressource en eau au sein de l'Union Européenne. Pour cela, sont mis en place des plans de gestion de bassins hydrographiques et des programmes de mesures de l'altérité des cours d'eau. Le but de ces mesures est d'avoir une vision précise et chiffrée de l'évolution de la protection et de la gestion durable des cours d'eau, en Europe. L'objectif général est d'atteindre un bon état écologique des cours d'eau, c'est-à-dire de restaurer ou de protéger les rivières et les fleuves de manière à ce que l'eau s'écoule en qualité suffisante et assez pour garantir la durabilité des écosystèmes qui dépendent de celles-ci, y compris les sociétés humaines.

Un cours d'eau est altéré lorsque son fonctionnement est modifié, c'est-à-dire lorsqu'il ne parvient plus à se réguler seul, que ce soit chimiquement, biologiquement ou hydromorphologiquement (Bunn & Arthington, 2002). Les altérations sont principalement dues à l'homme, et aux modifications du paysage que celui-ci engendre.

Les différentes mesures de gestion pour la restauration écologique des cours d'eau mises en place peuvent être d'ordre biologique (Oberdorff *et al.*, 2002), chimique, mais aussi d'ordre hydromorphologique, puisque les trois sont considérés comme influents directs de la biodiversité aquatique et de la qualité de l'eau.

Plusieurs travaux ont déjà montré l'importance de l'hydromorphologie sur les espèces aquatiques (Bunn & Arthington, 2002). En effet, si le taux d'espèces animales et végétales est un indicateur fort et connu de la qualité de l'eau, l'hydromorphologie conditionne aussi la prospérité des biotopes qui y vivent. De fait, les transformations qu'opère l'homme sur la nature, en modifiant le régime hydrologique, en réduisant la continuité écologique, en minimisant la prise en compte des différents biomes et de leur équilibre (DCE, 2005), sont autant de perturbations importantes sur la biodiversité que la DCE souhaite préserver. Ainsi, si l'Europe souhaite l'amélioration de la qualité écologique des cours d'eau, elle ne peut ignorer le contexte hydromorphologique de ceux-ci (Gob *et al.*, 2014a).

La prise en compte des études hydromorphologiques à l'échelle décisionnelle a été plus longue que pour les études chimiques ou biologiques. Il existe cependant aujourd'hui des méthodes de mesures précises approuvées depuis plusieurs années par les institutions nationales et européennes. Elles permettent une meilleure compréhension du rôle de la morphologie des cours d'eau dans leur altération et prennent une large part dans les opérations de restauration qui seront mises en œuvre par la suite (Gob *et al.*, 2014a).

Le choix des procédés hydromorphologiques, pour assurer la restauration écologique des cours d'eau est laissé à chaque Etat membre. En clair, chaque pays définit quels éléments hydromorphologiques permettent d'observer l'évolution de l'altérité d'un cours d'eau, et quels sont les outils les plus à même de mesurer ces évolutions. De fait plusieurs méthodes ont émergé. Les stratégies sont cependant souvent tournées vers une étude composite entre géomatique (Systèmes de l'Information Géographique (SIG), télédétection), et étude de terrain. L'Indice de Qualité Morphologique (MQI), développé en Italie, est un indicateur mixte qui se base sur du SIG et de la télédétection où il s'agit de vérifier ensuite les données trouvées sur le terrain (Rinaldi *et al.*, 2013). D'autres reposent essentiellement sur des mesures physiques, comme l'étude des rivières des Carpates polonaises menée par B. Wyzga *et al.* (2012). Il y a encore la méthode Syrah (SYstème Relationnel de l'Audit de l'Hydromorphologie des cours d'eau), mise au point par Chandesris *et al.* (2008) qui s'appuie essentiellement sur les traitements géomatiques afin de mettre au point une cartographie des potentialités d'altération, à l'échelle de la France (Chandesris *et al.*, 2008).

La question des échelles d'application de ces modèles se pose dès lors que la majeure partie des travaux a été réalisée à l'échelle locale et/ou régionale. En effet, travailler à l'échelle d'une région, d'un bassin versant ou d'un tronçon de rivière donne une vision très hétérogène. Cependant, il est important de varier les échelles afin d'avoir une vision d'ensemble du cours d'eau : comprendre le fonctionnement en aval nécessite de savoir ce qui se passe en amont. Il existe peu de modèles œuvrant à une échelle nationale, permettant d'avoir une vision plus exhaustive de l'état d'altération des cours d'eau, et ainsi d'agir globalement et au niveau gouvernemental pour une restauration durable. C'est d'ailleurs ce que déplore le rapport de la DCE lorsqu'il parle d'un manque de législation nationale sur le sujet (DCE, 2005). Pour autant, l'application de tels protocoles à l'échelle d'un pays est difficile parce qu'elle implique un coût économique, humain et technique très lourd.

On note aussi un certain nombre de limites à ces méthodes. Souvent, elles se focalisent sur la description des habitats aquatiques et rivulaires, en travaillant sur des données principalement qualitatives qui ne permettent pas une description complète des cours d'eau (Gob *et al.*, 2014b). En effet, ces différentes descriptions donnent des informations ponctuelles qui informent sur certains aspects des cours d'eau, mais aucune ne travaille sur un indice globalisant.

En France, les modèles d'étude de l'hydromorphologie sont principalement faits sur base SIG, *via* des ensembles de données précises à l'échelle nationale sur différents domaines ayant une action potentielle sur l'altération des cours d'eau. Il existe le Référentiel des Obstacles à l'Ecoulement (ROE), qui inventorie tous les obstacles empêchant la continuité écologique et/ou sédimentaire des cours d'eau (Léonard *et al.*, 2013). Il existe aussi le Réseau Hydrographique Théorique (RTH), qui décrit physiquement, d'après des

données trouvées sur la plateforme *Estimkart*, le réseau hydrographique à l'échelle du tronçon (Lamouroux *et al.*, 2010). Il y a aussi le modèle Syrah, qui classe les pressions anthropiques pouvant potentiellement altérer le cours d'eau et son cadre physique (Chandesris *et al.*, 2008).

L'outil Carhyce (Caractérisation Hydromorphologique des Cours d'Eau) tente quant à lui de mêler analyse géomatique et étude de terrain, grâce à une importante base de données alimentée par des relevés étaillés sur plusieurs années, qui permettent d'avoir une vision évolutive de l'état d'altération des cours d'eau. Il travaille à l'échelle du tronçon hydrographique, mais s'étale sur toute la France. Les mesures d'indice morphologique global sont calculées à partir de plusieurs types de données et par rapport à des tronçons de référence. Les tronçons de référence sont ceux qui sont le moins altérés, c'est-à-dire le moins anthropisés et qui ont encore, en majeure partie, un fonctionnement autonome.

Ce mémoire a comme thème principal l'hydromorphologie. Le but de cette étude est d'évaluer l'efficacité de l'outil Carhyce, un outil d'aide à la décision, et de son indice morphologique global qui quantifie le niveau d'altération d'un cours d'eau. Pour ce faire, nous allons le comparer à un autre outil déjà existant et reconnu par la communauté scientifique, le *Morphological Quality Index* (Rinaldi *et al.*, 2014).

Il s'agira donc de présenter dans un premier temps l'outil Carhyce, sa mise en place et son fonctionnement, et de le comparer ensuite avec un autre outil, le MQI (Rinaldi *et al.*, 2014). Pour ce faire, il faudra procéder à une étude d'un certain nombre de points déjà sélectionnés dans Carhyce, de référence mais aussi altérés, en utilisant les protocoles de calculs du MQI. Nous nous attacherons enfin à comparer et discuter les différents résultats obtenus afin de comprendre l'importance du modèle Carhyce dans les études hydromorphologiques françaises et dans le cadre de la DCE, mais aussi pour essayer de donner un sens à l'Indice Morphologique Global de Carhyce, en essayant de déterminer concrètement ce que représente sur le terrain, en terme d'altération, cet indice statistique.

Etat de la question

La notion de « situation de référence » (DCE, 2000)

La Directive Cadre sur l'Eau définit le bon état écologique des cours d'eau comme un écart moindre à une situation de référence, mais sans préciser ce que représente une situation de référence. Afin de travailler sur différents modèles de calculs d'altération des cours d'eau, il est donc impératif de définir en premier lieu ce qui est caractérisé comme état de référence.

La notion a évolué entre les années 1970 et les années 1990 (Dufour et Piégay, 2009). On commence à parler de situation de référence d'un point de vue écologique puis cela devient une notion centrée sur les bénéfices humains. Les premières questions tournent autour des objectifs de la restauration. Quels bénéfices retire-t-on de celle-ci ? Pourquoi et pour qui le faisons-nous ?

Pendant longtemps, la situation de référence a signifié la recherche d'un état de « pré-perturbation » (Cairns, 1991). Il s'agissait de rechercher le fonctionnement écosystémique des cours d'eau avant les interventions lourdes de l'homme. Deux choix théoriques s'offraient alors : chercher à revenir à la période précédant la révolution industrielle qui a profondément et durablement bouleversé la nature et les cours d'eau, ou revenir à la période antérieure à l'arrivée de l'homme qui a mondialement transformé le paysage (Gore, 1985). Cependant, dans les années 1990, commence la prise de conscience de l'impossibilité pratique de la restauration « pré-perturbation » (Cairns, 1991), du fait que l'arrivée de l'homme dans le milieu est trop ancienne pour qu'on puisse connaître le dit milieu avec précision avant les premiers signes anthropiques (Aronson *et al.*, 2006) et n'est souvent plus en adéquation avec les conditions climatiques contemporaines (Gob *et al.*, 2014).

Dès lors, la notion de référence glisse progressivement d'une définition écologique dont l'objectif premier est de permettre aux écosystèmes fluviaux d'assurer à la nature un avenir stable, à une définition économique et sociale qui assure le maintien d'un fonctionnement équilibré des cours d'eau pour le développement durable des sociétés humaines (MacDonald *et al.*, 2004; Gob *et al.*, 2014b; Dufour & Piégay, 2009).

On peut voir apparaître en filigrane une nouvelle vision du cours d'eau. Si la notion de référence passe d'une forme immuable pré-anthropique qu'il faut retrouver à tout prix à un fonctionnement qui, certes, s'inscrit dans la notion de durabilité, mais qui cherche l'amélioration de l'état écologique des rivières au sein de sociétés évolutives, c'est que les écosystèmes fluviaux sont désormais considérés comme dynamiques. En effet, on reconnaît que le cours d'eau n'est pas un tracé fixe mais que sa forme varie avec le temps. Dès lors, la notion de situation de référence doit elle aussi être dynamique.

Ainsi, combiner l'intégrité écologique et le bien-être humain (Dufour et Piégay, 2009) renforce la définition que la DCE a donnée. Favoriser cette dite intégrité permettrait de maintenir la diversité et la qualité des écosystèmes ainsi que d'augmenter leurs capacités de changement dans le but de subvenir aux besoins des générations futures (DCE, 2000). L'objectif n'est donc plus seulement la restauration des cours d'eau, et il devient avant tout un moyen de réussite.

La cohérence régionale des situations de référence

Pour pouvoir parler d'atteinte au bon état écologique des cours d'eau, il faut avant tout pouvoir se baser sur des données qui permettent de décrire le fonctionnement dynamique d'une rivière : comment se forme-t-elle ? Quels sont les éléments les plus importants qui la façonnent, à partir de quelle variable peut-on dire que le cours d'eau est altéré, qu'il n'est pas assez alimenté en tel élément, ou au contraire trop influencé par celui-ci ?

Les auteurs Luna B. Leopold et Thomas Maddock Jr. sont les pères fondateurs de ce que l'on appelle aujourd'hui la géométrie hydraulique (Leopold & Maddock Jr., 1953). Ils se sont attachés à décrire les différents éléments hydromorphologiques qui font un cours d'eau, ainsi que le rôle de chacun dans l'évolution du chenal de celui-ci. Ils ont principalement observé la vitesse des cours d'eau mais aussi leur charge sédimentaire afin d'en déduire la largeur, la profondeur, l'incision, ainsi que la pente d'un chenal. C'est, selon eux, la vitesse qui permet de définir la géométrie d'un cours d'eau. Ils expliquent que pour une largeur et un débit donnés d'un cours d'eau, la charge sédimentaire dépend de la vitesse. Dès lors, tout changement de vitesse transforme aussi la profondeur d'un cours d'eau, et par conséquent, la forme du lit, parce que la vitesse modifie aussi le pouvoir érosif de l'eau. Pour eux, le cours d'eau tente de former l'équilibre entre l'érosion et le dépôt de sédiments que l'on retrouve dans les chenaux larges, profonds et pentus. D'autres auteurs décrivent cela comme une « dynamique équilibrée » ou un « *equilibrium* » du cours d'eau (Watson *et al.*, 1999).

Aujourd'hui, on se sert plutôt d'équations régionalisées (Johnson & Fecko, 2008). La différence réside dans la possibilité de représenter la géométrie d'un cours d'eau pour plusieurs rivières au sein d'une même région hydromorphologique, alors que la méthode de Léopold et Maddock Jr. (1953) se concentre sur une rivière à la fois. Autrement dit, les équations régionalisées se basent sur des ensembles morphologiques qui se distinguent par un climat, une géologie ainsi qu'une topologie communes, qui sont les principaux facteurs de la forme d'un chenal, si l'on exclut les éléments de géométrie hydraulique (Keaton *et al.*, 2005). Cela permet, à l'inverse de la première méthode, de comparer plusieurs cours d'eau, et ainsi de mettre en relief des chenaux qui se distinguaient du reste de l'ensemble géomorphologique, ou au contraire de mettre en lumière certaines particularités régionales qui peuvent impacter les hydro systèmes. Les équations régionalisées se basent sur la formule suivante : $w = a(A_d)^b$ où w représente la largeur du chenal, A_d la zone de drainage et où a et b sont des constantes qui varient en fonction des régions étudiées. Johnson & Fecko (2008) expliquent que si, statistiquement, la zone de drainage est un élément de l'équation moins fiable que la charge sédimentaire et la vitesse d'un cours d'eau – étant donné que la charge sédimentaire façonne le chenal alors que la zone de drainage est subordonnée à celle-ci – la zone de drainage reste beaucoup plus simple à définir et à

délimiter, surtout lorsque la cause des changement du lit, notamment la profondeur, n'est pas évidente.

Les premières équations régionales ont été développées aux Etats-Unis, dans les années 2000, et ont été résumées sous la forme d'un tableau dans l'article de Johnson et Fecko (2008) (Tableau 1) :

Source	State(s)	Physiographic province	Sample size	Coefficient, a	Exponent, b
Chaplin (2005)	PA	Appalachian Plateau	22	2.90	0.45
McCandless (2003b)	MD/PA	Appalachian Plateau	9	2.90	0.44
Miller and Davis (2003)	NY	Appalachian Plateau	18	2.27	0.51
Westergard <i>et al.</i> (2004)	NY	Appalachian Plateau	16	2.52	0.47
Harman <i>et al.</i> (2000)	NC	Blue Ridge	14	4.28	0.37
Doll <i>et al.</i> (2003)	NC	Coastal Plain	16	2.39	0.36
McCandless (2003a)	MD/DE	Coastal Plain	14	2.19	0.38
Equation (A) Metcalf (2004)	FL/GA	Coastal Plain	14	2.34	0.26
Equation (B) Metcalf (2004)	FL/AL	Coastal Plain	14	2.30	0.38
Sweet and Geratz (2003)	NC	Coastal Plain	24	2.04	0.38
Jaquith and Kline (2001)	VT	New England	14	1.93	0.50
Cinotto (2003)	PA/MD	Piedmont	14	2.65	0.47
Doll <i>et al.</i> (2002)	NC	Piedmont (urban)	17	5.36	0.33
Harman <i>et al.</i> (1999)	NC	Piedmont	13	2.91	0.38
McCandless and Everett (2002)	MD	Piedmont	23	3.10	0.39
Chaplin (2005)	PA/MD	Valley and Ridge	29	2.24	0.47
Keaton <i>et al.</i> (2005)	MD/VA/WV	Valley and Ridge	41	2.50	0.44
McCandless (2003b)	MD/PA	Valley and Ridge	5	2.89	0.40

Tableau 1: Tableau résumant les coefficients *a* et *b*, issus de différentes sources, des premières études faites sur les équations régionales de différentes régions des Etats-Unis (d'après Johnson & Fecko, 2008)

Les valeurs de *a* et *b* varient, dans le Tableau 1, de 1.93 à 5.36 et de 0.26 à 0.51, ce qui montre une disparité importante entre les régions, qui s'explique notamment par des contextes géomorphologiques très hétérogènes.

On a ensuite défini pour la France des valeurs *a* et *b* à l'échelle nationale, respectivement égales à 2.05 et 0.39, puis, en se basant sur les hydro-éco-régions (Wasson *et al.*, 2002), qui constituent des régions hydromorphologiques délimitées, les valeurs ont été précisées régionalement, en se basant sur des stations d'étude piscicole et hydraulique, selon le Tableau 2 (Gob *et al.*, 2014b) :

HER	Nb de stations	Relation Surface Bassin/Largeur Plein Bord		
		A	B	R ²
Pyrénées	17	1.75	0.513	0.85
Alpes internes	11	3.56	0.319	0.5
Massif Central Sud	61	1.86	0.414	0.83
Vosges	12	1.4	0.504	0.85
Jura-Préalpes du Nord	28	2.99	0.364	0.45
Méditerranéen	19	5.96	0.177	0.27
Préalpes du Sud	18	0.51	0.736	0.67
Cévennes	24	4.48	0.355	0.68
Tables Calcaires	37	1.46	0.38	0.7
Causses Aquitains	2	<i>Pas de modèle possible (trop peu de stations)</i>		
Armorican	57	1.43	0.411	0.88
Landes	8	1.06	0.482	0.9
Coteaux Aquitains	7	2.29	0.404	0.78
Plaine de la Saône	1	<i>Pas de modèle possible (trop peu de stations)</i>		
Corse	12	9.338	0.135	0.17
Dépressions Sédimentaires	1	<i>Pas de modèle possible (trop peu de stations)</i>		
Alsace	0	<i>Pas de modèle possible (trop peu de stations)</i>		
Grands Causses	4	0.4	0.687	0.83
Dépôts Argilo-Sableux	2	<i>Pas de modèle possible (trop peu de stations)</i>		
Massif Central Nord	51	1.36	0.448	0.91
Ardennes	3	<i>Pas de modèle possible (trop peu de stations)</i>		

Tableau 2 : Synthèse des coefficients des équations de géométrie hydrauliques régionalisées pour la France (d'après Gob et al., 2014)

CARactérisation Hydromorphologique des Cours d'Eau (Carhyce)

L'outil de CARactérisation Hydromorphologique des Cours d'Eau (Carhyce), est un protocole d'acquisition de données hydromorphologiques, auquel s'ajoutent une base de données et différentes méthodes d'analyse qui permettent la définition hydromorphologique d'un tronçon de cours d'eau, en France (Gob *et al.*, 2014). Il a été créé par différents laboratoires dans le cadre de la DCE et sous l'égide du ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer, en charge des Relations Internationales sur le Climat et de l'Agence Française pour la Biodiversité. Ces analyses sont stockées dans une base de données libre d'accès qui permet d'avoir par tronçon un Indice Morphologique Global (IMG), donnant une idée du degré d'altération de l'espace étudié.

Principe & Théorie

Le protocole Carhyce se base sur un ensemble d'observations et d'indicateurs hydromorphologiques *via* les SIG, la télédétection, mais aussi sur des données de terrain. Cela peut être croisé avec des données chimiques et écologiques pour définir le bon état écologique des cours d'eau en général. Carhyce est conçu pour étudier principalement des variables de réponses de l'hydrosystème. Le modèle se base sur des stations dites de référence, construites par rapport à des modèles régionaux. Les stations découlent d'études statistiques conduites à partir de ses modèles (Tamisier *et al.*, 2014).

La mise en place du protocole Carhyce commence avec des enquêtes de terrain, menées par des agents de l'Agence Française pour la Biodiversité, sur les stations du Réseau Contrôle et Surveillance (RCS) qui sont évaluables à pied. Les premières enquêtes ont débuté en 2009. Aujourd'hui, toutes les stations de la banque de données ont été visitées au moins une seconde fois.

Définition des stations Carhyce de référence

En 2017, on compte 1 862 stations Carhyce dont 431 stations de référence (Figure 1) (Tamisier *et al.*, 2014).

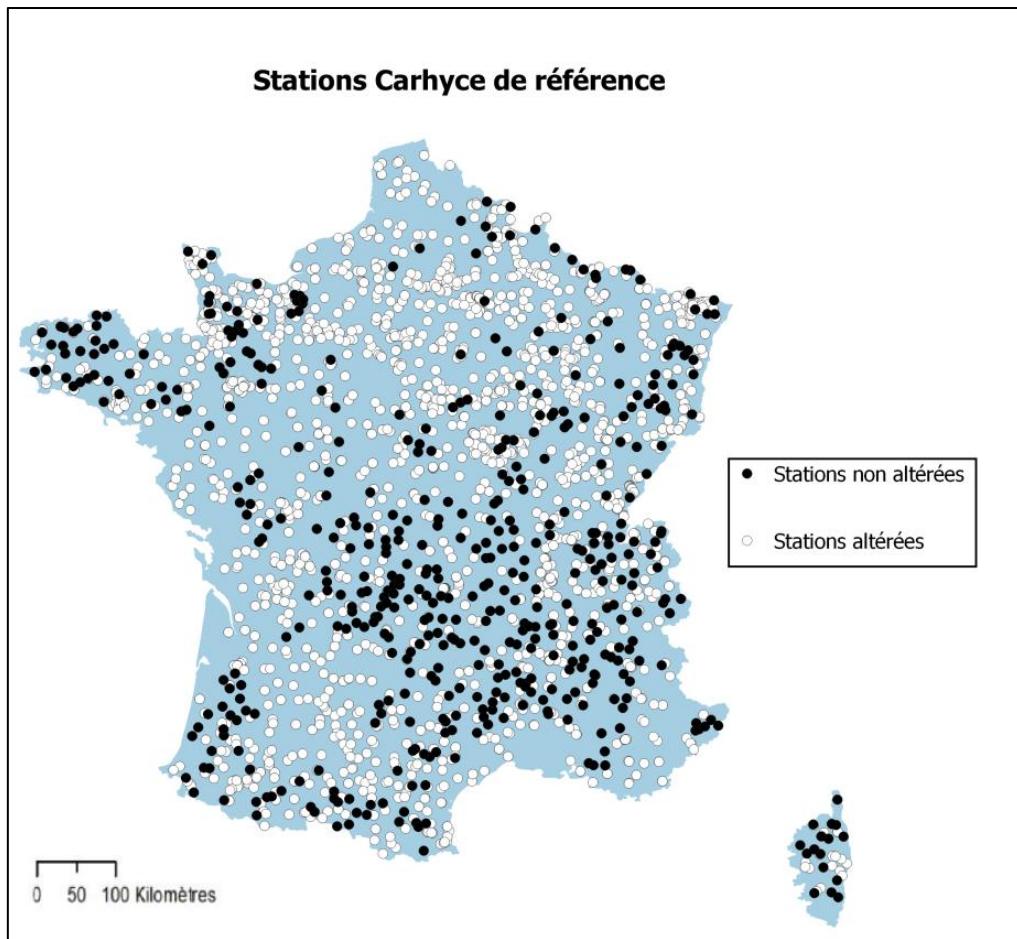


Figure 1 : répartition des stations Carhyce de référence en France métropolitaine

Les stations de référence ont été choisies à partir des données de l'Indice Poisson Rivière + (IPR+) qui est une amélioration de l'IPR (Marzin *et al.*, 2012, 2013). Ces données servent initialement à l'étude de la faune piscicole et des pressions anthropiques qu'elle subit. Elles sont cependant calculées à la même échelle que Carhyce, et elles fonctionnent sur le même principe (enquête de terrain puis traitement des données). Si les critères de l'IPR+ suivants sont respectés, alors la station est intégrée en tant que station de référence dans la banque de données Carhyce (Tamisier *et al.*, 2014) :

- Recalibrage = nul
- Rectification = nul
- Modification du débit = nul/faible/moyen
- Altération du transport solide = nul/faible/moyen

L'auteur parle de 1 116 stations IPR+ dont 494 stations définies comme référence, tel que la Figure 2 le montre :

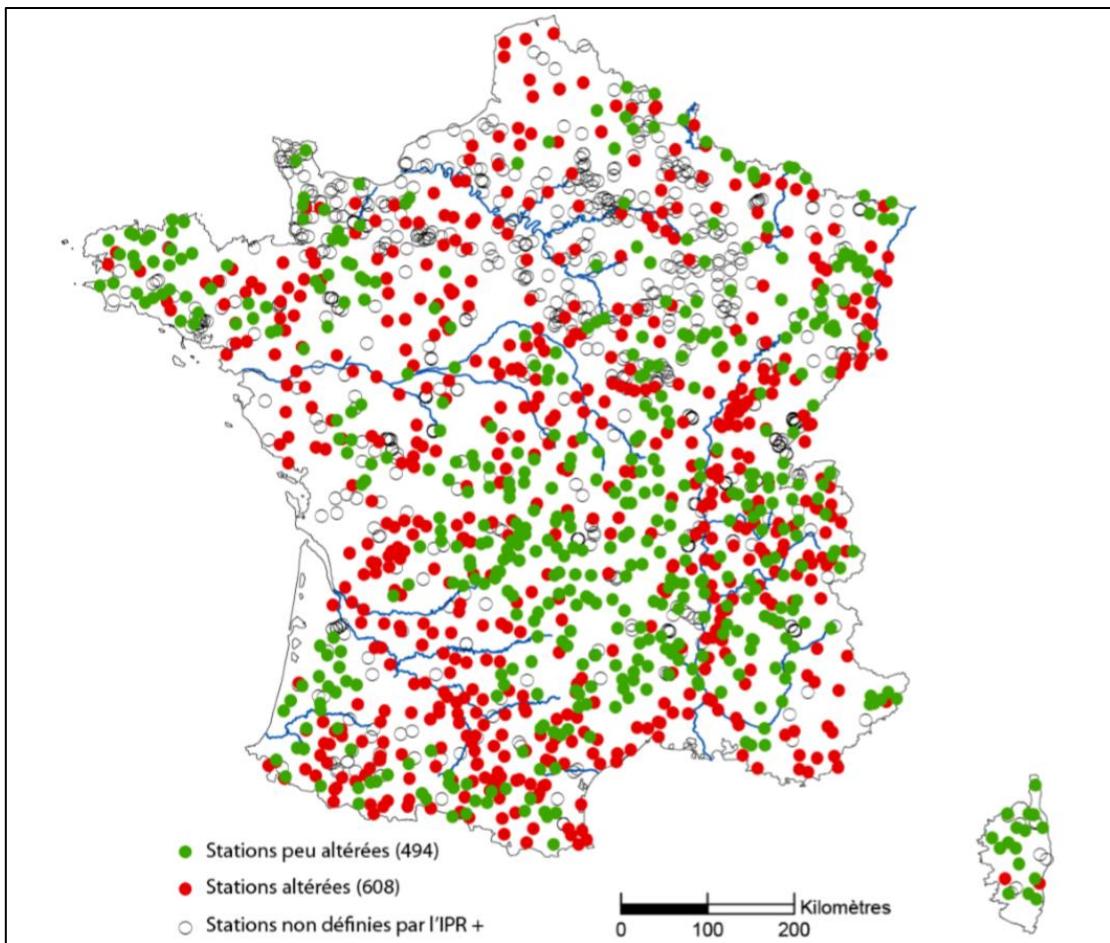


Figure 2 : carte des stations IPR+ considérées comme peu altérées, altérées ou non définies, d'après Tamisier *et al.*, 2014

Traitements des données Carhyce

Les données brutes de terrain connaissent un certain nombre de traitements afin de reconstituer la morphologie du lit et les paramètres hydromorphologiques à plein bord (largeur, profondeur, rapport largeur/profondeur, granulométrie, substrat, etc.). Ce dernier est déterminé selon le sommet de la berge, c'est-à-dire le point où commence le replat qui indique la fin de la berge et le début de la plaine alluviale (Navratil *et al.*, 2006 *in* Gob *et al.*, 2014). Ensuite, l'on introduit des données complémentaires, principalement de type géographique, afin de prendre en compte les caractéristiques physiques du bassin versant. On arrive alors à une classification qui permet de construire des modèles de référence régionaux par rapport à leur hydromorphologie propre.

La notion de « situation de référence » est abordée ici sous un angle régional, c'est-à-dire que les modèles de référence sont construits à l'échelle des hydro éco région (Wasson *et al.*, 2004) avant de standardiser les résultats à l'échelle nationale. En effet, ils ont été calculés à partir d'une relation d'équilibre entre la surface du bassin versant de la station et la géométrie du lit à l'échelle de la station, sous la forme de l'équation suivante :

$$y = \alpha \times A^b$$

y représente un des paramètres hydromorphologiques du tronçon, au choix, A représente la surface du bassin versant et α et b sont des constantes propres à chaque hydro éco

région, qui peuvent être lues sous une représentation log-log comme une régression linéaire. Chaque station de l'HER est donc comparée à un modèle graphique qui met en lien la dimension du bassin versant et les dimensions du lit à l'échelle de la station, afin de les comparer aux stations de référence. Ainsi, c'est l'écart par rapport à la droite de régression d'une station dans un HER qui indique sa possible altération hydromorphologique. La Figure 3Figure 3 est un exemple du type de graphique utilisé pour mettre en avant les caractéristiques particulières de ces HER, ici en comparant la largeur à plein bord. Les points gris sur le graphique représentent les stations de référence qui sont affiliées à chaque droite de régression, c'est-à-dire à chaque HER représentée sur cette figure. Il a été démontré, grâce à ces graphiques, que certains HER avaient des particularités hydromorphologiques propres, qui n'avaient pas de lien avec les altérations anthropiques (Gob *et al.*, 2014a). Par exemple, les auteurs ont montré que la largeur du lit des cours d'eau du massif armoricain est en moyenne plus petite que, par exemple, celles du lit des cours d'eau dans les massifs montagneux. En effet, les régions de hautes et de moyennes montagnes (Alpes internes, Pyrénées, Jura-Préalpes du Nord, Préalpes du Sud, Cévennes) connaissent des précipitations plus fortes et plus importantes, mais ont aussi des pentes plus accentuées et une granulométrie plus grossière (Tamisier *et al.*, 2014). Les lits de leur cours d'eau sont donc plus larges qu'en Bretagne où les crues fréquentes sont relativement plus atténuées.

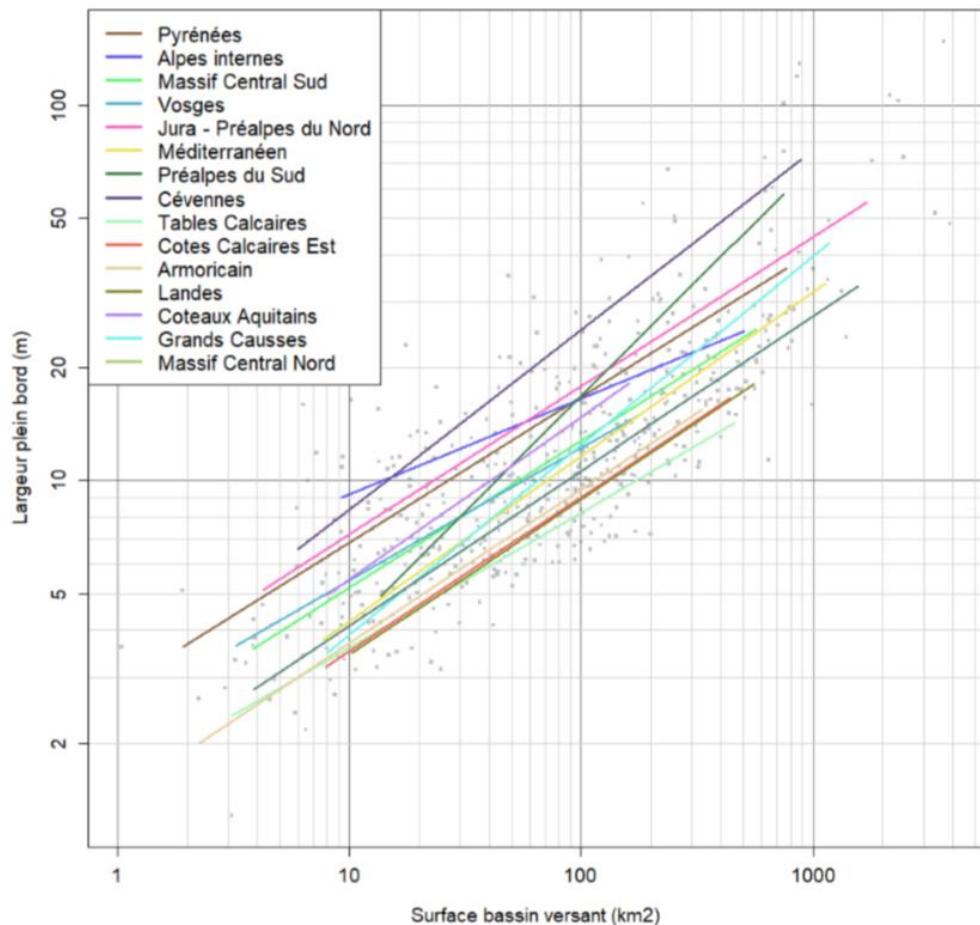


Figure 3 : exemple de modèle à plein bord par HER pour la largeur à plein bord en fonction de la surface du bassin versant (d'après Gob *et al.*, 2014)

Une fois que les modèles régionaux ont été mis en place, on peut comparer les stations possiblement altérées avec les stations de référence de leur HER. Les résidus, c'est-à-dire les écarts aux modèles, sont calculés afin de définir leur potentielle altération. Ceux-ci sont ensuite standardisés afin d'être comparés aux résidus des autres modèles et lisibles à l'échelle nationale. Ce sont ces résidus standardisés qui permettent de calculer l'Indicateur de Morphologie Globale (IMG). Toutes ces données sont ensuite mises en libre accès sur un site internet et illustrées par des graphiques, notamment la répartition du score de l'IMG entre les différents indicateurs hydromorphologiques. Chaque indicateur évalué (granulométrie, ripisylve, pente, forme du lit, etc.) est lui aussi illustré par des graphiques, et ce pour chaque station de la banque de données. Tout est consultable sur : IED Carhyce ; <http://lgp.cnrs.fr/carhyce> . La Figure 4 ci-dessous résume les différentes étapes d'exploitation des données Carhyce.

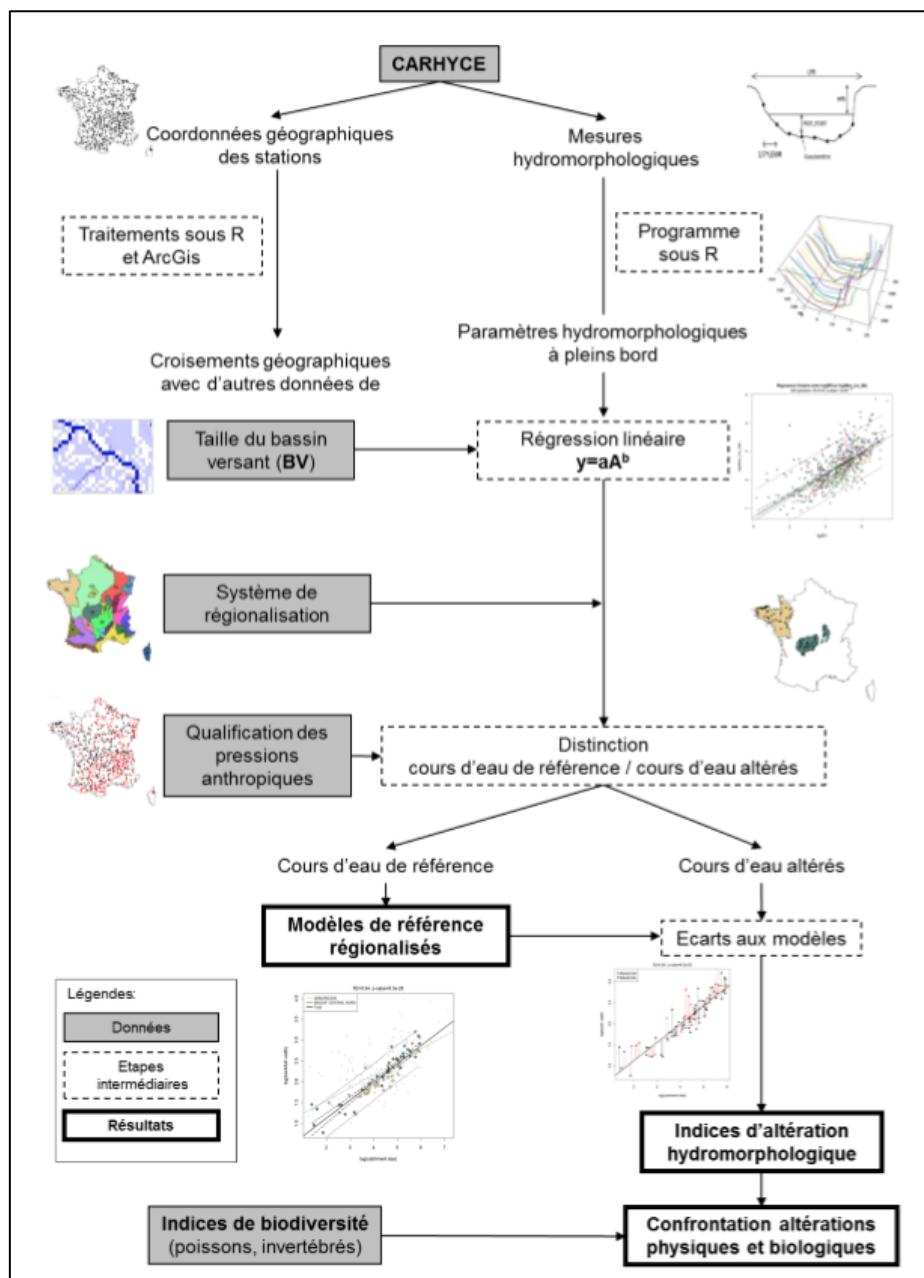
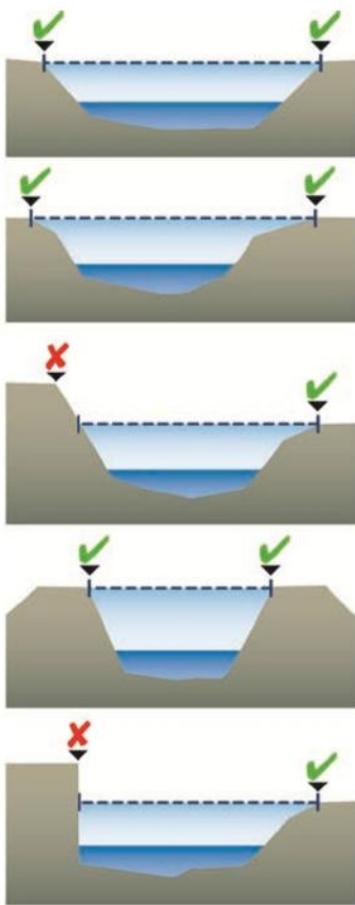


Figure 4 : schéma récapitulatif des différentes étapes de traitement des données Carhyce

Sur le terrain



Repérage du niveau de pleins bords :

- ✓ rupture de pente à utiliser
- ✗ rupture de pente à ne pas utiliser
- Largeur de pleins bords

Afin d'avoir des résultats représentatifs du débit moyen du cours d'eau, il est nécessaire que les enquêtes de terrain soient menées lorsque le débit est compris entre le débit moyen mensuel minimum interannuel (Q_{mna}) et le module. Il ne faut pas faire de mesure pendant les périodes d'étiage. Cela permet de mieux pouvoir distinguer les faciès d'écoulement et d'avoir une modélisation plus juste du cours d'eau (Kreutzenberger *et al.*, 2017). De même, les auteurs recommandent d'effectuer les mesures durant la phase végétative, afin de décrire plus justement la ripisylve.

La station Carhyce a une longueur de quatorze fois la largeur à plein bord du premier transect, car les auteurs estiment que cela est représentatif de la dynamique et de la morphologie fluviale. Selon eux, cette distance équivaut à deux séquence de radier – mouille – plat pour un cours d'eau non altéré.

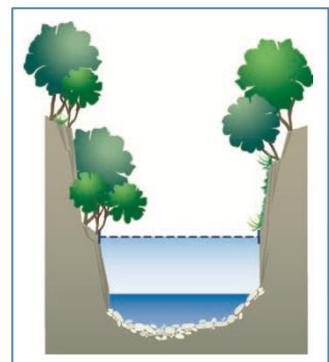


Figure 5 : délimitation de la largeur à plein bord pour les rivières en gorge (d'après Kreutzenberger *et al.*, 2017)

La largeur plein bord correspond à la longueur d'une ligne que l'on peut tracer horizontalement et qui relie d'un bout à l'autre les deux bords de berge (Figure 6). S'il s'agit de cours d'eau en gorge, les auteurs préconisent de se baser sur la limite d'implantation de la végétation (Figure 5). De même, les îles végétalisées sont utilisées comme des repères de plein bord, alors

que les bancs alluviaux ne sont pas considérés, parce que trop fluctuants d'une année à l'autre (Figure 7) (Kreutzenberger *et al.*, 2017).

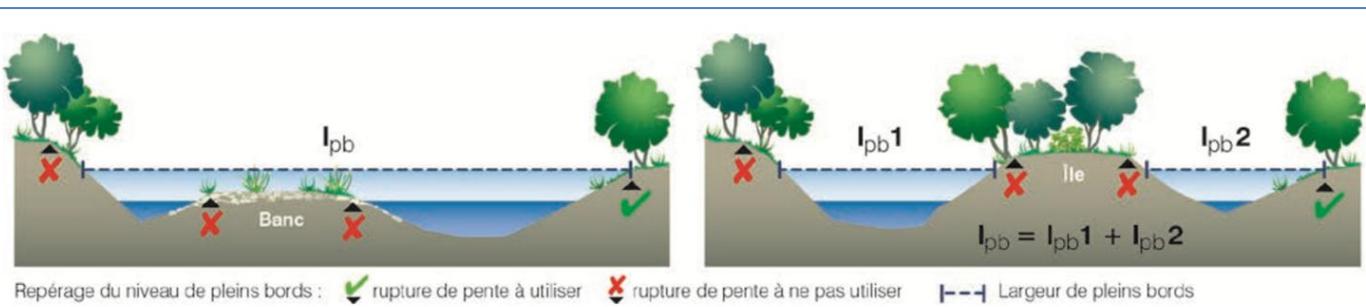


Figure 7 : délimitation de la largeur à plein bord pour les rivières avec des îles et des bancs (d'après Kreutzenberger *et al.*, 2017)

Dans un second temps, il faut prendre les mesures des largeurs mouillées, c'est-à-dire la largeur de la lame d'eau, qui est obtenue en divisant un volume écoulé dans une station par la surface de son bassin versant. Cela permet d'évaluer préalablement la distance entre les différents points de chaque transect. Les transects sont au nombre de 15 et chacun d'entre eux est composé de points de mesure espacés régulièrement, d'une berge à l'autre. Ces transects vont permettre de mesurer la géométrie et la composition du lit du cours d'eau, tel que suit (Tableau 3)(Kreutzenberger *et al.*, 2017) :

Mesures	Usage dans l'étude du bon état écologique d'un cours d'eau
La géométrie du lit	
La profondeur et la largeur à plein bord	Permettra d'établir un rapport entre la largeur et la profondeur à plein bord. Sert aussi dans la géométrie hydraulique et dans l'étude de l'écologie aquatique.
Le rapport entre la largeur et la profondeur à plein bord	D'après les auteurs, ce paramètre est un bon indicateur de la géodynamie d'un hydrosystème. Il donne aussi des informations sur la cohésion des berges, c'est-à-dire si les berges sont facilement érodables par le cours d'eau et donneront à celui-ci un faciès large et peu profond ou si à l'inverse elles sont peu érodables et feront du cours d'eau un espace étroit et profond.
Le débit à plein bord	Celui-ci a, en moyenne, dans un cours d'eau peu ou pas altéré, une période de retour avoisinant une crue journalière de fréquence 1 à 2 ans. Si ce rapport est différent, cela peut mettre en avant une potentielle altération hydromorphologique du cours d'eau.
La puissance spécifique à plein bord	C'est elle qui détermine la dynamique d'un cours d'eau, c'est-à-dire sa capacité à éroder les berges et à transporter des sédiments. Cela permet aussi de calculer la fréquence de transport et donc la stabilité du substrat dans le temps. Ces deux éléments sont aussi des indicateurs importants d'une potentielle altération hydromorphologique.
Le substrat minéral	
La granulométrie	Elle permet de calculer la rugosité du lit, mais est aussi un élément qui peut rendre compte de la fréquence de transport et si celui-ci est suffisant. Elle est également très importante dans le fonctionnement des habitats rivulaires.
Le substrat additionnel	Permet de rendre de compte de la présence d'espèces végétales, aquatiques, piscicoles et animales, qui sont autant d'indicateurs biologiques et chimiques qui peuvent préciser les mesures hydromorphologiques.
La zone riparienne	
Les berges	La nature des berges influe sur leur érosion et la mobilité du lit
Le corridor rivulaire et la ripisylve	Préserve la qualité et la biodiversité aquatique. Il fait le lien entre le milieu aquatique et le milieu terrestre. Il participe aussi à la dynamique fluviale, notamment en maintenant les berges, il est très important pour l'écologie de la rivière
Le faciès	
Le faciès	Un type de faciès est aussi synonyme d'un certain type de biodiversité. Si le faciès ne correspond pas à la biodiversité présente, alors cela peut être signe d'une altération hydromorphologique.

Tableau 3 : Tableau récapitulatif des éléments de géométrie du lit et de composition du lit pris en compte dans les relevés Carhyce

Traitement post enquête

Les premiers traitements des données de terrain et géographiques sont faits sous R (R Core Team, 2012). Cela permet de créer des graphiques en trois dimensions, afin de restituer la morphologie des cours d'eau prospectés. C'est à partir de ces premiers traitements que l'on peut reconstituer tous les autres paramètres hydromorphologiques (Tamisier *et al.*, 2014). Carhyce est donc composé de trois types de données : des données brutes de terrain, celles calculées sur la base de ces données de terrain et celles sur le contexte géographique de ces stations. L'ensemble de ces données est lui-même divisé en trois échelles d'observation : l'opération, le transect et le point. Pour chaque échelle, plusieurs données spécifiques sont recalculées, le but étant de pouvoir aisément passer d'une échelle à l'autre et de lisser les différences entre les stations, notamment sur le nombre de transects, ou le nombre de points par transect (Tamisier *et al.*, 2014). Le Tableau 4 est un tableau récapitulatif des éléments récupérés à l'échelle du point, le Tableau 5 à l'échelle du transect et le Tableau 6 à l'échelle de l'opération

Paramètre	Définition
X	Coordonnée transversale par rapport à la rive gauche
Y	Coordonnées longitudinale : dépend de la position du transect par rapport au transect aval
Profondeur	Profondeur par rapport au premier point du transect, car les valeurs sont relatives au premier point et non absolue(s)
Cote	Cote = 100 – Profondeur (une cote inférieure à 100 indique qu'un point est situé au dessus du niveau de l'eau)
Cote_pente	Cote du point en tenant compte de la pente de la ligne d'eau

Tableau 4 : Tableau récapitulatif des paramètres géométriques calculé par point (d'après Tamisier *et al.*, 2014)

Paramètre	Définition
Fond_du_lit	Cote minimale observée sur un transect
Y	Coordonnées longitudinale du transect : elle dépend de sa position par rapport au transect aval
Cote_max	Cote maximale d'un transect
Cote_de_l_eau	Cote de l'eau au moment de l'acquisition de la donnée
Prof_max_Q1	Profondeur maximale du débit au moment de l'acquisition de la donnée (Q1)
Cote_PB	Profondeur maximale à plein bord
Pb_moyen	Cote moyenne à plein bord

Tableau 5 : Tableau récapitulatif des paramètres géométriques calculés par transect (d'après Tamisier *et al.*, 2014)

Paramètre	Définition
Géométrie de la section mouillée	<ul style="list-style-type: none"> - Surface mouillée - Largeur mouillée - Périmètre mouillé <p>Tous sont d'abord mesurés par rapport au Q1, c'est-à-dire au débit le jour du relevé de données, puis par rapport au Qb c'est-à-dire le débit à plein bord</p>
Hauteur	Hauteur d'eau moyenne sur l'opération qui est issue de la moyenne des hauteurs d'eau moyenne par transect
Coefficient de variation de la profondeur	C'est la dispersion relative des profondeurs par rapport à l'écart type des profondeurs de chaque point
Profondeur des mouilles	C'est la moyenne des profondeurs des mouilles identifiées à partir du profil en long de l'opération
La force tractrice de l'eau	C'est la capacité de l'eau à transporter des sédiments de différentes tailles
La vitesse moyenne	C'est la vitesse moyenne de l'eau sur l'étendue de l'opération
Granulométrie	Taille des 100 éléments mesurés à un endroit de la station (selon le protocole Wolman (Wolman, 1954))
La ripisylve	Caractérisation de la ripisylve (type, épaisseur, stratification) et classification. On établi un score ripisylve à partir de : <ul style="list-style-type: none"> - Sa continuité - Sa hauteur - Son épaisseur

Tableau 6 : Tableau récapitulatif des paramètres calculés par station (d'après Tamisier *et al.*, 2014)

La granulométrie

Les traitements Carhyce partent de deux types de granulométrie :

- **Par une courbe granulométrique** à partir du relevé sur un radier dans la station suivant la méthode Wolman (1954). Celle-ci sert à caractériser la classe granulométrique la plus mobilisée par le transport sédimentaire. Dans cette courbe, on regarde particulièrement le D_{50} , c'est-à-dire la médiane, le D_{16} , qui décrit la fraction fine, ainsi que le D_{84} , qui décrit la fraction grossière de l'échantillon. Plus la courbe granulométrique est verticale, plus l'échantillonnage est homogène, comme le montre la Figure 8.

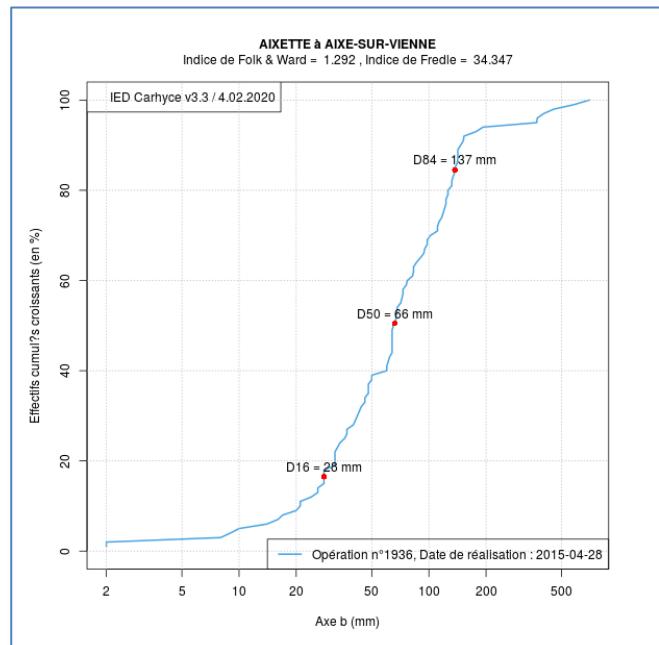


Figure 8 : courbe granulométrique de la station Aixette à Aix sur Vienne (d'après la base de données en ligne Carhyce)

- Par une répartition en classes de tailles granulométrique, suivant la classification de Wentworth (Figure 9), à partir des relevés effectués à chaque transect.

Diamètre (Φ)	Diamètre (mm)	Sédiment meuble	Roche consolidée	Classe
-3,32	10	Cailloutis et blocs		
-1	2	Graviers		
0	1	Très grossiers		
1	0,5	Grossiers		
2	0,25	Moyens		
3	0,125	Fins		
4	0,063	Très fins		
5	0,0315	Très grossiers		
6	0,016	Grossiers		
7	0,008	Moyens		
8	0,004	Fins		
9	0,002	Très fins		
		Argiles		Argilites

Figure 9 : Classification de WentWorth utilisée pour les relevés granulométriques Carhyce

La représentation finale de la granulométrie est faite sous forme de diagramme triangulaire, où chaque point correspond à une station (Figure 10). Le point bleu représente la station étudiée. Cela permet de comparer la dite station aux autres stations de l'HER à laquelle elle appartient, ici le Massif Central Nord. On peut noter que dans cette HER il y a principalement de la sédimentation fine et de graviers et que la répartition est plutôt hétérogène. La station étudiée ici est plutôt représentative de cette hétérogénéité régionale puisqu'elle a, en proportion semblable, des sédiments fins, des graviers et des blocs rocheux.

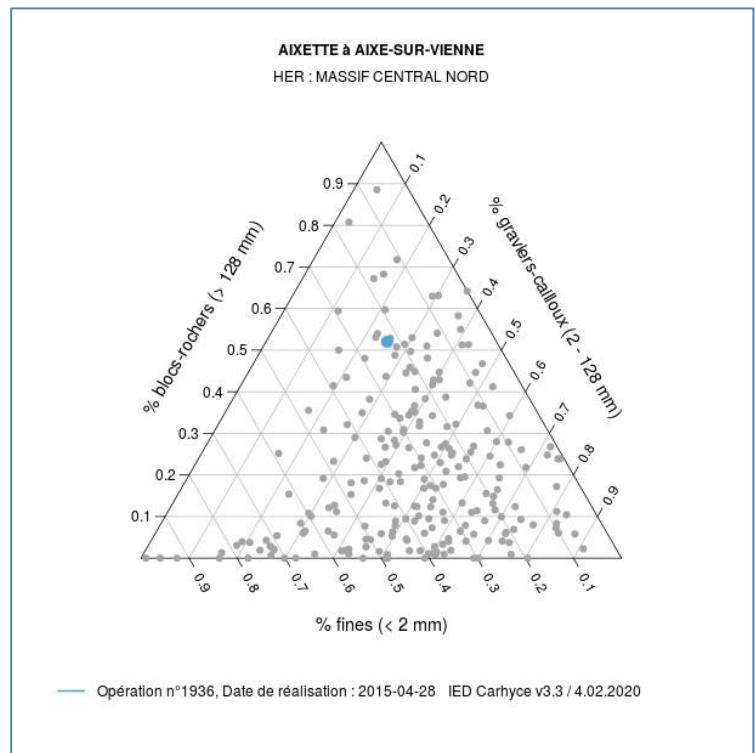


Figure 10 : diagramme triangulaire de la répartition granulométrique à Aixette à Aixe sur Vienne par rapport au reste du Massif Central Nord (d'après la base de données en ligne Carhyce)

La ripisylve

La ripisylve est essentielle au bon fonctionnement écologique d'un cours d'eau. Elle a un rôle très important dans la régulation et le contrôle des évènements fluviaux. Elle maintient l'intégrité fonctionnelle des écosystèmes et notamment des écosystèmes fluviaux (Tabachi, 2003). Elle est caractérisée sur une fois la largeur à plein bord à l'endroit de chaque transect, c'est-à-dire que l'on observe la ripisylve à chaque transect sur une longueur d'une largeur à plein bord.

Pour cette caractérisation, les auteurs se servent d'une typologie de la ripisylve qui leur est propre, telle qu'illustrée par Figure 11. Les « + » et les « - » sont des indicateurs de proportionnalité par rapport à l'ensemble des deux berges du cours d'eau.



Figure 11 : typologie de la ripisylve utilisée dans le traitement des données Carhyce (d'après Tamisier *et al.*, 2014)

A cette typologie s'ajoute un score, appelé le score ripisylve. Ce score est jumelé avec un diagramme triangulaire semblable au diagramme granulométrique. La figure est composée de trois axes, à savoir : la continuité, la hauteur et l'épaisseur. Plus le triangle est resserré sur le centre, c'est-à-dire proche de 0 pour un des trois axes, moins l'axe en question est développé. Le score est calculé selon le Tableau 7. On peut voir sur la Figure 12 que la station à Aixette à Aixe-sur-Vienne, par exemple, a une ripisylve développée et continue.

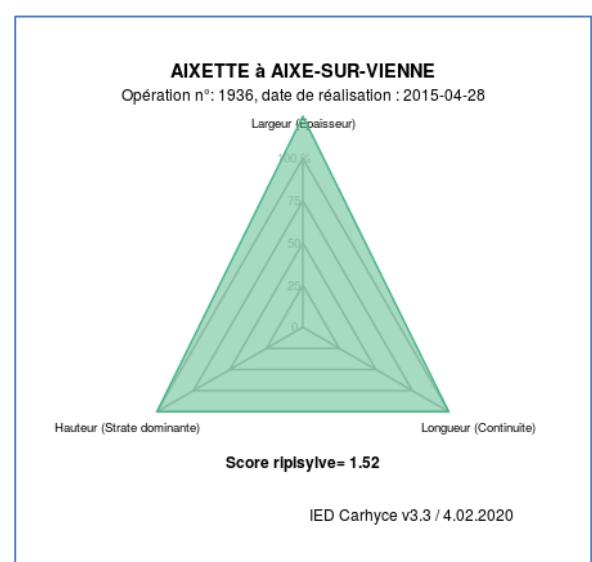


Figure 12 : diagramme triangulaire du score ripisylve d'Aixette à Aixe sur Vienne (d'après la base de données en ligne Carhyce)

Paramètre	Score	Valeurs codées
Continuité	Somme des valeurs codées sur les deux rives (entre 0 et 100)	0 = absence 10 = isolée 20 = espacée – régulière 30 = bosquets éparques 40 = semi-continue 50 = continue
Hauteur	Valeur codée de la médiane de la strate la plus couvrante sur l'ensemble des berges (entre 33 et 100)	33 = herbacée 66 = arbustive 100 = arborée
Epaisseur	Valeur codée de la médiane de l'épaisseur sur l'ensemble des berges (entre 0 et 100)	0 = absence 25 = pour 0-5m 50 = 5-10m 75 = 10-25m 100 = >25m

Tableau 7 : tableau du score de ripisylve Carhyce (d'après Tamisier *et al.*, 2014)

Les données géographiques complémentaires

Les données géographiques complémentaires, que les auteurs appellent « données contextuelles », sont des données agrégées qui permettent de lier les données enregistrées à l'échelle de la station Carhyce avec des données à l'échelle du bassin versant de cette station (Tamisier *et al.*, 2014). Les auteurs se servent essentiellement des données de Syra-CE, de l'IPR+, de *Corine Land Cover*, et des HER. Cela permet notamment d'ajouter une notion de géomatique à la base de données, et ainsi de permettre d'effectuer des calculs à l'échelle du bassin versant. La Figure 13 est un exemple, tiré de mes recherches sur la HER 21 (le Massif Central Nord), qui permet d'avoir, en plus des données Carhyce, des caractéristiques telles que la taille du bassin versant (en km²), le pourcentage de roches imperméables, le type d'occupation des sols, les précipitations moyennes, etc. Toutes ces données seront utilisées pour caractériser les différences entre les HER et ainsi caler les modèles statistiques de chaque HER.

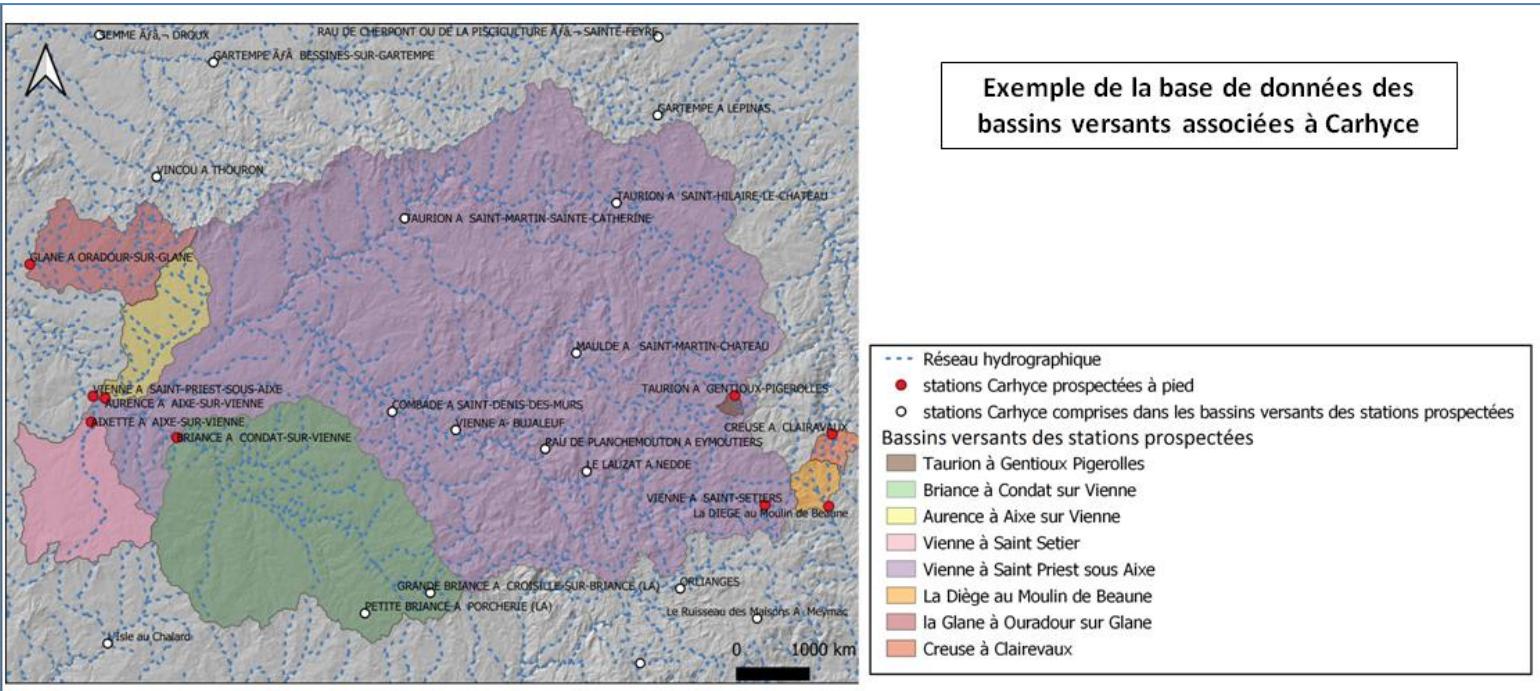


Figure 13 : Bassin versant des stations Carhyce visitées sur le terrain lors de ce mémoire

L'indice de sinuosité

La sinuosité a été décrite comme un bon moyen de mesurer l'altération anthropique d'un cours d'eau, particulièrement si elle est très réduite. En effet, un cours d'eau plan étant beaucoup plus praticable par l'homme, tout au long des époques les fleuves et les rivières ont été très largement modifiés. Dès lors, il a été intégré dans la base de données Carhyce, pour chacune des stations, un indice de sinuosité (Gilet, 2012). Ce traitement a été automatisé sous SIG. Le principe de cet indice est basé sur le rapport entre la longueur

développée du cours d'eau en suivant l'axe du lit mineur entre deux points et la longueur de l'axe général d'orientation du cours d'eau entre ces deux points (Bravard & Malavoi, 2010). La Figure 14 explicite le fonctionnement de cette méthode :

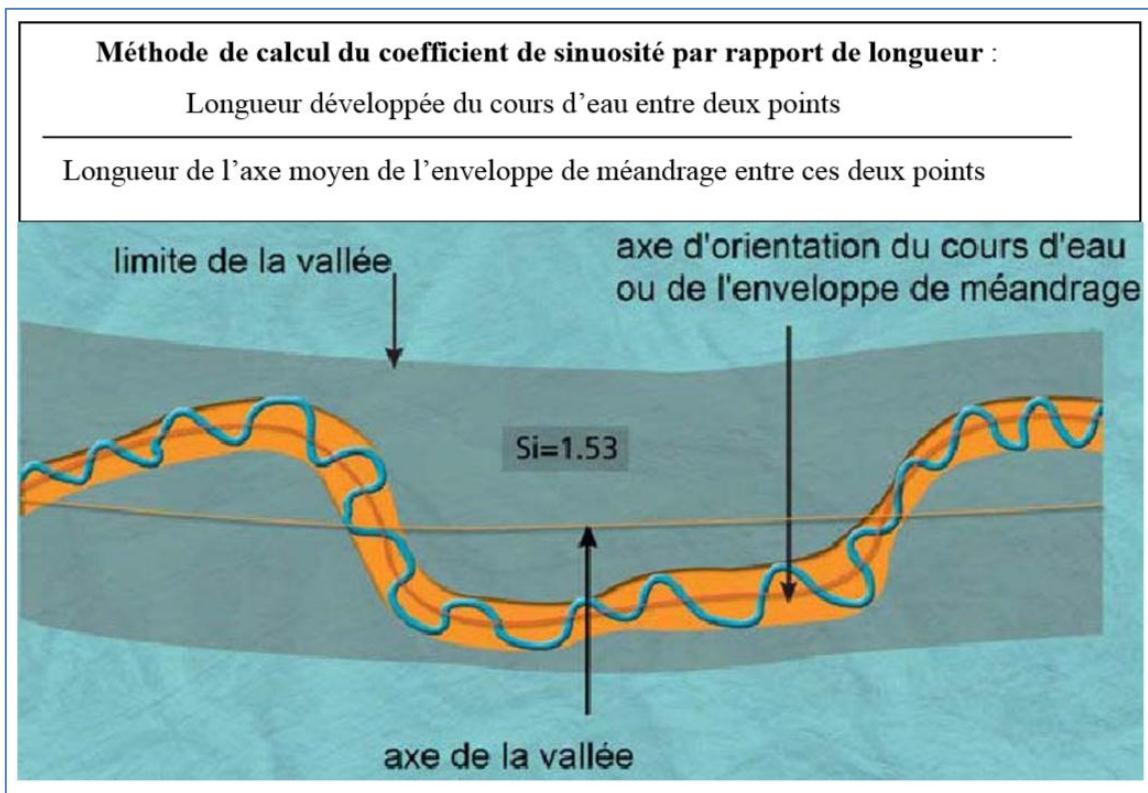


Figure 14 : méthode de calcul de l'indice de sinuosité (d'après Bravard & Malavoi, 2010)

En effet, en se basant sur l'axe du lit mineur, il y a une largeur de méandre maximale. C'est cette largeur maximale qui sera mise en rapport avec l'axe moyen de la vallée. En fonction du résultat, il apparaît qu'un cours d'eau méandre plus ou moins, autrement dit, un cours d'eau rectifié verra son indice de sinuosité moins bon qu'un cours d'eau non rectifié, car la largeur maximale de ses méandres ne sera pas proportionnelle à l'axe moyen de la vallée.

The Morphological Quality Index

Principe & théorie

The Morphological Quality Index (MQI), ou « sistema di valutazione IDromofologica, Analisi e Monitoraggio dei corsi d'acqua » (IDRAIM) dans sa langue originelle, 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.

Le MQI se concentre sur les aspects de la 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 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 à la dynamique morphologique, par exemple.

L'étude se base sur une approche « hiérarchique imbriquée » (Rinaldi *et al.*, 2011), où le tronçon (« *tratto* » dans le texte) 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 originale par rapport à Carhyce (Figure 15). 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, à son état passé et essaye d'en déduire une tendance future (Rinaldi *et al.*, 2014). Dans les faits, il est possible d'observer son passé *via* les SIG, ce qui permet de prévoir ce qu'il est possible de modifier, ou pas, sur le cours d'eau pour améliorer sa gestion écologique.

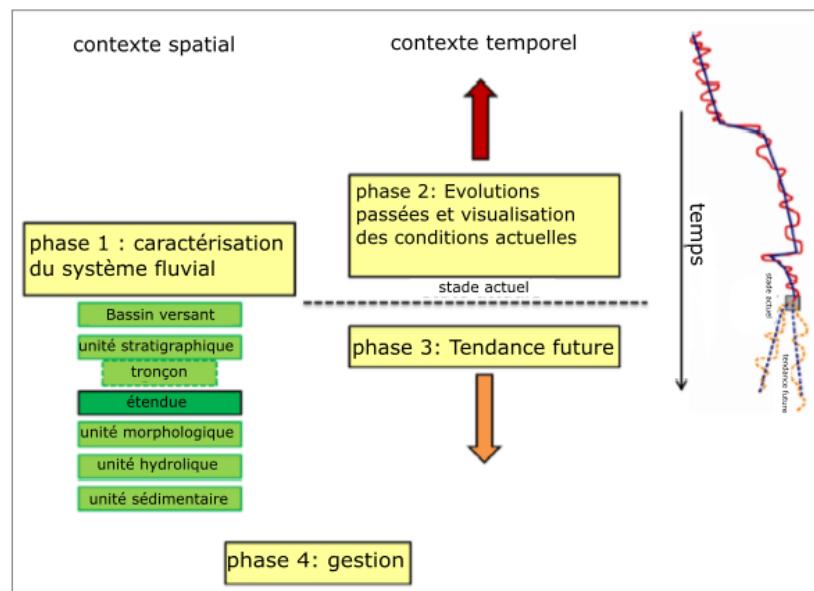


Figure 15 : Schéma des différentes phases d'analyse du MQI (traduit de Rinaldi *et al.*, 2014)

Comme on peut le voir sur la Figure 15, si le tronçon est l'échelle favorisée par le MQI, il n'en reste pas moins que les éléments étudiés sont eux aussi hiérarchisés. Le MQI étant un score qui fonctionne sur un système de points, pour chaque donnée étudiée, on note un certain score, qui varie en fonction de l'importance hydromorphologique de la donnée. Rinaldi place les données relevant de l'artificialité d'un cours d'eau avant celles qu'il appelle les « fonctionnalités géomorphologiques des formes et des processus » (Rinaldi *et al.*, 2011), qui elles-mêmes prévalent sur les ajustements du chenal. Chaque type de données relève de processus particuliers dans un cours d'eau. Cela permet de classer les différents éléments du score en trois familles d'indicateurs hydromorphologiques.

Pour simplifier, les indicateurs de fonctionnalités considèrent les formes et les processus qui permettent au cours d'eau de s'autoréguler sans action anthropique telles que la possibilité d'inondations de la plaine d'épandage par les crues, la mobilité sédimentaire ou encore la présence de ripisylve. De fait, s'il y a une forte incidence des éléments artificiels, le score global des fonctionnalités sera moins bon.

Si les indicateurs de fonctionnalité prennent en compte les effets des éléments anthropiques sur la morphologie des cours d'eau, les indicateurs d'artificialité se concentrent quant à eux sur leur présence et leur fréquence. C'est en les prenant en compte indépendamment, de deux manières, que Rinaldi transpose, dans le MQI, la hiérarchie des indicateurs hydromorphologiques qu'il évoque théoriquement (Rinaldi *et al.*, 2014).

Subsistent les ajustements de chenaux. Ceux-ci sont le résultat naturel de l'érosion des berges, de différentes crues et de l'incision plus ou moins importante du lit du cours d'eau (Bravard & Petit, 2000). Certaines modifications du chenal peuvent être d'origine humaine, mais elles ne se produiront pas systématiquement, cependant, au lieu et au moment où l'altération anthropique existe. En d'autres termes, les dérèglements causés en un point *a* et à un instant *t* peuvent apparaître dans le cours d'eau en un point *b* et à un instant *u* (Simon & Rinaldi, 2006). La difficulté est alors d'arriver à lier processus et origine.

C'est pour cela que Rinaldi propose d'observer les cours d'eau sur un pas de temps centennal (Rinaldi *et al.*, 2011). Ce laps de temps est ce qui reflète le mieux les variations morphologiques récentes, et notamment l'impact humain, car les perturbations anthropiques compactent fortement les échelles temporelles des ajustements morphologiques (Rinaldi & Simon, 1998). De manière plus générale, Rinaldi considère les indicateurs de fonctionnalité et d'ajustement de chenaux comme des indicateurs de réponses – *response indicators* – et les indicateurs d'artificialité comme des indicateurs de pression – *pressure indicators* – (Rinaldi *et al.*, 2011). Selon lui, c'est grâce à l'évaluation de l'ensemble de ces facteurs que l'on parvient à une vision réaliste de l'altération du cours d'eau, ce qui facilite ensuite sa gestion.

Quant à la situation de référence, Rinaldi reste proche de la définition précédemment adoptée. Selon lui, ce sont les trois indicateurs (fonctionnalité, artificialité et ajustement de

chenaux) qui définissent la situation de référence d'un cours d'eau. Il faut, entre autre, que la morphologie du cours d'eau réponde à celle attendue pour un cours d'eau de sa typologie morphologique, où les éléments artificiels ont une influence minime ou nulle sur la dynamique fluviale, à l'échelle du bassin versant (Rinaldi *et al.*, 2011).

Pour ce qui est de l'échelle, le MQI travaille à l'échelle d'un tronçon d'un cours d'eau, mais qui s'insère dans une unité morphologique, hydrologique et sédimentaire plus globale (Figure 15) Simplement, si l'étude effectuée se base sur quelques centaines de mètres ou quelques kilomètres, 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).

Mise en pratique

Afin de réaliser l'évaluation d'un cours d'eau *via* le MQI, il faut tout d'abord catégoriser ledit cours d'eau. Pour se faire, Rinaldi propose trois étapes : l'identification des unités paysagères, la définition du type de confinement, l'identification des types de morphologie (Rinaldi *et al.*, 2011). Il définit les différents critères comme suit (Tableau 8) :

Etapes	Critères	Résultats
1. Cadre général, identification des unités paysagères	Caractéristiques géologiques et géomorphologiques	<ul style="list-style-type: none"> - Unités paysagères - Définition du tronçon
2. Définition des types de confinement	Confinement latéral des cours d'eau	<p>Typologie des confinements :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 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)	<p>Typologie morphologique :</p> <ul style="list-style-type: none"> - (C) : chenal unique/ divaguant/ en tresse/ en anabranche - (PC-U) : chenal rectiligne/ sinueux/ méandriforme/ divaguant/ en tresse/ en anastomose
4. Autres éléments permettant de délimiter le tronçon	<p>Discontinuité dans le cours d'eau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - De la pente du lit - Des unités géomorphologiques - Du tri granulométrique - De la largeur du chenal - etc. 	<ul style="list-style-type: none"> - Tronçon délimité

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

Les différentes unités paysagères peuvent se définir par une homogénéité de la géologie, de la lithologie ainsi que des formes du relief. Puisqu'il s'agit d'une étude hydromorphologique, ces unités paysagères sont aussi régies par une homogénéité hydrologique. C'est pourquoi elles peuvent trouver un équivalent, en France, dans les Hydro éco régions (Wasson *et al.*, 2004).

Le degré de confinement

Le degré de confinement définit le type du cours d'eau, mais aussi sa notation dans l'évaluation. En effet, Rinaldi n'évalue pas les mêmes critères d'un cours d'eau selon qu'il est confiné (*C*), ou non confiné (*U*) (Rinaldi *et al.*, 2011).

Le degré de confinement est un pourcentage de berge qui est en contact avec les versants, ou les anciennes terrasses sur la longueur totale des deux berges (Brierley & Fryirs, 2004). En clair, il s'agit de faire un ratio de la largeur du cours d'eau à plein bord par rapport à la largeur de la première terrasse. En effet, si la largeur de la première terrasse correspond peu ou prou à la largeur du cours d'eau, alors le cours d'eau est très confiné, car il n'y a pas de plaine alluviale. A l'inverse, si la première terrasse fait plusieurs fois la largeur du cours d'eau, alors le cours d'eau n'est pas confiné. Les auteurs définissent ensuite trois types de confinement : confiné, partiellement confiné, non confiné (Brierley & Fryirs, 2004; Rinaldi *et al.*, 2011).

- Confinés : ce sont les cours d'eau pour lesquels 90% des berges sont directement en contact avec les versants ou les anciennes terrasses, et où il n'y a pas ou peu de plaine alluviale ($\leq 10\%$)
- Partiellement confinés : ce sont les cours d'eau pour lesquels le total de leurs berges en contact avec les versants ou les anciennes terrasses varient entre 90% et 10%
- Non confinés : ce sont les cours d'eau pour lesquels moins de 10% de leurs berges sont en contact avec les versants ou les anciennes terrasses. La plaine inondable est presque continue, il n'y a donc quasiment pas de contrainte de mobilité pour le cours d'eau.

S'ajoute à cela l'indice de confinement. Celui-ci correspond à la largeur de la plaine inondable par rapport à la largeur du chenal à plein bord. Il est inversement proportionnel au degré de confinement, c'est-à-dire qu'un indice de confinement égal à 1 correspondra à une inexistence de la plaine inondable tandis que plus le résultat de l'indice s'éloigne d'un, plus la plaine inondable est large. De la même manière, l'indice est divisé en trois classes (Rinaldi *et al.*, 2011) :

- Confinement élevé : l'indice de confinement du cours d'eau est compris entre 1 et 1.5
- Confinement moyen : l'indice de confinement du cours d'eau est compris entre 1.5 et n , où n vaut 5 pour les chenaux uniques, et 2 pour les chenaux en anastomose ou errant

- Confinement faible: l'indice de confinement du cours d'eau est inférieur à n où n vaut 5 pour les chenaux uniques, et 2 pour les chenaux en anastomose ou errant

Il a été démontré que pour les chenaux uniques, une valeur élevée est l'indice d'une plaine inondable suffisamment large pour que le cours d'eau puisse méandrer librement, et cela est environ égal à 4.5 fois la largeur du chenal (Leopold & Wolman, 1957).

On peut résumer le lien entre degré de confinement et indice de confinement pour classer les cours d'eau, comme suit (Tableau 9 & Figure 16):

Classe de confinement	Description
Confiné	Tous les cas dont le degré de confinement est $>90\%$
	Cas dont le confinement est de 10% à 90% et dont l'indice de confinement est ≤ 1.5
Partiellement confiné	Cas dont le confinement est de 10% à 90% et dont l'indice de confinement est >1.5
	Cas dont le confinement est $\leq 10\%$ et dont l'indice de confinement est $\leq n$
Non confiné	Cas dont le degré de confinement est $\leq 10\%$ et où l'indice de confinement est $>n$

Tableau 9 : tableau récapitulatif des trois classes de confinement d'un cours d'eau (d'après Rinaldi *et al.*, 2016)

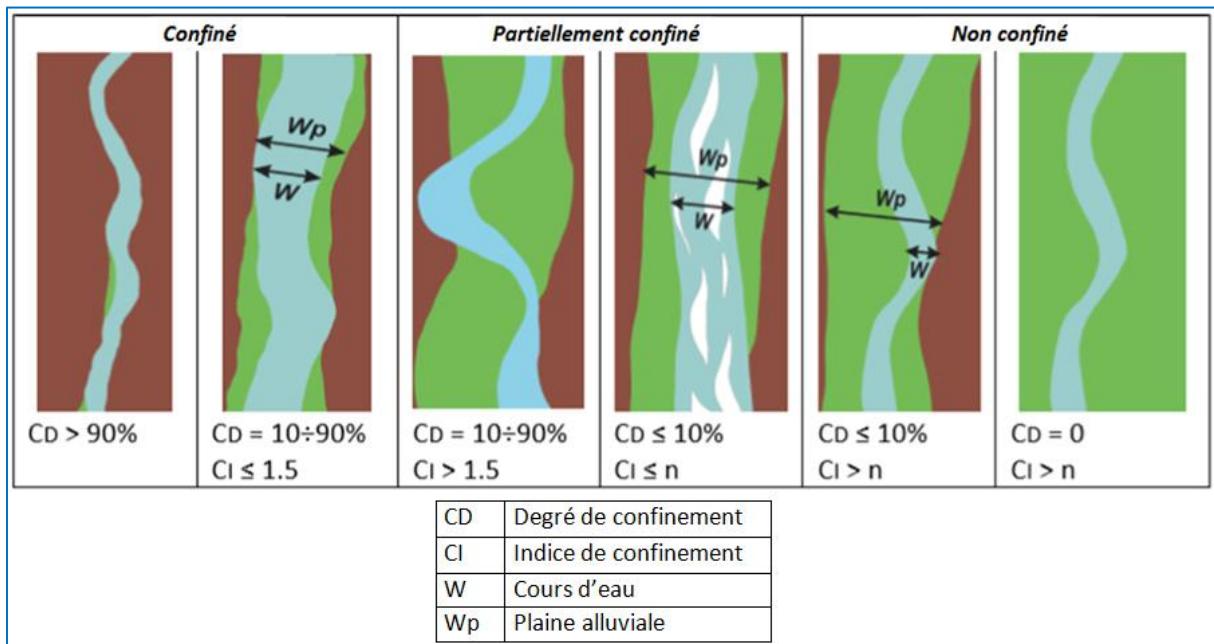


Figure 16 : classes de confinement illustrées

Typologie morphologique des chenaux

Rinaldi s'intéresse ensuite à la morphologie des chenaux (Rinaldi *et al.*, 2011). Elle est définie par la forme fluviale du cours d'eau, c'est-à-dire le nombre de chenaux qui le composent, par rapport à son degré de confinement. Le confinement d'un cours d'eau ne définit pas systématiquement son chenal, cependant, en fonction de celui-ci, on peut effectuer un premier tri dans le type de chenal possible (Tableau 10). L'auteur se sert de la *Basic River Tipology* (BRT) (Gurnell *et al.*, 2016), qui résume les sept types de rivière possibles.

On peut, dans un premier temps, classer les cours d'eau confinés en deux types : les chenaux simples et les chenaux multiples. On ne peut pas faire de distinction plus précise sur ce genre de cours d'eau, étant donné que leur sinuosité est due à la forme de la vallée et non au lit de la rivière. Pour ceux-ci, on trouve donc seulement quatre formes de chenal, si l'on suit la BRT : les chenaux simples, les chenaux errants, les chenaux en tresse et les chenaux en anabranche.

Pour les cours d'eau partiellement confinés et non confinés, il faut s'aider de l'indice de sinuosité, de l'indice de tressage et de l'indice d'anabranche pour les définir.

- L'indice de sinuosité (Si): il s'agit du rapport entre la largeur du chenal principal et la largeur du lit mineur. Il ne se calcule pas pour les cours d'eau en anabranche.
- L'indice de tressage (Bi): il s'agit du nombre de chenaux actifs en débit moyen, c'est-à-dire où l'eau s'écoule pour la majeure partie de l'année, séparés par des bancs.
- L'indice d'anabranche (Ai) : il s'agit du nombre de chenaux actifs en débit moyen, séparés par des îles végétalisées.

Ces trois indices sont définis dans la Tableau 10 puis illustrés dans la Figure 17.

Typologie	Indice de sinuosité (Si)	Indice de tressage (Bi)	Indice d'anabranche (Ai)
Droit	$1 \leq Si < 1.05$	$1/1.5$ (généralement proche de 1)	$1/1.5$ (généralement proche de 1)
Sinueux	$1.05 \leq Si < 1.5$	$1/1.5$ (généralement proche de 1)	$1/1.5$ (généralement proche de 1)
Méandrique	≥ 1.5	$1/1.5$ (généralement proche de 1)	$1/1.5$ (généralement proche 1)
Errant	\emptyset	$1 \leq Bi < 1.5$	$1 \leq Ai < 1.5$
Tressé	\emptyset	≥ 1.5	< 1.5
Anabranche	\emptyset	$1/1.5$	≥ 1.5

Tableau 10 : tableau récapitulatif des indices de sinuosité, de tressage et d'anabranche

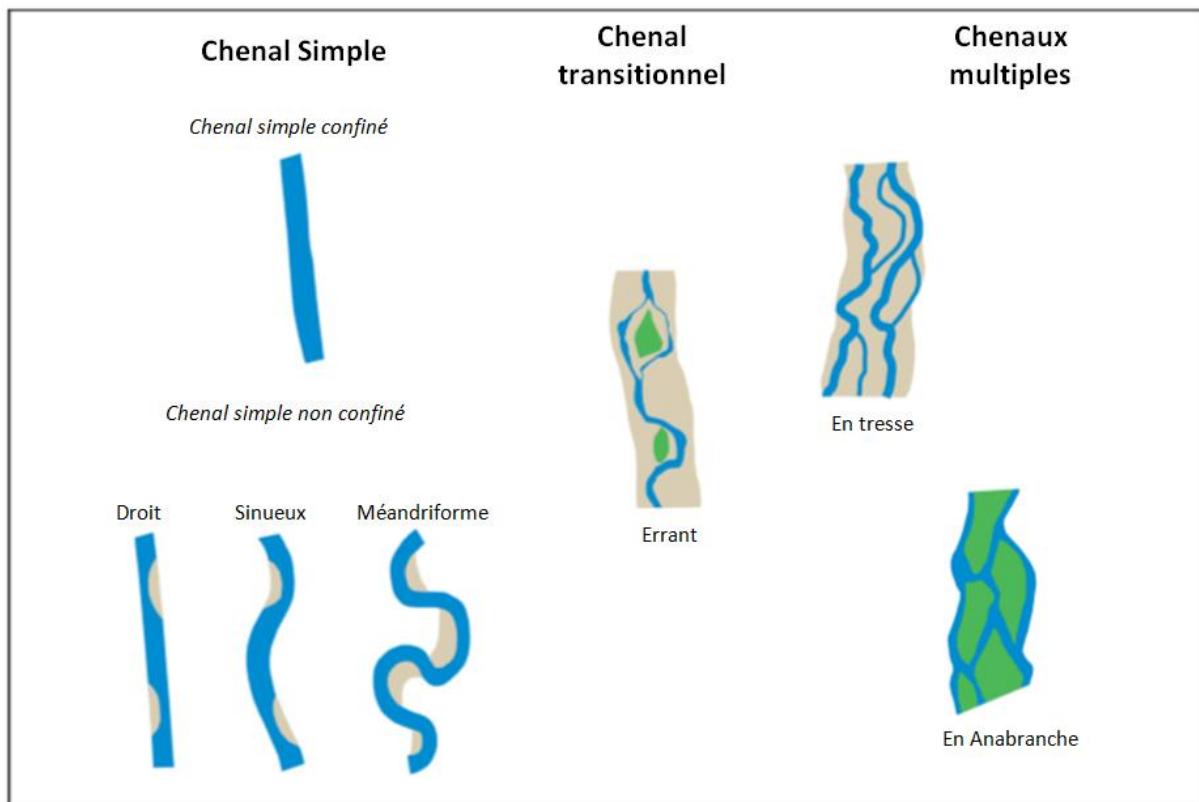


Figure 17 : illustration de la *Basic River Typology* d'après (Rinaldi et al., 2011)

Autres éléments de délimitation

Rinaldi conclut la définition d'un tronçon de rivière pour l'évaluation d'un MQI en prenant aussi en compte les variations géomorphologiques importantes. Il s'agit simplement de délimiter le tronçon d'étude dans une zone où la pente du lit est homogène, où il n'y a pas de confluence entre deux affluents relativement importants, où il n'y a pas de barrage ou d'éléments artificiels importants au milieu du tronçon mais directement à l'amont ou à l'aval, où le confinement reste le même d'un bout à l'autre de celui-ci, et où la répartition granulométrique est la même sur toute la partie étudiée.

Les outils

Le score du MQI est obtenu grâce à deux outils principaux : les SIG et l'étude de terrain. Ces deux outils compartimentent aussi le travail à effectuer pour évaluer un tronçon grâce au MQI. Il y a la première phase d'étude qui consiste à délimiter le tronçon et à décrire l'unité paysagère dans laquelle il se trouve, en se servant des données disponibles sur ce cours d'eau. Pour vérifier ces informations et pour les préciser, il faut ensuite aller enquêter directement sur le terrain, en observant plus en détail le tronçon.

Pour les SIG, il s'agit de trouver les données déjà disponibles à l'échelle du tronçon, mais aussi du bassin versant. Les données principales sont surtout des données acquises par télédétection, comme les photographies aériennes (anciennes et récentes), des

orthophotographies ainsi que des MNT. Le but est d'avoir la vision la plus précise et la plus juste possible du terrain en amont de l'enquête, mais aussi d'avoir des informations plus générales sur l'ensemble de l'unité paysagère. Il faut ajouter à ces données rasters, des données vecteurs, des informations complémentaires comme la présence de barrages, de ponts, ou de tout autre élément artificiel présent sur le tronçon et en amont. On peut enfin, si les données existent, se pencher sur les archives nationales, régionales ou cantonales, afin de lister les aménagements ou les travaux qui ont été faits sur ce cours d'eau. Ainsi, l'analyse SIG s'effectue sur l'ensemble du cours d'eau, et sur une large partie du bassin versant.

L'enquête de terrain, à l'inverse, se concentre sur le tronçon délimité. Il n'y a pas de mesure de terrain spécifique à faire, il s'agit principalement d'observation. L'auteur précise que l'évaluation doit être dirigée par un hydromorphologue, c'est-à-dire un spécialiste capable d'évaluer qualitativement les différents éléments du MQI.

Afin de faciliter le travail de recherche, Rinaldi indique, pour chaque notion évaluée, le type de données à étudiées, ainsi que les méthodes à utiliser (Annexe 1).

L'évaluation

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 13 sous-catégories de fonctionnalités, 12 catégories d'artificialité et 3 catégories d'ajustement des chenaux, appelées « variations morphologiques » dans le tableau d'évaluation (Annexe 2). Chacune est évaluée individuellement. L'ensemble des indicateurs utilisés peut-être illustré par un tableau à double entrée, avec les aspects principaux en lignes, et les grandes catégories en colonnes (Tableau 11).

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

Tableau 11 : Tableau 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, lui, calculé en tant que ratio entre le score du tronçon, et le score total qu'il est possible d'obtenir en fonction de son 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 notamment pour le F2, la présence d'une plaine inondable plus ou moins continue (Annexe 2), qui est spécifique aux chenaux partiellement confinés et non confinés, par exemple. En effet, les chenaux confinés n'ont, par définition, pas de plaine inondable, mais pour les deux autres catégories, la présence de plaine inondable est une information importante, afin de savoir si le cours d'eau peut méandrer, et si, lors de crues, le lit moyen est suffisant pour accueillir l'excédent d'eau.

Puisque le score est principalement basé sur des dires d'expert, et donc sur une évaluation qualitative, les scores sont de fait arbitraires (Rinaldi *et al.*, 2011). Pour chaque sous catégorie, trois classes sont définies : les classes A, B et C où A correspond à une catégorie non altérée, ou altérée de manière négligeable, B à une catégorie dont les altérations sont intermédiaires, et C une catégorie très altérée. Pour chaque catégorie, le tableau évaluatif (Annexe 2) comporte 3 colonnes principales :

- La colonne n°1 : correspond au code de la catégorie.
- La colonne n°2 : correspond à la définition de la situation de référence pour cette catégorie (A), de la définition de la situation intermédiaire (B), et de l'altération complète (C).
- La colonne n°3 : correspond au score qui est attribué pour chaque valeur, où A équivaut toujours à 0, et où le score varie pour B et C en fonction des catégories.
- La colonne n°4 : correspond aux premières observations SIG qui ont été faites avant l'enquête de terrain.

Les scores de B et C varient respectivement entre 2 et 3 pour B et entre 5 et 12 pour C, en fonction de l'importance de la catégorie. Pour les catégories A4, A7, A8, et A9, 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 va de 0 à 1, où 0 indique qu'il n'y a pas d'altération et 1 que l'altération est totale, tel que :

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

Sur cette base, on peut ensuite calculer le MQI, qui va, lui aussi, de 0 à 1 mais où 0 signifie une qualité hydromorphologique moindre et plus on tend vers 1 meilleure est la qualité, tel que :

$$\text{MQI} = 1 - \text{MAI}$$

L'auteur classe les résultats obtenus comme allant de « très bon » à « très mauvais », comme l'indique le Tableau 12.

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 12 : tableau de la classification de la qualité hydromorphologique des cours d'eau selon le MQI

L'Indice Poisson Rivière

Cet indice a été créé dans les années 2000 afin de répondre à la loi Européenne sur la préservation et la restauration du bon état écologique des cours d'eau (DCE,2000), afin d'évaluer la qualité des milieux, notamment le milieu biologique, à travers la faune piscicole (Oberdorff *et al.*, 2002). Les auteurs se basent pour cela sur des éléments environnementaux comme la vitesse du cours d'eau, sa profondeur, la diversité de son substrat, la température de l'eau, sa pente, sa largeur, son débit, sa longueur totale, la surface du bassin versant drainé, etc. Ils se basent sur des régions géomorphologiques qu'ils différencient par la taille moyenne des bassins versants, par la géomorphologie et par le climat de ceux-ci. Tous ces éléments déterminent, selon eux, la richesse et la composition des peuplements piscicoles.

Les auteurs se basent sur 650 stations réparties en France dans huit unités hydrologiques différentes (Figure 18). Chaque station est d'abord définie selon ses éléments environnementaux propres, afin d'établir ensuite une probabilité d'occurrence sur chaque station des 34 espèces de poissons sélectionnées par les auteurs comme étant représentatives (Oberdorff *et al.*, 2002). Ce peuplement « théorique » de chaque station permet d'évaluer l'altération possible d'une station. En effet, les 34 espèces sont choisies comme étant les plus communes dans les cours d'eau français. L'addition des probabilités de présence de chacune de ces espèces, pour chaque référentiel permet de concevoir un peuplement théorique, autrement dit un modèle d'évaluation par unité hydrologique pour l'ensemble des stations.

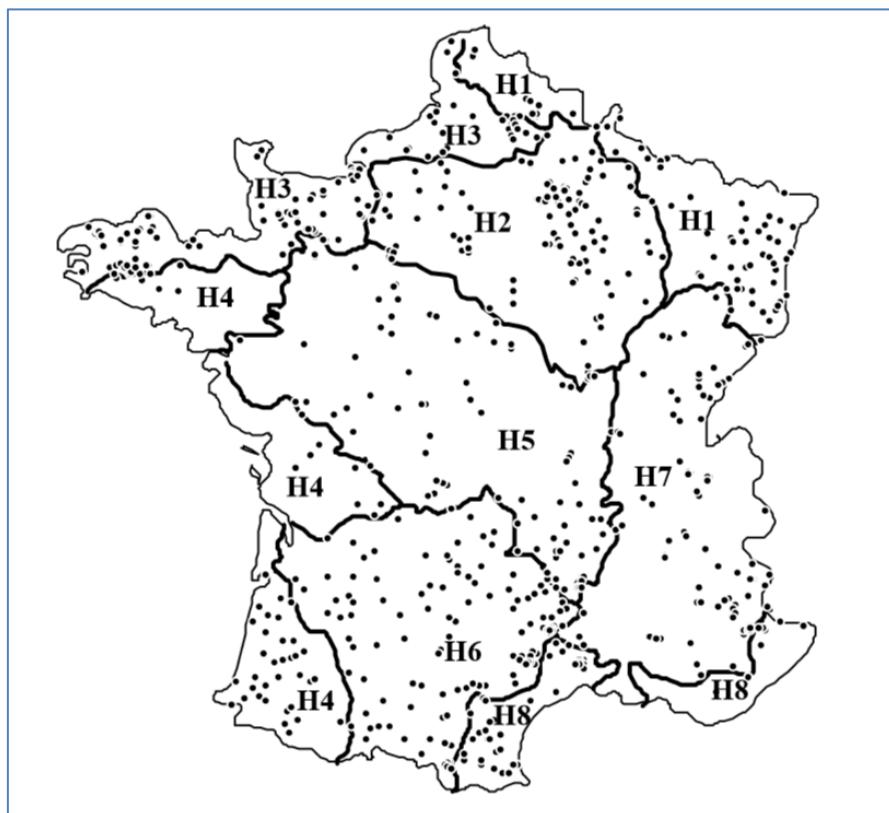


Figure 18 : Carte des stations sur lesquelles se basent les modèles d'évaluation de l'IPR, réparties dans huit unités hydrologiques (*in* Oberdorff *et al.*, 2002)

Ces grilles évaluatives ont été réalisées par des experts, principalement des ingénieurs et des garde-pêches, et la qualité chimique de l'eau a été relevée par l'Agence de l'Eau, afin de ne retenir que les stations qui ne sont pas altérées chimiquement. Le but n'est pas de relever toutes les stations qui sont altérées en général, mais de cibler le type d'altération et de se concentrer sur les altérations hydromorphologiques et biologiques des cours d'eau. Dans les évaluations finales, ont principalement été retenus la morphologie du chenal, le degré d'anthropisation de la station, le régime des débits, la qualité de berges et du substrat, ainsi que les conditions d'écoulement général de l'eau dans la station (présence d'embâcle, de digues, de passages à guet, etc.) (Oberdorff *et al.*, 2002).

Données utilisées

Pour ce travail de recherche, j'ai utilisé plusieurs jeux de données déjà disponibles pour créer ma propre base, afin de pouvoir évaluer le plus grand nombre de stations Carhyce avec le MQI. Un certain nombre étaient libres de droits et disponibles en ligne, telles que :

- **La base de données Carhyce** (Gob *et al.*, 2014a): disponible à l'échelle de la France, sur <http://lgp.cnrs.fr/carhyce>, ce sont les données qui permettent de calculer un IMG, que je vais comparer avec le MQI. Je me suis aussi servi des données brutes (avant traitement statistique sous R) pour automatiser l'évaluation MQI.
- **Corine Land Cover** (2018) : disponible à l'échelle européenne, elle m'a permis de déterminer l'occupation du sol autour des stations étudiées.
- **Les Hydro éco régions** (Wasson *et al.*, 2002) : disponible à l'échelle de la France, ce sont elles qui sont utilisées par la base de données Carhyce pour délimiter les différentes régions de France, d'un point de vue hydromorphologique. J'ai repris cette délimitation pour le choix des stations qui ont servi à l'étude.
- **Le réseau USRA** (Chandesris *et al.*, 2008) : disponible à l'échelle de la France, c'est le réseau hydrographique utilisé par Syrah-CE, délimité en tronçons homogènes. Je m'en suis servi pour délimiter mes tronçons d'étude lors de la phase d'analyse SIG, mais aussi lors de l'automatisation, car sa base de données comprend des données sur la largeur des fonds de vallées notamment.
- **Le Référentiel Obstacle Ecoulement** (Eau France 2018) : disponible à l'échelle de la France, je l'ai utilisé pour la phase d'analyse SIG, en observant le nombre de ROE présents sur le tronçon, leur type ainsi que leur hauteur, puis pour l'automatisation de l'évaluation MQI, en utilisant leur nombre par tronçon USRA, ainsi que des informations sur la hauteur des ouvrages *via* les champs « CdHautChut » et « HautChutEt » afin de différencier l'impact qu'ils peuvent avoir sur l'hydromorphologie du tronçon.
- **Les données IPR et IPR+** (Marzin *et al.*, 2012) : sont disponibles pour 1 128 stations réparties sur le territoire de la France métropolitaine. Elles ont été fournies par l'Agence Nationale de l'Eau (2018).
- **Le tableau évaluatif MQI** : sert de base pour l'étude comparée entre l'IMG et le MQI, a été fourni par Rinaldi (Rinaldi *et al.*, 2011).

D'autres données m'ont été fournies par le Laboratoire de Géographie Physique (LGP), dans le cadre de mes recherches, telles que :

- **Les bassins versants de chaque station Carhyce** : ont été calculés grâce aux données disponibles au LGP
- **Les orthophotographies à 50cm** : disponibles à l'échelle de la France, elles proviennent de l'IGN (2019).
- **Les photographies aériennes de 1950-1965** : sont disponibles à l'échelle de la France, elles proviennent de l'IGN (2019)

Zone d'étude

Le projet Carhyce ayant réparti ses stations de relevés de données sur toute la France, nous avions initialement décidé de sélectionner quinze stations dans trois régions distinctes afin d'effectuer nos comparaisons. Faute de temps, nous n'avons pu réaliser qu'une étude de terrain, dans le Massif Central Nord.

Pour le choix des régions, nous nous sommes basés sur les HER (Hydro Eco Région), définies par J.G Wasson (Figure 19), dans son article éponyme (Wasson *et al.*, 2002), qui sont aussi celles qu'ont utilisées Gob *et al* (2014) pour définir les différentes régions et les stations de référence de Carhyce.

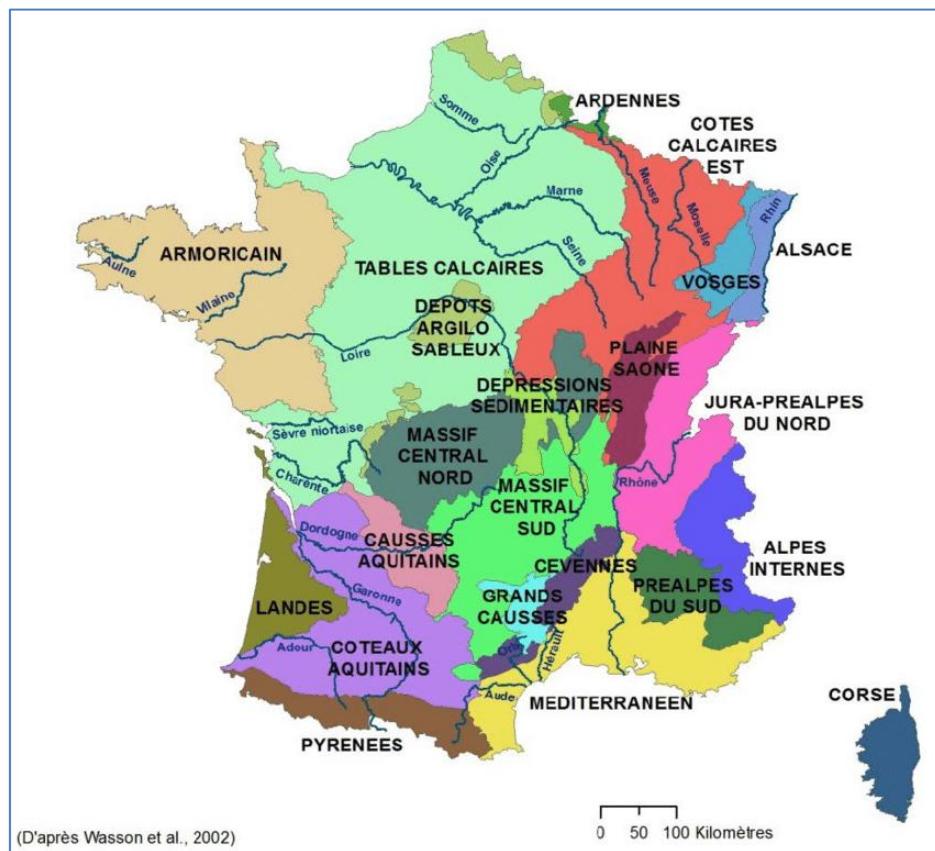


Figure 19 : Les hydro éco régions de niveau 1, classées selon leurs particularités climatiques, lithologiques, hydrologiques et de relief (d'après Wasson *et al.*, 2002)

La région Massif Central Nord, a été choisie pour la présence d'un nombre suffisant de stations de référence et pour pouvoir avoir des résultats fiables, ainsi que pour sa proximité avec Paris qui nous a permis de maximiser notre temps sur le terrain et de faire un nombre de stations satisfaisant. En effet, il a été vérifié que les modèles de stations de cette HER ont des coefficients de détermination forts qui permettent d'avoir une relation significative entre la station de référence et les autres stations du HER. Les stations de référence sont les moins altérées et montrent de ce fait aussi une spécificité régionale de la

morphologie des cours d'eau, qui peut avoir été perdue dans les cours d'eau très altérés (Tamisier *et al.*, 2014).

La présentation qui suit de la région est tirée exclusivement de l'article de J.G Wasson *et al.* (2002) : *Approche régionale de la typologie des eaux courantes et éléments pour la définition des peuplements de référence*, sauf précision.

Le Massif Central Nord

Cette région couvre le Plateau du Limousin, la Montagne Bourbonnaise ainsi que le Morvan. C'est principalement un relief de plateaux où la pente est plus forte vers le Nord. Il est classé dans les reliefs montagnards au vu de son altitude globalement supérieure à 800m, mais avec des pentes qui restent relativement douces.

Nous nous trouvons ici sur des terrains de socle précambrien, entourés par la ceinture jurassique qui le sépare des Tables calcaires au Nord. Une faille qui s'étend des causses du Quercy à la Limagne le sépare du Massif central sud, et à l'Est c'est la Limagne tertiaire qui le borde. Il est caractérisé par des roches granitiques, dures, imperméables, non carbonatées, et résistantes à l'érosion. Elles sont principalement métamorphiques et de formation plutonique. On y retrouve principalement des schistes éruptifs, bien que les territoires volcaniques soient plutôt situés dans le Massif central sud (Charlier *et al.*, 2014).

C'est un climat montagnard, qui connaît de fortes précipitations en Automne et en hiver, sous forme de neige. Météo France y enregistre en moyenne 1 500mm de pluie par an.

Il n'y a pas de grand cours d'eau qui la traverse, mais des rivières de taille secondaire telles que la Vienne, la Creuse, le Cher, la Vézère et l'Isle. Pour la plupart des cours d'eau, il s'agit de leur point de source, ce qui explique leur taille moindre, mais aussi le nombre élevé de stations de référence et/ou très peu altérées dans cette HER. En effet, les lieux de sources sont souvent moins anthropisés que les larges fleuves, car ils offrent moins de possibilités d'aménagement.

Méthodologie

Analyse SIG

L'étude comparée entre l'IMG de Carhyce et le MQI réside principalement, pour moi, dans une nouvelle étude de chaque tronçon Carhyce avec la méthode de Rinaldi. Dès lors, la première partie des études se fait par analyse SIG.

D'abord, au sein de l'HER étudiée, à savoir le Massif Central Nord, il faut choisir une trentaine de stations, qui seront par la suite étudiées sur le terrain. Ces stations sont choisies en fonction de leur IMG et de la largeur de leur plaine alluviale. J'essaye ainsi d'avoir un panel large et plus ou moins représentatif de ce qui existe sur l'HER. Par exemple, pour le Massif Central Nord, les plaines alluviales étant en moyenne plus larges que pour les Préalpes du Nord, je n'ai pas essayé de prendre uniquement les largeurs maximales et minimales, mais aussi les largeurs moyennes propres aux hydro éco régions.

Il faut, pour l'évaluation du MQI, définir le confinement des cours d'eau, selon la classification que donne Rinaldi (Rinaldi *et al.*, 2011). J'ai décidé pour cela de faire un ratio entre la donnée « fdv » (fond de vallée) de la couche Syrah, et la largeur à plein bord de la base de données Carhyce. J'ai ensuite classé de la sorte :

- $0 < 5$ = confiné
- $5 < 15$ = partiellement confiné
- > 15 = non confiné.

Une fois les stations choisies, je délimite les tronçons hydrographiques de chaque station, puis les Référentiels Obstacles Ecoulements (ROE) présents sur chaque station. Si, durant la partie SIG, je travaille à l'échelle du tronçon Syrah, c'est-à-dire à une échelle pluri-kilométrique, nous avons ensuite décidé que je me concentrerai sur une distance de 50 fois la largeur plein bord sur le terrain, ce que conseillent aussi de faire les auteurs du MQI (Rinaldi *et al.*, 2011). Le but est de lister les différents ROE, et de voir quel impact ils ont sur le tronçon. Pour cela, je regarde d'abord la hauteur d'eau du ROE et ensuite s'il y a des annotations telles que « partiellement détruit », ou « abandonné », qui pourraient minimiser l'impact du ROE sur la station (Figure 20).

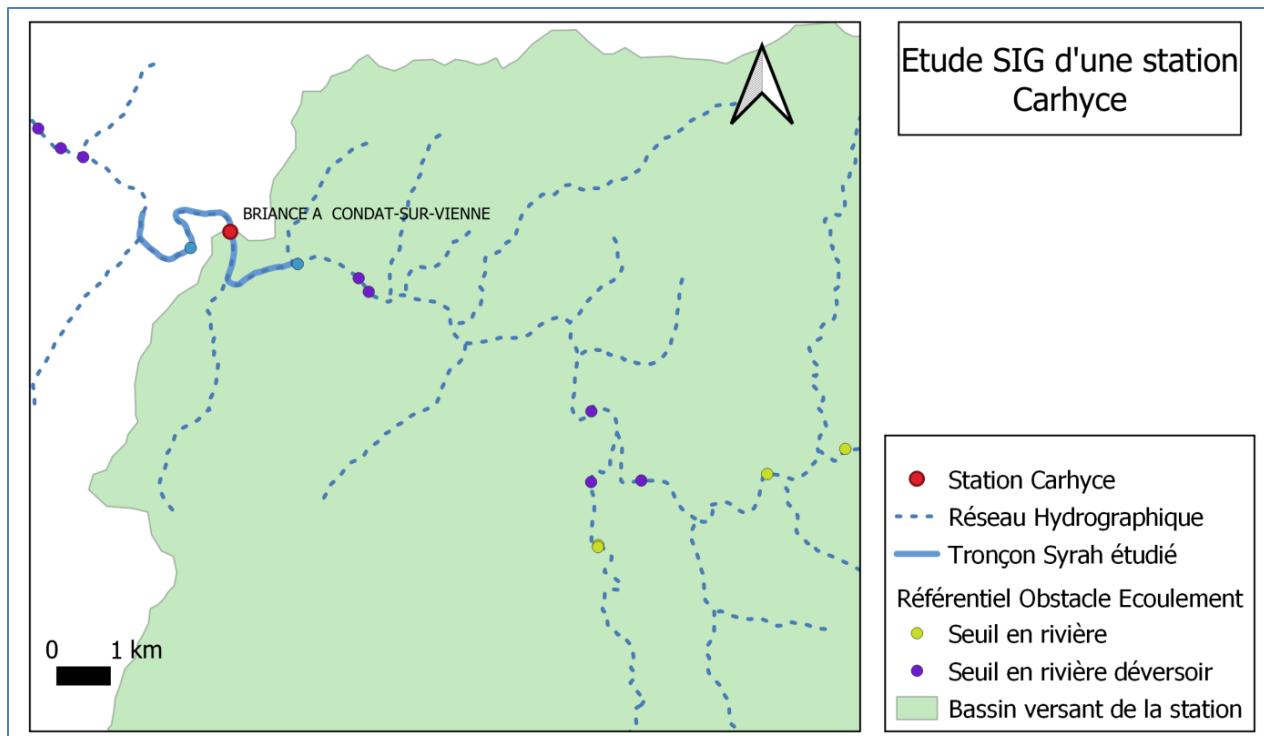


Figure 20 : Exemple type d'une étude SIG pré enquête de terrain, dans l'HER 21

Une fois cette étape achevée, j'étudie grâce à des orthophotographies les cours d'eau et leur ripisylve, mais aussi l'importance des barrages et des seuils. Le but est d'avoir une pré-étude la plus précise possible afin de faciliter le terrain et de ne pas faire de contresens. Grâce aux orthophotographies à 50cm, je peux voir les embâcles, l'épaisseur de la ripisylve ou encore les îlots, végétalisés ou non. La Figure 21 illustre cela. Sur la station de Briance sur Vienne il y a en effet un seuil de barrage directement en amont du tronçon Syrah. Il est donc important de l'avoir remarqué *via* les SIG, puisqu'il est beaucoup plus en amont que ce que l'on étudie directement sur le terrain. Le pont sur la photographie la plus à gauche illustre la même chose. De plus on peut aussi calculer l'épaisseur de la ripisylve, ainsi que sa densité sur l'ensemble du cours d'eau.

Sur cette couche, je superpose ensuite les photographies aériennes des années 1950, afin de voir s'il y a une différence entre les deux époques. Je regarde principalement s'il y a de nouveaux barrages ou étangs de rétention qui se sont construits, si la ripisylve a diminué ou augmenté et si la morphologie générale du cours d'eau est différente (Figure 22). On peut voir ici par exemple, qu'entre 1950 et aujourd'hui la ripisylve est beaucoup plus épaisse, mais aussi que le seuil de barrage était déjà présent et aussi important qu'aujourd'hui.

Après avoir étudié chacun des points, je préremplis l'évaluation MQI (Annexe 2), en annotant assez précisément les catégories observables préalablement, afin que les indications soient réutilisables sur le terrain.

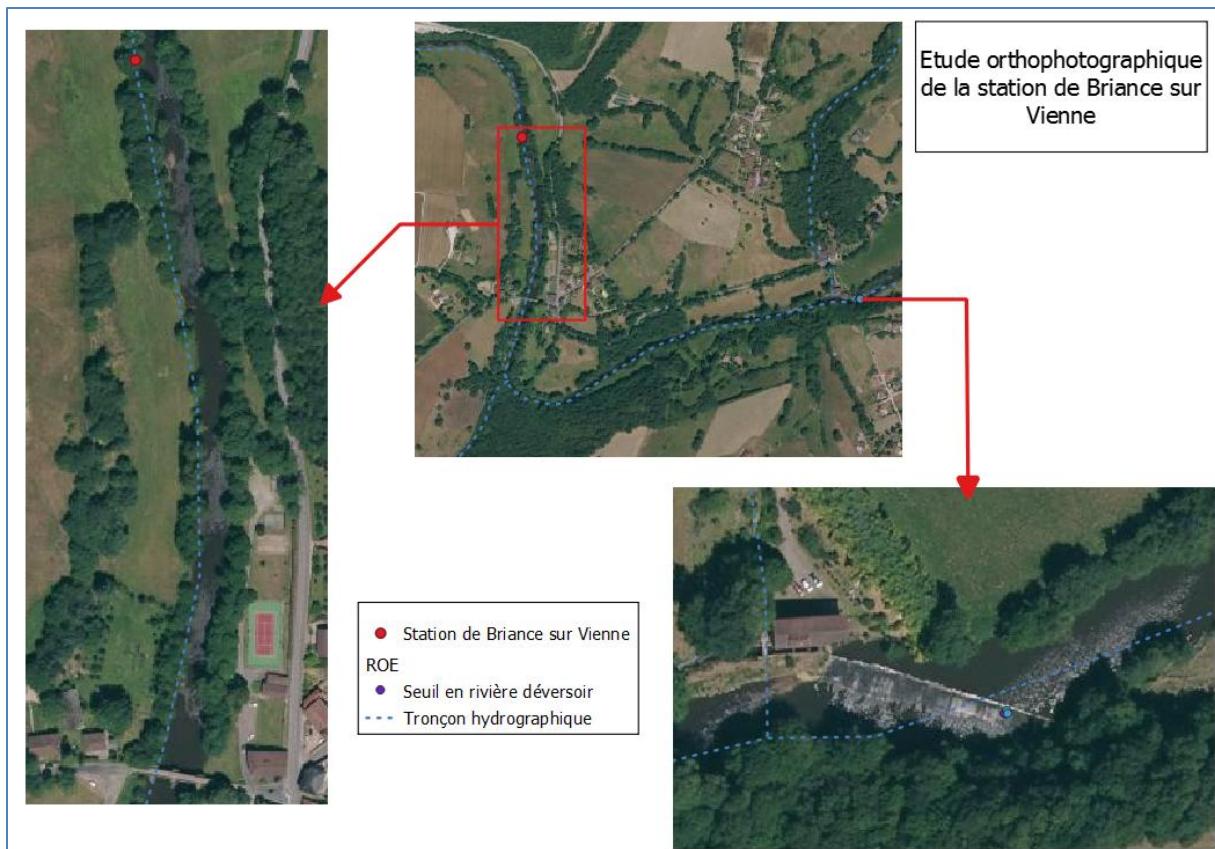


Figure 21 : Etude orthophotographique menée sur Briance sur Vienne dans le Massif Central Nord à l'époque actuelle

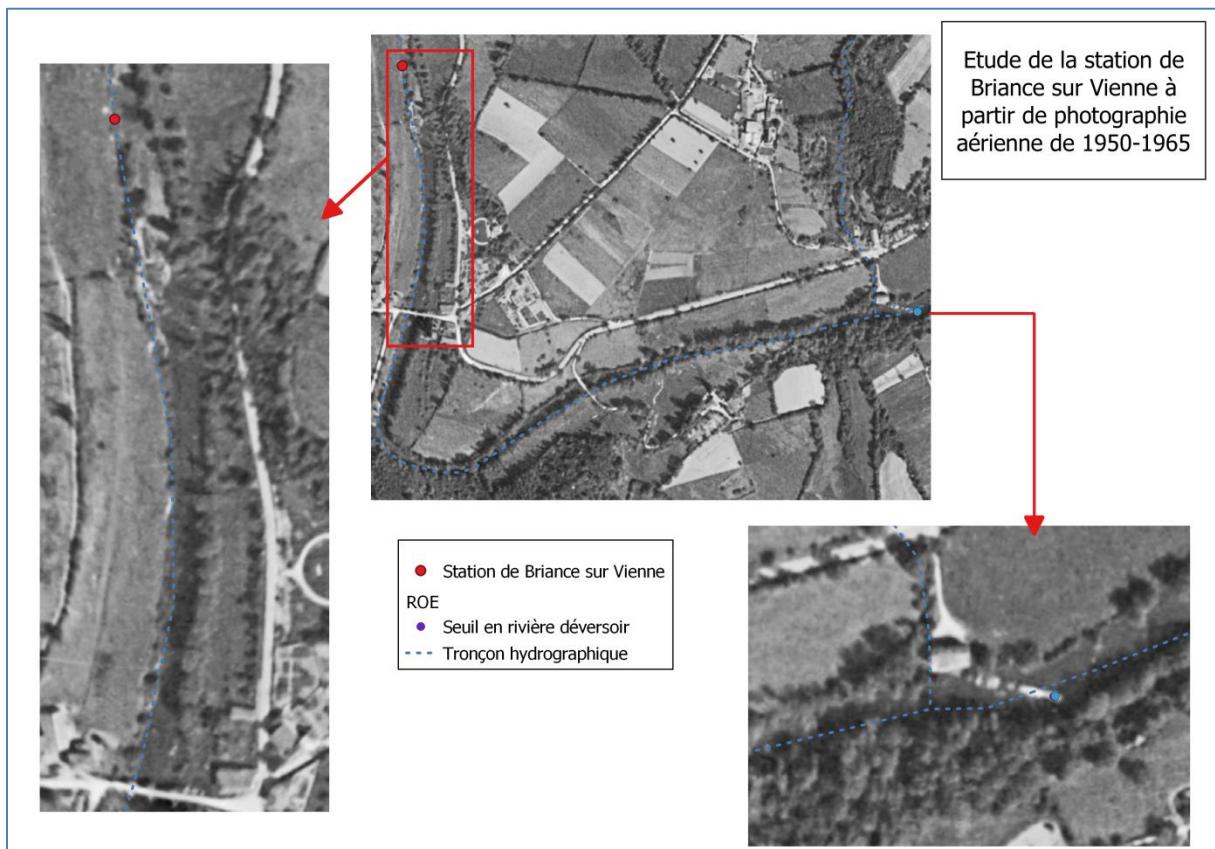


Figure 22 : Etude photographique de la station de Briance sur Vienne, dans le Massif Central Nord, dans les années 1950-1965

Relevés de terrain

Puisque le MQI est essentiellement qualitatif, le principe de l'enquête de terrain réside dans l'observation des différents facteurs hydromorphologiques d'un cours d'eau (Rinaldi *et al.*, 2011). Dès lors, pour chaque station, nous commençons par noter les éléments importants à observer sur la station, comme la densité et la continuité de la ripisylve, la présence ou non de berge ou de levée, la présence de bois mort, d'îlots, l'érosion des berges, la rugosité du cours d'eau, etc. Lorsque nous remontons le cours d'eau, nous prenons des régulièrement photographies afin de pouvoir nous appuyer sur des preuves concrètes si jamais des doutes subsistent lors de l'évaluation (Figure 23). Cette photographie est un exemple de ce que l'on peut observer plus précisément sur le terrain, et qui n'est pas visible sur les orthophotographies et les photographies aériennes. Une fois la station prospectée, nous l'évaluons, par rapport aux annotations de l'étude SIG et aux observations de terrain. De retour au labo, je rentre les notes dans un tableau Excel commun à tous les HER que j'étudie, qui me servira plus tard pour l'analyse statistique comparative entre le MQI et l'IMG.



Figure 23 : Exemple d'observation de la station de la Creuse à Clairavaux (photographie personnelle)

Automatisation de la méthode

L'enquête de terrain, selon Rinaldi, demande environ une journée par station (Rinaldi *et al.*, 2011). Nous avons suivi strictement le protocole MQI afin d'avoir un panel statistique représentatif de ce qu'est le MQI par rapport à Carhyce, mais cette méthode étant chronophage, et au vu de la situation sanitaire de ces derniers mois, qui nous a contrainte à visiter un nombre limité de stations, et uniquement dans le Massif Central Nord, nous avons choisi de coupler le terrain avec une automatisation du MQI, afin d'avoir un panel plus vaste de stations étudiées et d'avoir une étude statistique plus représentative de la France dans son ensemble. Nous avons donc automatisé la méthode d'évaluation du MQI, en nous servant de données déjà disponibles. Nous avons principalement utilisé la base de données de l'IPR, qui avait déjà servi pour déterminer les stations Carhyce de référence (Marzin *et al.*, 2013; Oberdorff *et al.*, 2002). A partir de cette base, nous utilisons les données suivantes (Tableau 13, Annexe 3) :

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 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 plein bord 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
MophoBerge	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
MorphoRipisyl	Il s'agit du taux d'artificialisation et de l'entretien excessif de la ripisylve.	A12

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

A ces données, nous ajoutons aussi des données Syrah, principalement la largeur du fond de vallée (« fdv »), qui, couplé à la largeur à plein bord de la base de données Carhyce, nous donne le type de confinement des cours d'eau, mais aussi la plus ou moins grande continuité de la plaine inondable (Annexe 3 : F2).

Nous utilisons aussi la colonne appelée « TauxVCom » qui est le taux de voies de communication, voies ferrées et routes, présentes sur la plaine alluviale. Cela peut nous donner une indication sur la connectivité totale ou partielle des versants et du cours d'eau, mais aussi sur la présence d'un couloir potentiellement érodable plus le taux de voies de communication est important, plus le couloir potentiellement érodable va être faible (Annexe 3 : F3/F5).

Le Réseau Obstacle Ecoulement (ROE) nous est aussi très utile. En effet, il nous permet d'avoir des informations sur le nombre de barrages et de seuils présents sur le tronçon de la station, mais aussi la hauteur de chacun de ces obstacles (Annexe 3 : F6/A3/A4/A5).

Enfin, nous nous servons aussi des données de la base Carhyce principalement avant leurs traitements statistiques. Avec les données sur les débris ligneux et les embâcles nous faisons un ratio $\frac{\text{taux de débris ligneux}}{\text{embâcle}}$, que l'on appelle « taux embâcle », et qui nous permettra de calculer la présence de matériaux ligneux sur le tronçon (Annexe 3 : F11). De même les données de continuité de ripisylve (CRI_CODE_G ; CRI_CODE_D) nous permettent d'avoir des informations sur la connectivité et l'épaisseur de la ripisylve sur chacune des stations (Annexe 3 : F12/F13).

Grâce à tous ces données, nous pouvons avoir une évaluation MQI assez complète – rappelons qu'il n'est pas nécessaire d'évaluer l'intégralité des catégories du MQI pour avoir un score exploitable, et qu'il suffit juste d'adapter le score maximal par rapport aux scores des classes évaluées (Rinaldi *et al.*, 2011) – sur un ensemble de stations assez conséquent pour une étude comparative. En effet, nous avons choisi de baser cette étude sur 1 128 stations, qui sont celles qui ont été utilisées en 2009 pour définir les références.

Nous avons, dans un premier temps, adapté les classifications de l'IPR pour qu'elles correspondent au score numérique du MQI, et nous avons ensuite fait de même pour les autres données. Nous avons résumé ces adaptations dans un tableau *Word* (Annexe 3), avant de convertir les scores dans un tableau Excel qui nous permettra par la suite de faire des analyses statistiques qui détermineront si la comparaison entre le MQI et l'IMG de Carhyce est parlante.

Résultats

1^{er} résultats : les stations prospectées à pied

Score IMG et analyse

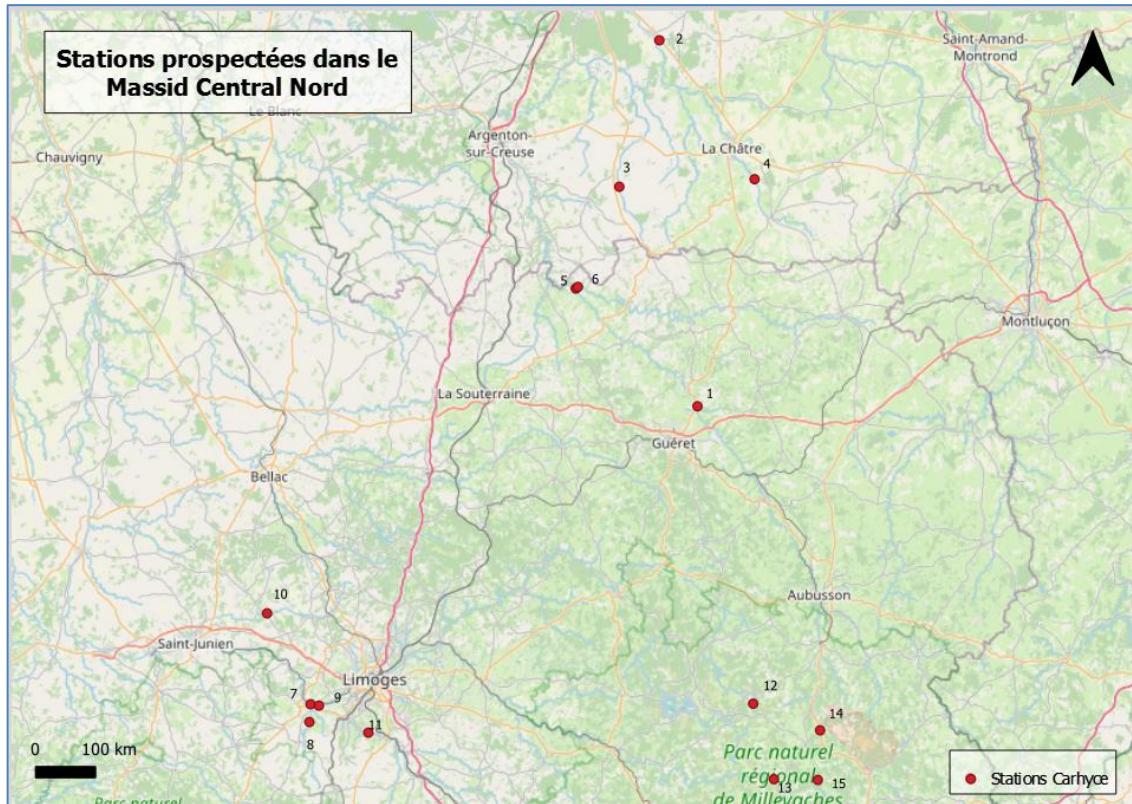


Figure 24 : Localisation des stations Carhyce prospectées dans le Massif Central Nord

	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	Ø	8,66
2	Indre à Ardentès		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	Ø	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 14 : Tableau présentant les caractéristiques principales des cours d'eau prospectés

Nous avons donc prospecté 15 stations dans l'HER du Massif Central Nord, surtout autour du plateau de Millevaches (Figure 24, Tableau 14). Dans les stations choisies, il y a 6 stations de références, et 9 stations plus altérées. Nous avons travaillé sur les rivières de la Vienne, de la Creuse et de la Petite Creuse, de la Diège, de la Bouzanne, de l'Aurence, de l'Aixette, de la Glane, de l'Indre, du Taurion et de la Briance. La Vienne, l'Aurence, et la Creuse traversent des zones urbanisées, au niveau des stations Carhyce, tandis que les autres s'écoulent soit dans des pâtures ou des champs, soit dans de petites forêts peu denses à tendance marécageuse. Même s'il y a des zones urbaines, le Massif Central Nord se caractérise en général par une très faible présence humaine puisque ce sont les départements qui sont dans la « diagonale du vide » (Beteille, 1984). Dès lors, les stations choisies, même en ville, ont un IMG plutôt bas : 11 stations ont un IMG inférieur à 8, et toutes ont un IMG inférieur à 10. Cependant, nous avons essayé de choisir des stations dont la largeur du bassin versant, la largeur à plein bord et le score IMG étaient variés, afin d'avoir un panel de stations le plus vaste possible.

L'IMG de chacune des stations récoltées sur le terrain a été comparé à son MQI calculé à partir de nos observations de terrain. Les diagrammes circulaires qui représentent les IMG de chaque station permettent de visualiser rapidement si les stations sont proches des modèles de référence régionaux ou si, au contraire, elles s'en éloignent. Ainsi, plus une des variables s'éloigne de 0, plus l'écart au modèle de référence est grand. Nous avons décidé de répartir les IMG des stations prospectées en fonction de leur écart au modèle pour toutes les variables. Dans le premier cas, il s'agit des stations dont toutes les variables sont comprises entre 0 et 1, c'est-à-dire qui correspondent à 68% des valeurs des résidus des stations de référence, autrement dit, l'ensemble des valeurs situées à plus ou moins un écart type de la moyenne par rapport à une courbe gaussienne. Ensuite, ce sont les stations dont les variables sont comprises entre 0 et 2, ce qui coïncident avec 95% des valeurs des résidus des stations de références, ou l'ensemble des valeurs situées à plus ou moins deux écarts types de la moyenne par rapport à une courbe gaussienne. Enfin les stations dont les variables sont majoritairement entre 0 et 3, où se situe 99% des résidus des stations de référence. Dans ces dernières, certaines variables vont au-delà de 3, ce qui signifie que l'écart au modèle est relativement important, et dénote une altération probable du cours d'eau au niveau de la station.

La Bouzanne à Cluis ainsi que la Diège au Moulin de Beaune (Figure 25) sont les stations qui sont les plus proches du modèle de référence du Massif Central Nord.

La Bouzanne à Cluis (IMG = 2,09) n'est pas une station de référence mais correspond au modèle pour le rapport largeur/profondeur à plein bord, pour la largeur à plein bord, pour la surface mouillée à plein bord, et pour la profondeur maximale à plein bord. La profondeur des mouilles ainsi que la pente de la ligne d'eau ne correspondent pas exactement au modèle, mais elles restent dans l'intervalle [0 ; 1], qui comprend 68% des valeurs des résidus des stations de référence. Sur les différentes photographies de la Figure

26, on peut voir quelques caractéristiques d'une rivière non altérée. La photographie 1, montre la présence de formes fluviales de plaines inondables, une petite île végétalisée, ainsi qu'un méandre. La seconde photographie illustre la présence des matériaux ligneux ainsi que des sédiments de différentes tailles. Enfin la troisième photographie évoque la possibilité qu'a le cours d'eau de méandrer.

La Diège au Moulin de Beaune (IMG = 2,57) est quant à elle une station de référence. Elle correspond au modèle pour la pente de la ligne d'eau, ainsi que pour la profondeur des mouilles. Pour le rapport largeur/profondeur à plein bord, la largeur à plein bord, la surface mouillée à plein bord, ainsi que la profondeur maximale à plein bord, la station ne correspond pas exactement au modèle, mais reste dans l'intervalle [0 ; 1], pour toutes ses variables. La Figure 27 montre les différentes particularités de la station. La photographie 1 illustre la possibilité qu'a le cours d'eau de méandrer, mais aussi l'érosion active qui a lieu au sein de celui-ci. La seconde photographie montre le cours qui se divise, toujours en méandrant, en plusieurs bras. Enfin, la troisième photographie illustre une altération anthropique passée du cours d'eau, qui a toujours un impact, bien que très relatif, sur l'écoulement du cours d'eau ainsi que sur ses berges.

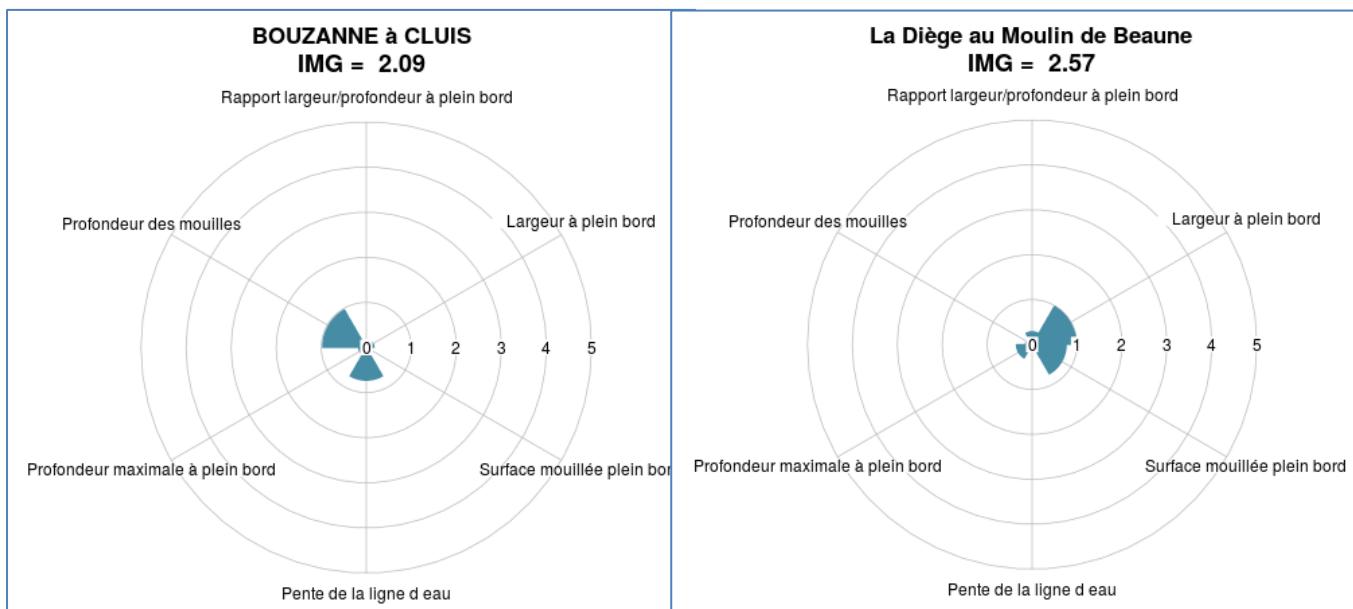


Figure 25 : diagrammes des IMG des stations prospectées dans le Massif Central Nord, dont les valeurs se situent entre 0 et 1 et correspondent à 68% du total des résidus des stations de référence pour cette HER, ce qui montre un écart au modèle très faible



Figure 26 : Photographie de la Bouzanne à la Cluis



Figure 27 : Photographie de la Diège au Moulin de Beaune

Les stations suivantes (Figure 28) ont des variables appartenant à l'intervalle [0 ; 2], ce qui signifie qu'elles sont encore très proches du modèle de référence de l'HER. Dans ces 7 stations, la Creuse à Clairavaux, la Vienne à Saint Setiers, et l'Indre à Briantes sont considérées comme des références.

La Petite Creuse à Fresselines (IMG= 4,37) correspond au modèle pour la largeur à plein bord, la pente de la ligne d'eau ainsi que la profondeur des mouilles. Pour la surface mouillée à plein bord, elle est dans l'intervalle qui comprend 68% des valeurs de référence, et pour les profondeurs maximales à plein bord ainsi que pour le rapport largeur/profondeur à plein bord, elle est dans l'intervalle qui comprend 95% des valeurs de référence. Dès lors, elle reste tout de même encore très proche du modèle de référence. Sur la Figure 29, photographie 1, on peut voir que l'alternance des seuils et des mouilles du cours d'eau est régulière et relativement espacée, mais aussi que la pente est faible car le seuil n'est pas très important.

Aurence à Aixe sur Vienne (IMG = 4,78) correspond au modèle pour la largeur à plein bord ainsi que pour la pente de ligne d'eau. Elle est dans l'intervalle [0 ; 1] pour la profondeur des mouilles et dans l'intervalle [0 ; 2] pour le rapport largeur/profondeur à plein bord, la surface mouillée à plein bord, ainsi que la profondeur maximale à plein bord. Comme la première elle reste aussi proche du modèle de référence. Même s'il elle ne s'éloigne pas du modèle, la photographie 2 de la Figure 29 montre bien que cette station connaît une anthropisation importante. En effet, elle passe au centre du village, et est coupée par une digue ainsi qu'un moulin qui modifient son fonctionnement au moins ponctuellement.

Aixette à Aixe sur Vienne (IMG = 5,15) correspond au modèle seulement pour le rapport largeur/profondeur à plein bord. Elle est dans l'intervalle [0 ; 1] pour la largeur à plein bord, la pente de la ligne d'eau, la profondeur maximale à plein bord, ainsi que la profondeur des mouilles. Elle est dans l'intervalle [0 ; 2] uniquement pour la surface mouillée à plein bord. La photographie 3 montre bien une rectification de la rive gauche du cours d'eau, afin de pouvoir dévier un bras de celui-ci pour alimenter un moulin. Ledit moulin ainsi que le bras d'eau ne sont plus utilisés aujourd'hui, mais les rectifications demeurent.

La Creuse à Clairavaux (IMG = 5,17) ne correspond au modèle pour aucune des variables, cependant celles-ci en restent très proches, puisque la surface mouillée à plein bord, la pente de la ligne d'eau, la profondeur maximale à plein bord ainsi que la profondeur des mouilles appartiennent à l'intervalle qui comprend 68% des valeurs de références, tandis que le rapport largeur/profondeur à plein bord, ainsi que la largeur à plein bord correspondent à l'intervalle qui comprend 95% des valeurs. Bien qu'elle ne soit pas proche des modèles, plusieurs indices nous ont montré qu'elle n'était pas complètement altérée. C'est ce qu'on peut par exemple voir sur la photographie 4, la rive gauche alimente le cours d'eau en sédiment de manière régulière. On peut aussi noter une érosion de berge en rive

droite, ainsi que des formes fluviales de plaine inondable, comme le bras secondaire dans le bord droit de la photographie.

La Vienne à Saint Setiers (IMG = 5,38) correspond au modèle pour le rapport largeur/profondeur à plein bord ainsi que pour la pente de la ligne d'eau. Il appartient à l'intervalle [0 ; 1] pour la profondeur maximale à plein bord, et à l'intervalle [0 ; 2] pour la largeur à plein bord, la surface mouillée à plein bord, ainsi que la profondeur des mouilles. Tout en restant dans les IMG de stations peu altérées au niveau de leur géométrie, on peut commencer à noter un éloignement au modèle à partir de cette station. On peut notamment remarquer sur la photographie 5 une absence de ripisylve, ainsi qu'un déboisement massif sur le coteau jouxtant la rive droite.

L'Indre à Briantes (IMG = 6,4) ne correspond au modèle pour aucune de ses variables, mais en est très proche (intervalle [0 ; 1]) pour la surface mouillée à plein bord. Pour toutes les autres variables, la station se situe dans l'intervalle [0 ; 2]. On peut voir sur la photographie 6 que le lit du cours d'eau est particulièrement creusé, car la hauteur à plein bord se situe au moins 70cm au-dessus du niveau de l'eau : cela peut signifier qu'il connaît des fortes montées des eaux à d'autres périodes de l'année, mais aussi que la pente est trop importante par rapport à la taille du cours d'eau. Cependant, on note aussi une érosion de berge encore active, ce qui laisse supposer que s'il y a une altération de la pente du cours d'eau, elle ne nuit pas outre mesure au bon état écologique du cours d'eau.

La Creuse à Fresselines (IMG = 7,09), de même que les deux autres stations, ne correspond au modèle de référence pour aucune de ses variables. Elle est dans l'intervalle [0 ; 1] pour la largeur à plein bord, la pente de la ligne d'eau, ainsi que la surface mouillée à plein bord. Pour le rapport largeur/profondeur à plein bord, la profondeur des mouilles, ainsi que la profondeur maximale à plein bord, elle se situe dans l'intervalle [0 ; 2]. La photographie 7 montre un pont avec des pieds très importants, qui nuit au bon transport des sédiments et du bois. De plus, cette station se situe en queue de barrage, et elle est complètement dépendante des lâchers d'eau qui ont lieu plusieurs kilomètres en amont. Entre le moment où nous sommes arrivés sur la station et le moment où nous en sommes partis, le niveau de l'eau avait augmenté d'au moins 1 mètre 50.



Figure 28 : diagrammes des IMG des stations prospectées dans le Massif Central Nord, dont les valeurs se situent entre 0 et 2 et correspondent à 95% du total des résidus des stations de référence pour cette HER, ce qui montre un écart au modèle moyen



Figure 29 : Photographie de la Petite Creuse à Fresselines (1), de l'Aurence à Aixe du Vienne (2), de l'Aixette à Aixe sur Vienne (3), de la Creuse à Clairavaux (4), de la Vienne à Saint Setier (5), de l'Indre à Briantes (6), et de la Creuse à Fresselines (7)

Ces dernières stations (Figure 30) ont des variables appartenant à l'intervalle [0 ; 3], voire au-delà pour certaines variables, ce qui signifie qu'elles commencent à s'éloigner de manière significative du modèle. Ici, seule la station Taurion à Gentioux Pigerolles est une station de référence.

La Glane à Oradour sur Glane (IMG = 5,5) est encore relativement proche du modèle de référence, avec notamment le rapport largeur/profondeur à plein bord, la profondeur des mouilles, la profondeur maximale à plein bord ainsi que la largeur à plein bord contenus dans l'intervalle [0 ; 1]. La surface mouillée à plein bord est dans l'intervalle [0 ; 2]. La pente de la ligne d'eau, quant à elle, est dans l'intervalle [0 ; 3], c'est-à-dire qui correspondent à 99% des valeurs des résidus des stations de référence. Sur la Figure 31, la photographie 1 illustre les formes fluviales que l'on peut trouver sur cette station. Il y a une île végétalisée, mais aussi des arbres qui ont complètement les pieds dans l'eau, témoins d'une forte érosion de berges.

L'Indre à Ardent (IMG= 7,93) est dans l'intervalle [0 ; 1] pour le rapport largeur/profondeur à plein bord, la largeur à plein bord, ainsi que la profondeur des mouilles. La profondeur maximale à plein bord ainsi que la surface mouillée à plein bord sont comprises dans l'intervalle [0 ; 2], alors que la pente de la ligne d'eau est dans l'intervalle [0 ; 3]. La photographie 2 nous montre un chenal localement en tresse, qui a plusieurs bras secondaires, où l'eau s'écoule parfois par intermittence. Ce chenal en tresse peut être le fruit d'une forte sédimentation, mais il a aussi été formé par d'anciens bras d'eau anthropiques qui servaient à alimenter le moulin, aujourd'hui en ruine.

A partir de Taurion à Gentioux Pigerolles (IMG = 8,38), on note une augmentation de l'IMG global, qui correspond à un éloignement de certaines des variables aux modèles de référence, qui est supérieure à l'intervalle qui comprend 99% des valeurs des résidus des stations de référence. En effet, si la profondeur des mouilles et le rapport largeur/profondeur sont dans l'intervalle [0 ; 1], que la surface mouillée à plein bord ainsi que la largeur à plein bord sont dans l'intervalle [0 ; 2], la pente de la ligne d'eau est supérieure à l'intervalle [0 ; 3], ce qui signifie qu'il ne correspond pas à au moins 99% des valeurs des résidus des stations de référence du Massif Central Nord. La photographie 3 révèle que le Taurion a une plaine inondable très vaste et très peu vallonnée. Lorsque les précipitations sont importantes, où que la neige fond en hauteur, ce cours d'eau emplit toute sa plaine inondable et ressemble alors presque à un marécage.

Les variables du rapport largeur/profondeur à plein bord ainsi que la profondeur maximale à plein bord de la Creuse à Glénic (IMG = 8,66) appartiennent à l'intervalle [0 ; 1]. La profondeur des mouilles, la largeur à plein bord et la surface mouillée à plein bord font partie de l'intervalle [0 ; 2]. La pente de la ligne d'eau est quant à elle au-delà de l'intervalle [0 ; 3]. La rivière a plusieurs petits barrages, comme celui que l'on peut voir sur la photographie 4, qui modifie de manière assez importante le lit du cours d'eau.

A la Vienne à Saint-Priest-Sous-Aixe (IMG = 9,72), la profondeur maximale à plein bord correspond presque au modèle de référence et la profondeur des mouilles lui correspond. Le rapport largeur/profondeur à plein bord, ainsi que la pente de la ligne d'eau sont dans l'intervalle [0 ; 2]. La surface mouillée à plein bord quant à elle est dans l'intervalle [0 ; 3]. La largeur à plein bord dépasse l'intervalle [0 ; 3]. De même que sur la Creuse à Glénic, la Vienne est parcourue de grands barrages espacés régulièrement, comme on peut le voir sur la photographie 5, qui sont des pièges à sédiments et à matériaux ligneux, mais aussi des pièges pour la faune, notamment piscicole, de ces cours d'eau.

Enfin, à Briance à Condat-sur-Vienne (IMG = 9,87), la profondeur des mouilles, le rapport largeur/profondeur à plein bord ainsi que la pente de la ligne d'eau correspondent à l'intervalle [0 ; 1]. La largeur à plein bord ainsi que la profondeur maximale à plein bord sont dans l'intervalle [0 ; 3]. La surface mouillée à plein bord va, elle, au-delà de l'intervalle [0 ; 3]. On peut en effet constater sur la photographie 6 que le cours d'eau s'est creusé et que l'eau s'écoule bien en dessous de la largeur maximale à plein bord. La végétalisation des berges montre quant à elle que le cours d'eau n'a pas eu de crue importante depuis plusieurs années. La bassesse de la ligne d'eau pourrait s'expliquer par la présence de plusieurs ponts mais surtout par un barrage en amont, qui régule la montée des eaux et empêche les crues importantes d'avoir lieu.

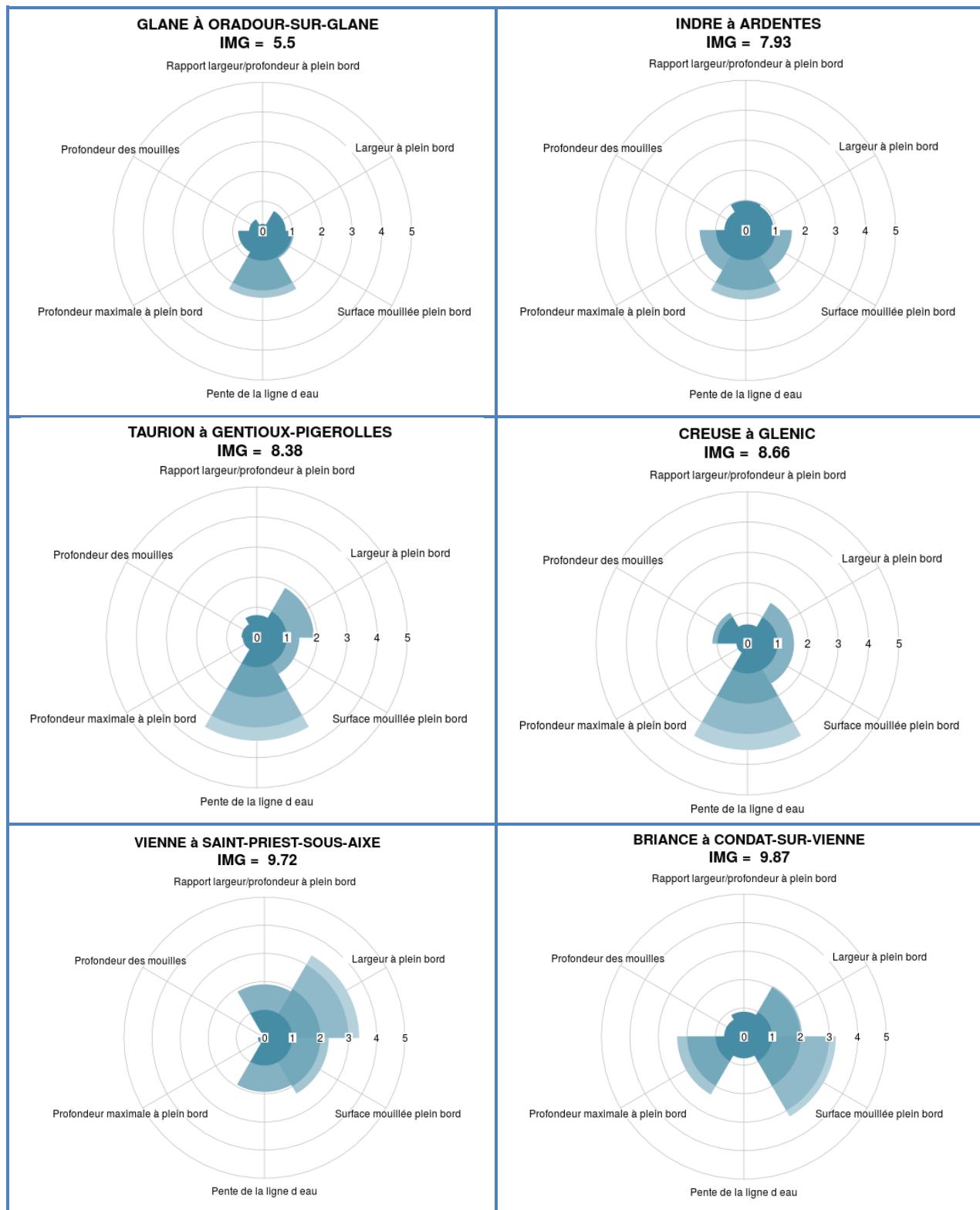


Figure 30 : diagrammes des IMG des stations prospectées dans le Massif Central Nord, dont les valeurs se situent entre 0 et 3 et correspondent à 98% du total des résidus des stations de référence pour cette HER, ce qui montre un écart au modèle assez fort



Figure 31 : Photographies de la Glane à Ouradour (1), de l'Indre à Ardentes (2), du Taurion à Gentioux Pigerolles (3), de la Creuse à Glénic (4), de la Vienne à Saint Priest (5) et de la Briance à Condat sur Vienne (6)

Scores MQI et analyses

La Figure 32 montre la répartition des scores MQI des 15 stations étudiées. Rappelons que Rinaldi classe les stations étudiées comme suit (Rinaldi *et al.*, 2014) : de 0 à 0,3, la qualité est très mauvaise, de 0,3 à 0,5 elle est mauvaise, de 0,5 à 0,7, elle est moyenne, de 0,7 à 0,85 elle est bonne et de 0,85 à 1 elle est très bonne. On peut voir qu'il y a deux stations dont le MQI est à 0,35 environ, une station qui est autour de 0,4, deux stations à 0,55, une à 0,7, six stations à 0,85 et une station à 0,9. La plus grande partie des stations sont donc au moins moyennes, voire, pour une majorité, très bonnes, ce qui correspond aux observations faites sur l'IMG des stations dans cette HER.

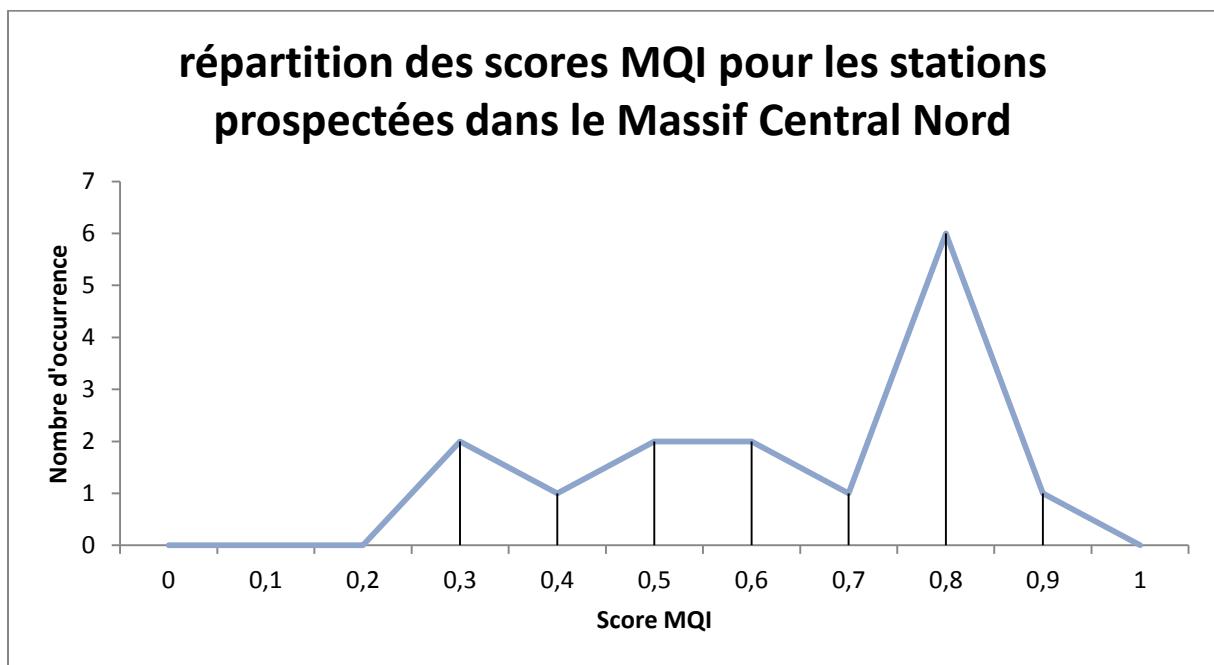


Figure 32 : répartition des occurrences des scores MQI pour les stations prospectées du Massif Central Nord

La Figure 33 montre une répartition des MQI de ces stations entre 0,35 et 0,95, avec trois blocs distincts. Le premier est composé de trois stations dont le MQI est compris entre 0,35 et 0,45 environ. Selon Rinaldi (2014), elles correspondent à des stations de mauvaise qualité. Le second compte 5 stations dont le MQI varie entre 0,5 et 0,75 environ, c'est-à-dire des stations de qualité moyenne. Enfin, un troisième groupe compte 7 stations avec un MQI compris entre 0,8 et 0,95, c'est-à-dire de qualité est bonne voire très bonne. Les IMG de ces stations se répartissent entre 2,09 et 9,87. Les stations avec les IMG les plus élevés correspondent plutôt aux stations dont le score MQI est considéré comme moyen à très mauvais. Les stations qui ont l'IMG le plus bas sont à l'inverse, celles qui ont le MQI le plus haut, c'est-à-dire avec la meilleure qualité hydromorphologique. On peut donc émettre l'hypothèse, pour ces 15 stations et par rapport aux modèles de référence du Massif Central Nord, que l'IMG et le MQI ont des résultats 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) de la Figure 32 n'est que de 0,207. On peut supposer que cette faible

corrélation est due au fait que l'IMG se concentre uniquement sur des éléments de géométrie du lit alors qu'à *contrario*, le MQI est plus général. De plus, il faut rappeler que le MQI est plus qualitatif et repose sur un jugement d'expert, alors que l'IMG est très quantitatif et s'appuie uniquement sur des mesures plus précises.

Nuage de point des stations de terrain dans le Massif Central Nord

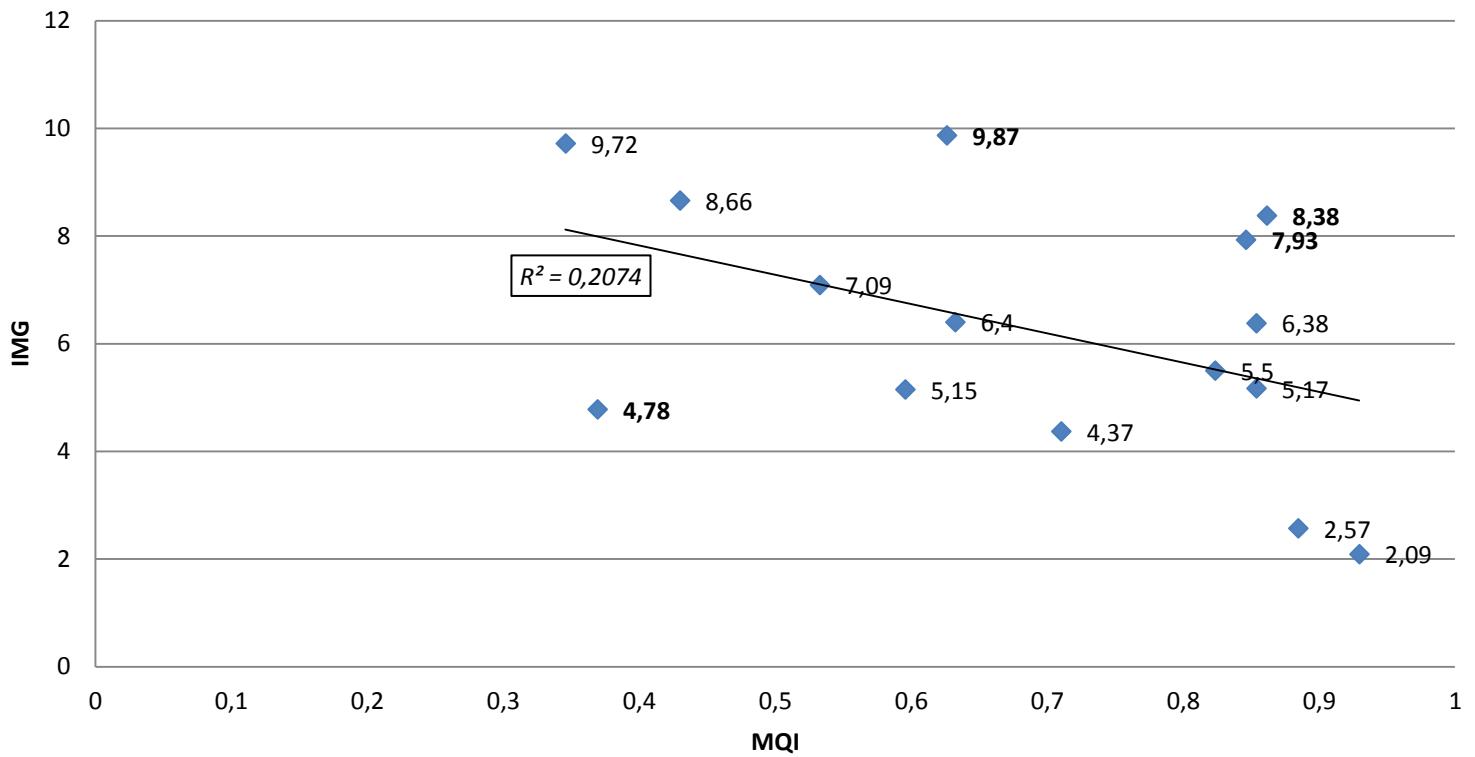


Figure 33 : Nuage de point de la répartition des scores MQI et IMG des stations prospectées dans le Massif Central Nord

La Figure 34 va dans le sens de l'hypothèse précédente. Elle représente la répartition des stations prospectées, par rapport aux différentes classes de MQI. Nous n'avons pas différencié les stations de référence et les stations altérées, car le nombre de stations de chaque classe n'était pas suffisant pour une étude statistique représentative des deux catégories. Il n'y a aucune station pauvre, c'est pour cela qu'il n'y a pas de boîte à moustache pour cette classe. Si l'on se concentre sur la médiane de chaque classe, on peut voir qu'elle décroît nettement entre la boîte à moustache des stations dites de mauvaise qualité et les stations de très bonne qualité. De même, la classe des stations considérées comme de très bonne qualité tire plus vers le bas que les autres, ce qui signifie que dans cette classe, les IMG sont en moyenne plus bas que dans les autres classes. A l'inverse, la classe des stations considérées comme de mauvaise qualité tire vers le haut. Bien que le faible nombre de points rende la validité statistique de ce graphique discutable, cela nous conforte dans l'idée qu'il y a une concordance entre les deux méthodes, au moins dans leurs résultats puisque

des stations de mauvaise qualité d'après le MQI ont des IMG plus fort que les stations considérées comme de très bonne qualité.

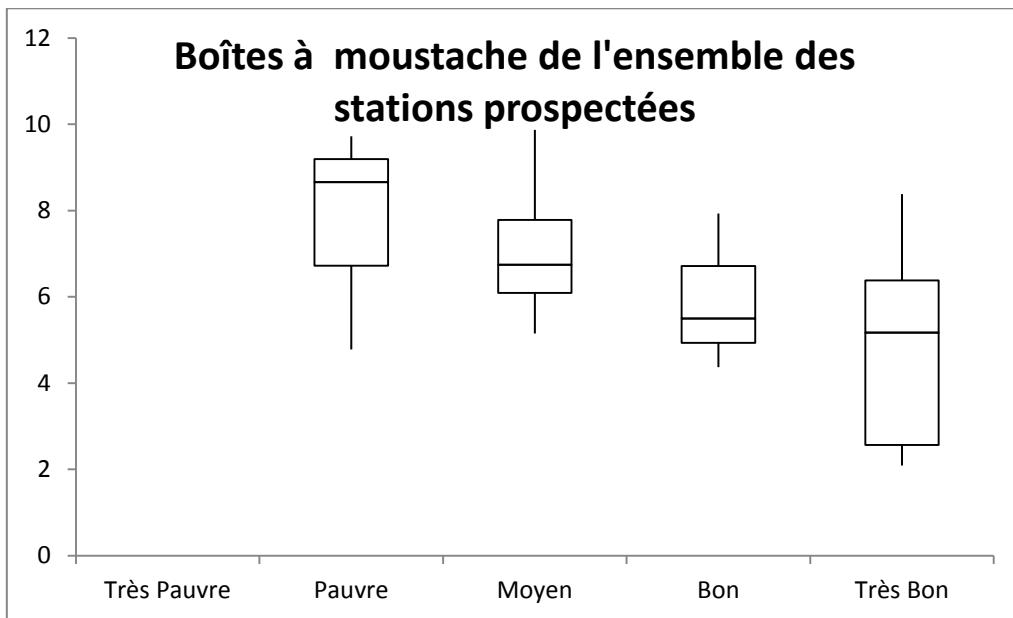


Figure 34: Boîtes à moustaches de l'ensemble stations prospectées dans le Massif Central Nord

Le Tableau 15 détaille le calcul du score MQI pour chacune des quinze stations. Les stations sont triées par ordre croissant, de gauche à droite, en fonction de leur score MQI. Les cases vertes correspondent à une altération nulle pour la catégorie concernée, les cases jaunes à une altération moyenne, les cases rouges claires à une altération forte, et les cases rouges foncées (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 n'apparaissent pas dans le tableau car nous n'avons pas pu les évaluer sur le terrain. En effet, la période à laquelle nous sommes allés sur le terrain ne correspondait pas à l'étiage, il nous était donc impossible d'observer la structure du fond du lit ainsi que son colmatage (A10). Pour les enlèvements de bois et de sédiments (F10), nous n'avions pas d'information qui aurait pu nous aider à évaluer une possible altération de cet élément hydromorphologique.

On peut logiquement noter que, plus les différents paramètres d'une station pris en compte sont altérés, plus le score MQI est bas et l'IMG est élevé, et, à l'inverse, moins il y a d'éléments altérés sur la station plus le score MQI est haut et l'IMG est bas. Cependant, les stations de l'Aurence, de la Briantes, de l'Indre à Ardentès et du Taurion ne correspondent pas à cette tendance. C'est quatre stations s'écartent en effet de la droite de régression dans la Figure 33. Nous avons mis en gras les IMG des points de ces dernières sur le graphique. Elles s'éloignent de la droite car leur IMG et leur MQI sont plus différents l'un par rapport à l'autre que le reste du nuage. En effet, l'Aurence appartient à la classe des stations de qualité mauvaise, alors que son IMG est relativement bas (4,78). La Briance quant à elle

appartient à la classe MQI de qualité moyenne alors que sont IMG est plutôt haut (9,87). L'Indre à Ardent fait partie des stations de très bonne qualité, mais son IMG est à 7,93, ce qui est aussi assez important. C'est la même chose pour le Taurion, qui est dans la classe des stations de très bonne qualité, avec un IMG de 8,38.

Pour l'Aurence à Aixe sur Vienne, l'écart entre MQI (0,37) et IMG (4,78) peut apparaître surprenant. Cela dit, cet écart peut s'expliquer par la différence de taille des stations évaluées pour le calcul de ces deux indices ($15 \times L_{Qb}$ pour Carhyce et $50 \times L_{Qb}$ pour MQI) (Figure 35). Cette station se situe en effet en pleine ville et compte de nombreux aménagements (seuils de moulin, ponts, protections de berge) dans le tronçon MQI mais aucun dans le tronçon Carhyce. Le MQI est donc particulièrement mauvais bien que, selon les modèles Carhyce, la géométrie soit conforme aux modèles régionaux. Ceci indiquerait que les aménagements, présents à l'amont de la station Carhyce, n'auraient pas sensiblement modifiés la géométrie de la rivière.

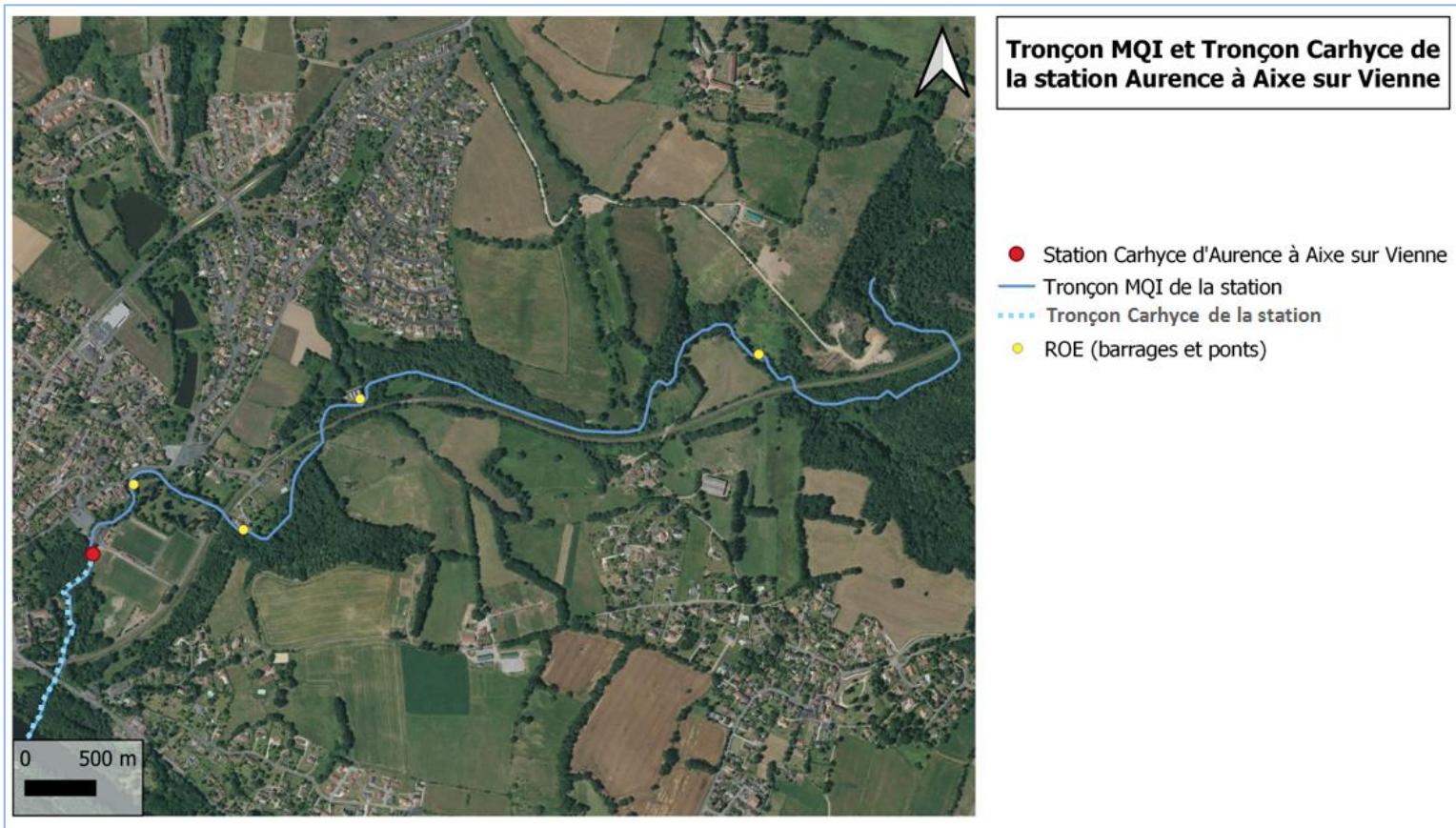


Figure 35 : Etude du tronçon Carhyce par rapport au tronçon du MQI et des la répartition des ROE sur ces tronçons

La Briance 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 15, sans toutefois obtenir de score très important comme l'Aurence. Pour l'IMG à l'inverse, son score est élevé (9,87). Si on regarde en détail l'indice sur la Figure 30, on remarque que sa surface mouillée à plein bord s'éloigne du

modèle de référence. Sa profondeur maximale à plein bord ainsi que sa largeur à plein bord appartiennent à l'intervalle [0 ; 3], ce qui bien qu'il corresponde à 99% des valeurs de référence, montre tout de même une certaine altération. Ici, 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 en compte cet élément comme témoin d'une possible altération.

L'Indre à Ardentès 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. 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 plein bord. 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.

Enfin, le Taurion est, selon le MQI, considérée comme une station 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. Ceci s'explique peut-être par la présence d'une route juste à l'aval de la station. Pour la franchir, la rivière doit passer sus un petit pont, qui peut éventuellement perturber la pente. Cela dit, à cet endroit, le Taurion est une toute petite rivière de tête de bassin qui s'écoule sur le plateau peu pentu de Millevaches. La pente peut ici y être naturellement plus faible que régionalement. Ce qu'indique l'IMG comme l'altération, pourrait, dans ce cas, n'être qu'une variabilité naturelle au sein de l'HER du Massif Central Nord.

Si l'on regarde plus en détail l'ensemble des stations, on peut aussi voir, par exemple, que les catégories allant de F11 à F13, qui correspondent à différents descripteurs de la ripisylve, connaissent rarement une absence d'altération. Il faudrait pouvoir tester le MQI dans d'autres HER pour voir s'il s'agit d'une particularité du Massif Central Nord ou si c'est un problème récurrent, indifféremment de la région où l'on se trouve. La même chose s'observe sur les catégories A11 et A12, qui concernent cette fois ci la coupe totale ou sélective ainsi que l'entretien anthropique des ripisylves. Les lois sur les cours d'eau et leur environnement étant les mêmes partout en France, le MQI permet de montrer que les coupes répétées et l'entretien des ripisylves contribuent, au moins en partie, à l'altération du fonctionnement des cours d'eau, ou au moins de leur hydromorphologie. On peut alors supposer une corrélation entre ces cinq catégories. Cependant, les scores maximaux de ces dernières ne sont pas les plus élevés (entre 3 et 5 points par catégorie, contre 9 ou 18 pour les plus forts maximums), ce qui signifie aussi que ce ne sont peut-être pas les altérations de ces éléments là qui sont les plus nocives pour le bon état écologique des cours d'eau, d'après les auteurs.

	Vienne à Saint Priest sous Aixe	Aurence à Aixe sur Vienne	Creuse à Glénic	Creuse à Fresselines	Aixette à Aixe sur Vienne	Briance à Condat sur Vienne	Indre à Briantes	Petite Creuse à Fresselines	Glane à Ouradour sur Glane	Indre à Ardentès	Creuse à Clairavaux	Vienne à Saint setiers	Taurion à Gentioix 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	0
F3	5		5	3		5		3	0						
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	0	
F8		3			3	2			2	3 0	2	0	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	0	2	3	0	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	6	3	0	0	0	0
A7		3			0		0		0	0	3	0	0	0	0
A8	2			0		0			2	0	0	2	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	2	2	0
A12	5	2	2	2	2	2	2	2	2	0	2	2	2	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
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 15 : Tableau résumé des calculs du score MQI pour les quinze stations du Massif Central Nord

Résultats de la systématisation du MQI

Calcul du MQI global

Le MQI global est calculé avec les catégories F1, F6, F7, F9, F10, F12, F13, A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8, A10 et A12 sur les un peu plus de 1 100 stations Carhyce pour lesquelles nous disposions de données de l'IPR+. Les catégories manquantes n'ont pu être calculées, faute de données correspondantes. Nous avons décidé de ne pas prendre de données issues de la base Carhyce autres que des données non traitées sur la ripisylve (épaisseur et continuité), ainsi que sur le nombre de protection de berges sur chaque station, afin de ne pas fausser les résultats en travaillant sur des bases trop similaires.

La Figure 36 est un nuage des points des stations Carhyce par rapport à leur IMG (ordonnée) et leur score MQI (abscisse). Les stations non altérées, c'est-à-dire les stations considérées dans Carhyce comme de référence, sont plutôt comprises entre 0,7 et 0,9, alors que les stations altérées sont comprises entre 0,45 et 0,9. Les populations sont donc relativement différentes et les stations non altérées sont considérées par le MQI comme étant de meilleure qualité. Ceci est logique car il convient de rappeler que le classement entre référence et altérées dans Carhyce, a été fait à partir de certaines des données IPR+. Le MQI est toutefois plus complet car il considère l'annuaire de pression de l'IPR+ de façon beaucoup plus exhaustive. Cela dit, la Figure 36 montre que les stations altérées ont des IMG un peu plus élevés que les stations non altérées, et ces dernières font parties des IMG les plus bas, même s'il n'y a pas, là encore, de tendance très marquée.

On note cependant qu'il n'y a pas de tendance statistique évidente. Les coefficients de détermination des droites de corrélation ne sont pas représentés ici car ils sont inférieurs à 0,01, et ne sont donc révélateur d'aucune corrélation. L'absence de celle-ci pourrait être attribuée au fait que le MQI et l'IMG ne montre exactement pas les mêmes choses. En effet, l'IMG est uniquement basé sur des éléments de géométrie du lit, tandis que le MQI, dans son ensemble, se composent de plusieurs autres thèmes, comme le transport sédimentaire (F1, A1, A2, A3, A4, A5), la morphologie du lit (F8, V1, V2), l'artificialisation (A6, A7), ou encore les aménagements anthropiques (A11).

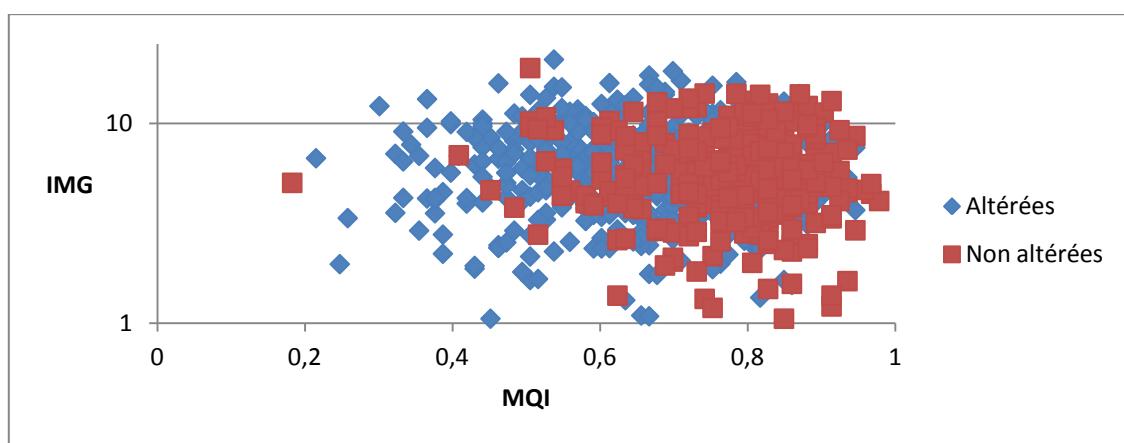


Figure 36 : Nuage de points du MQI par rapport à l'IMG des stations Carhyce altérées et non altérées

La courbe de la Figure 37 représente l'ensemble des scores MQI et leur répartition. Pour les stations altérées, il y n'a aucune station dont le MQI est compris entre 0 et 0,2, trois stations entre 0,2 et 0,3, 22 stations entre 0,3 et 0,4, 45 stations entre 0,4 et 0,5, 96 stations entre 0,5 et 0,6, 160 stations entre 0,6 et 0,7, 122 stations entre 0,7 et 0,8, 83 stations entre 0,8 et 0,9, 9 stations entre 0,9 et 1 et aucune station égale à 1. Pour les stations non altérées, il y a une station dont le MQI est entre 0,1 et 0,2, aucune station à entre 0,2 et 0,4, 3 stations entre 0,4 et 0,5, 17 stations entre 0,5 et 0,6, 43 stations entre 0,6 et 0,7, 100 stations entre 0,7 et 0,8, 125 stations entre 0,8 et 0,9, 26 stations entre 0,9 et 1 aucune station égale à 1.

On voit un peu plus nettement que sur la Figure 36 la coupure entre les stations altérées et non altérées. En effet le pic d'occurrence des stations altérées se situe à 0,6, alors que celui des stations non altérées est à 0,8. De même, la courbe des stations altérées est légèrement décalée vers la gauche, ce qui signifie que les stations altérées ont, en général, un MQI plus faible que les stations non altérées. Cependant, le recouvrement des courbes reste très important.

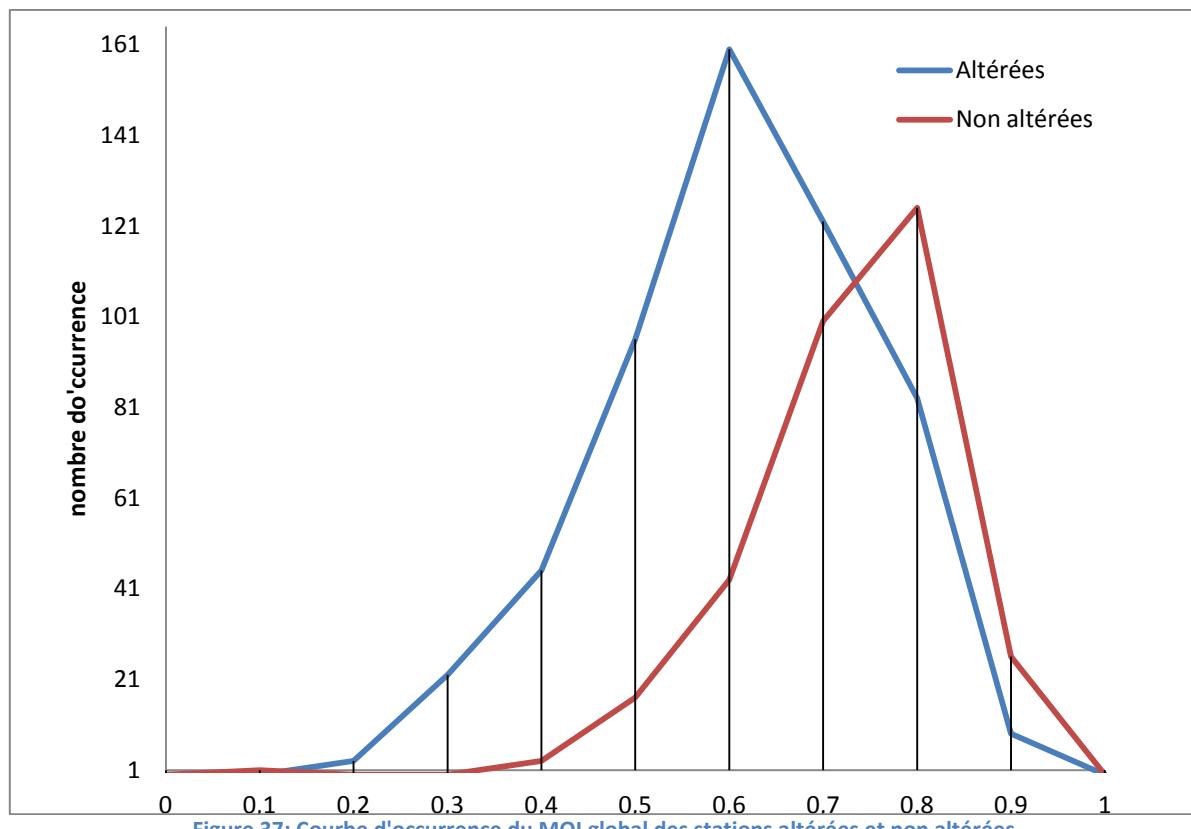


Figure 37: Courbe d'occurrence du MQI global des stations altérées et non altérées

Nous avons ensuite représenté ces données sous la forme de boîtes à moustache (Figure 38), en différenciant les stations altérées des stations non altérées, pour chacune des classes de qualité du MQI, à savoir « très pauvre », « pauvre », « moyen », « bon », « très bon ». Les premiers et derniers déciles, les premiers et troisièmes quartiles, ainsi que la médiane sont calculés par rapport à l'IMG des stations. Il n'y a pas de boîte à moustache qui

représente la classe « très pauvre » dans les stations non altérées car il n'y a qu'une seule station. De même pour la classe « pauvre » des stations non altérées, et « très pauvres » des stations altérées, il n'y a que trois stations, l'écart que cette figure montre entre sa médiane et ses quartiles est donc très relatif.

Pour les stations altérées (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 le MQI, plus son IMG est bas, indiquant ainsi un lien direct inversement proportionnel entre le MQI et l'IMG. Autrement dit, bien que les types d'altération hydromorphologique étudiés par chacune des méthodes ne soient pas complètement identiques, les résultats semblent se rejoindre. L'écart entre les extrêmes, quant à lui, est un peu plus resserré pour les stations de qualité très bonne, et un peu plus large pour les stations de qualité très pauvre, pauvre et moyenne. Cependant, les IMG les plus bas, c'est-à-dire les stations qui ont une géométrie de lit très peu altérée par rapport à leurs modèles régionaux, se situent plutôt dans les stations dont la qualité est moyenne à bonne. Pourtant, ces classes comptent également des IMG assez élevés. Dès lors, on peut noter que s'il y a une certaine tendance décroissante de la médiane, les résultats globaux restent mitigés, c'est ce que montrait déjà le coefficient de détermination inférieur à 0,01.

Pour les stations non altérées (en vert), la courbe de 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 de l'IPR pour systématiser le MQI. Les stations de référence Carhyce sont déjà définies à partir des données 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. On peut donc supposer que c'est en partie à cause de cela que les boîtes à moustache des différentes classes sont semblables.

Si l'on ne différencie plus les stations de référence et les stations altérées (Figure 39) la corrélation entre le MQI et l'IMG est encore plus marquée et le lien entre MQI et IMG, malgré les recouvrements, est évident. La médiane forme une courbe décroissante des stations de qualité très pauvre vers les stations de qualité très bonne, ce qui signifie que les IMG sont plus bas pour les stations de très bonne qualité par rapport aux stations de très pauvre qualité. De même, la dispersion est moins importante pour les stations de bonne à très bonne qualité, et tous les IMG sont en dessous de 10. A l'inverse, les moustaches sont plus étendues pour les stations de très mauvaise à moyenne qualité, et les IMG vont jusqu'à 15, alors que les IMG maximums ne descendent pas en dessous de 5.

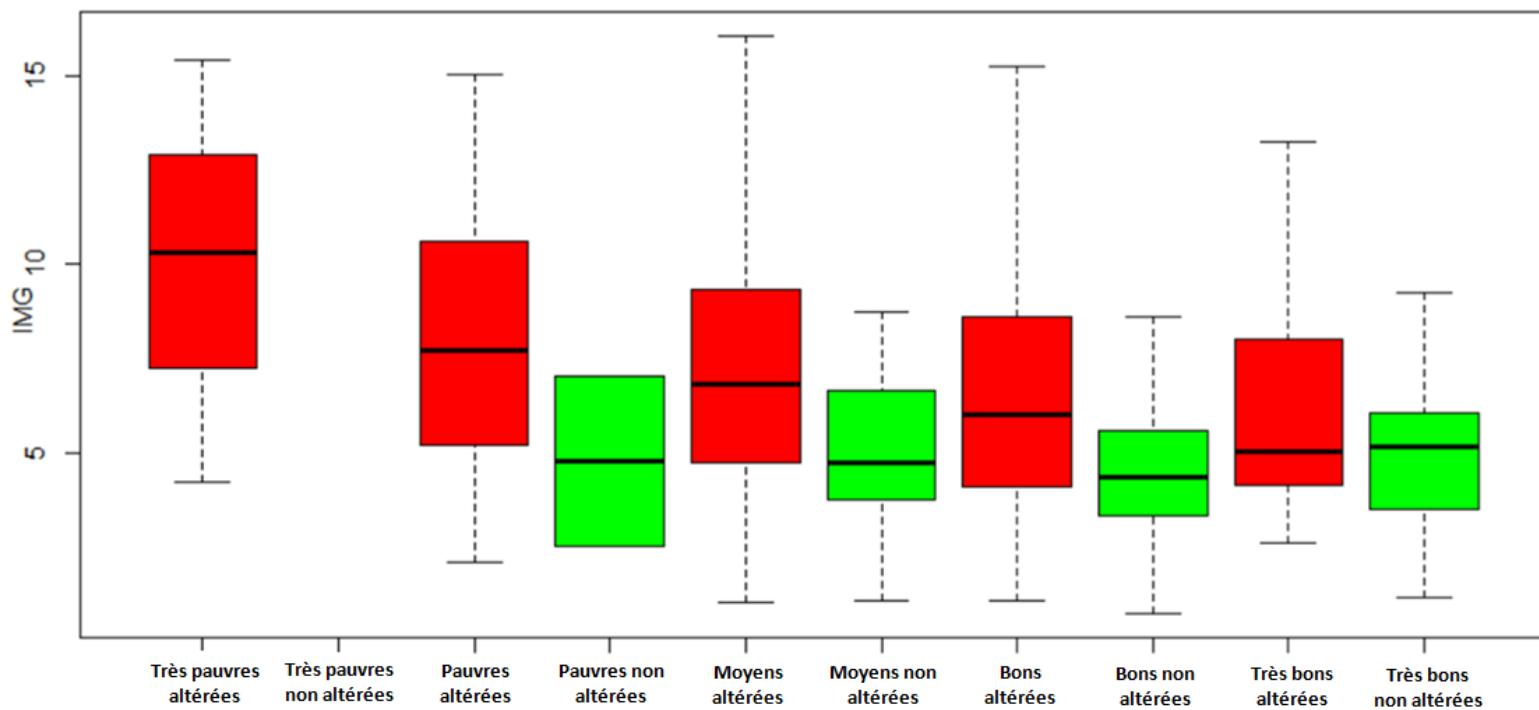


Figure 38 : Boîte à moustache des stations altérées et non altérées pour un MQI global

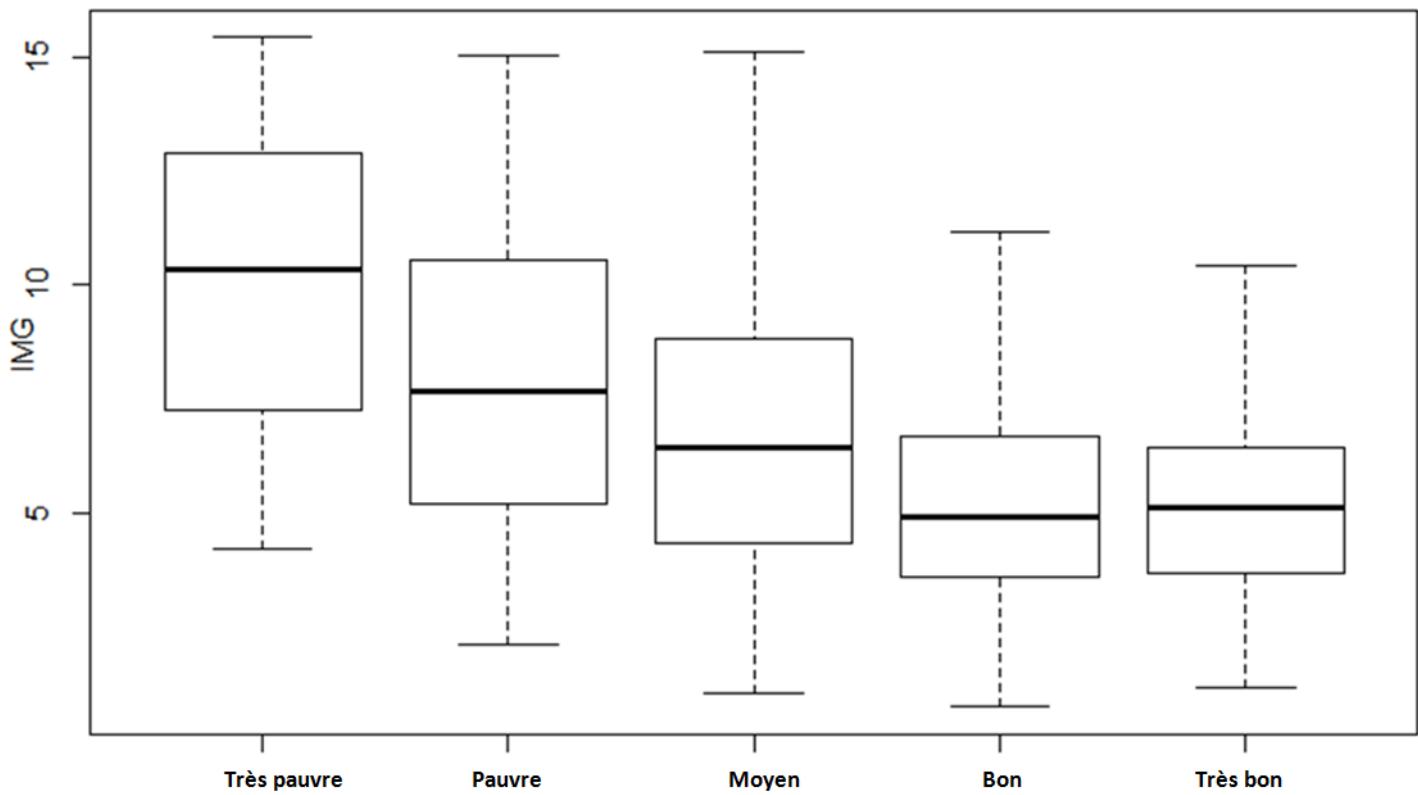


Figure 39 : Boîtes à moustache des stations de la France pour un MQI global sans différenciation des stations de référence et des stations altérées

Nous avons ensuite refait ces boîtes à moustache pour chaque HER étudiée (Figure 40). Dans certains cas, il y a trop peu de stations pour pouvoir faire une étude statistique convenable. Nous estimons que les HER ayant moins de 15 stations, c'est-à-dire moins que l'étude que nous avons faite sur les stations prospectées à pied dans le Massif Central Nord, ne sont pas assez représentatives (Tableau 16). Les résultats restent peu parlants, mais dans l'ensemble on peut constater qu'il y a une nette différence entre les stations altérées et non altérées. Les stations altérées ont généralement des IMG élevés et une dispersion plus grande entre leur minimum et leur maximum. L'HER 21 est différent des résultats que nous avons eu pour les stations prospectées à pied dans cette hydro éco région. Si la médiane des stations altérées (Figure 40) est semblable à celle de la Figure 34, les boîtes sont cependant beaucoup plus étendues d'un extrême à l'autre. Bien que les stations non altérées semblent avoir un IMG semblable, voire supérieur pour les stations de très bonne qualité, il faut tout de même noter qu'il s'agit de l'HER avec les IMG les plus bas en général. Il est donc difficile d'observer une quelconque tendance entre stations altérées et non altérées.

HER code	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	13	14	16	18	19	21	22
Nb stations	38	29	94	24	63	46	27	36	153	73	111	13	72	14	9	5	88	9

Tableau 16 : Tableau récapitulatif du nombre de stations Carhyce par HER et des HER contenant trop peu de stations pour une étude statistique représentative

D'une manière générale, sur l'ensemble de la France (Figure 38), mais aussi au sein de plusieurs HER (Figure 40) il semble y avoir une légère corrélation entre les stations altérées qui donnerait un sens au lien que nous avons fait entre le score MQI global et l'IMG des stations, qui n'apparaît pas ou très peu pour les stations non altérées, mais qui est plus flagrant lorsqu'on ne différencie plus ces deux catégories. C'est pour essayer de voir si la tendance pourrait être plus forte, que nous avons décidé de recalculer un second MQI qui se baserait uniquement sur les paramètres du MQI qui décrivent plus ou moins directement la géométrie du lit des cours d'eau et sa possible altération. Nous avons émis l'hypothèse que la fragilité du lien entre le MQI et l'IMG pourrait venir d'une trop grande différence par rapport aux éléments observés afin de définir la possible altération d'un cours d'eau. En effet, l'IMG se base uniquement sur les paramètres de géométrie du lit d'un cours d'eau, des seuils et des mouilles ainsi que de la pente, alors que le MQI prend d'autres paramètres en compte, comme l'artificialisation des cours d'eau par exemple, qui contribue pour une part très importante au score. Puisque le MQI est une somme de différentes catégories, il est possible de ne pas sommer l'intégralité des dites catégories proposées par Rinaldi (2014), comme nous l'avons déjà fait pour notre premier calcul d'automatisation, par manque de données.

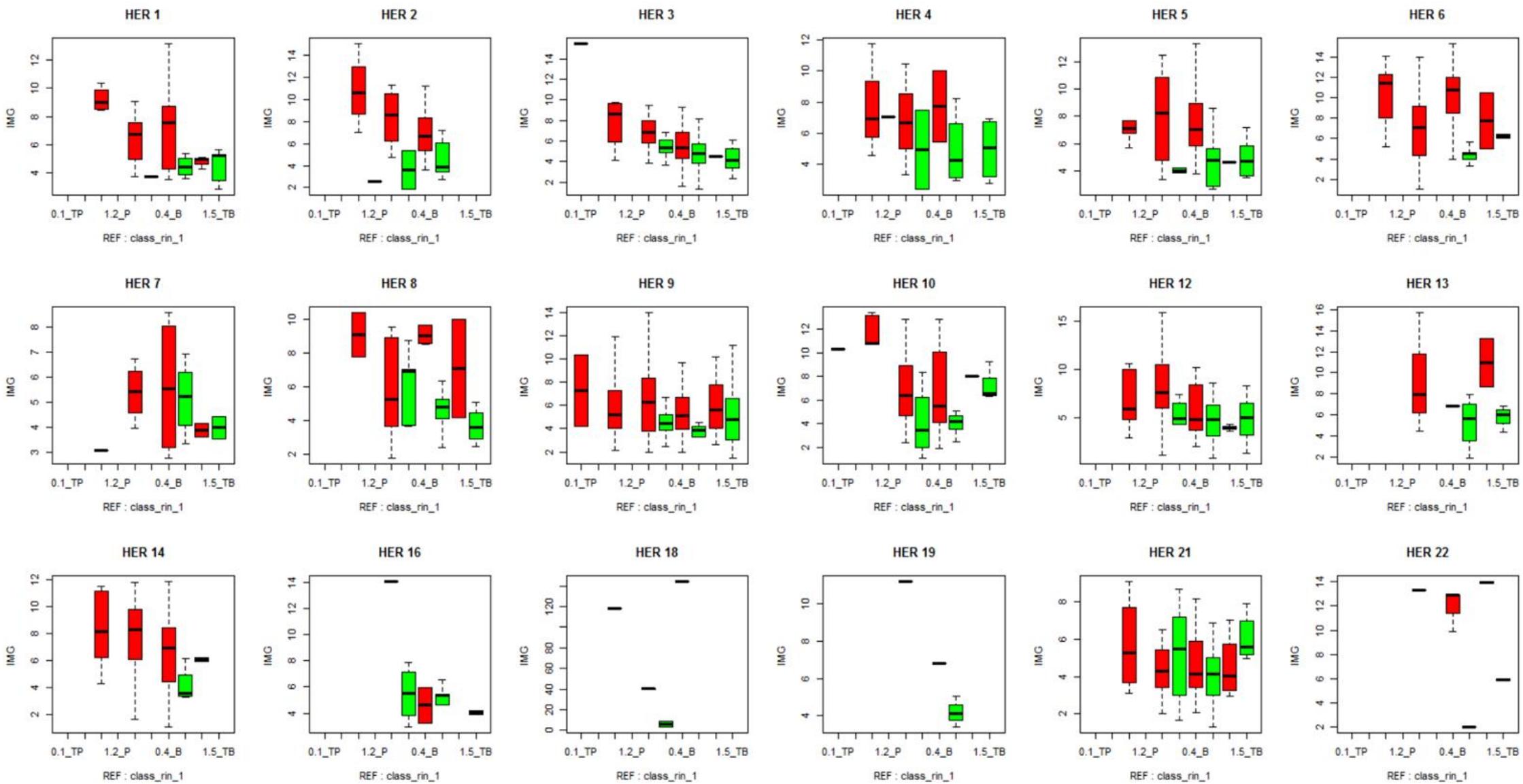


Figure 40 : Boîte à moustache par HER des stations altérées et non altérées pour un MQI global

Calcul du MQI avec des éléments de géométrie du lit uniquement

Nous avons donc choisi de refaire une étude MQI des stations Carhyce en se basant cette fois uniquement sur les catégories qui seraient les plus impactantes pour la géométrie du lit des cours d'eau. Pour cela nous avons sélectionné les catégories suivantes : F7, F9, A4, A5, A6, A8, et A10.

La Figure 41 fonctionne sur le même principe que pour le MQI global. Les IMG sont représentés en ordonnées, et les scores MQI en abscisse, comme l'indique le graphique. On constate que les résultats MQI sont moins différenciés, car il y a moins de catégories prises en compte.

Les stations non altérées sont ici beaucoup plus rapprochées vers la droite, c'est-à-dire vers un MQI proche ou égal à 1, qui correspond à des stations de qualité très bonne. Elles sont donc, ici aussi, considérées par le MQI comme de meilleure qualité. Elles sont réparties majoritairement entre 0,65 et 1. Les stations non altérées ont toutes, ou presque, un IMG inférieur à 10. On peut cependant remarquer qu'entre 0,8 et 1, si le MQI classe les stations dans la catégorie de très bonne qualité, l'étendue des scores IMG est encore très dispersée, entre 1 et 10.

Les stations altérées sont beaucoup plus éparpillées sur l'ensemble du graphique, en majorité entre 0,4 et 1, mais il y a un certain nombre de stations qui restent en dessous de 0,4. Les stations ont généralement un IMG plus élevé que les stations non altérées : il n'y a que deux stations qui sont proches de 1.

On peut donc constater qu'il y a toujours une nette différenciation entre les stations altérées et non altérées, elle semble même plus marquée que pour le MQI global. Toutefois, coefficient de détermination sont toujours inférieures à 0,01, ce qui montre qu'il n'y a toujours pas de corrélation forte entre l'IMG et le MQI, même s'il est calculé uniquement selon la géométrie du lit.

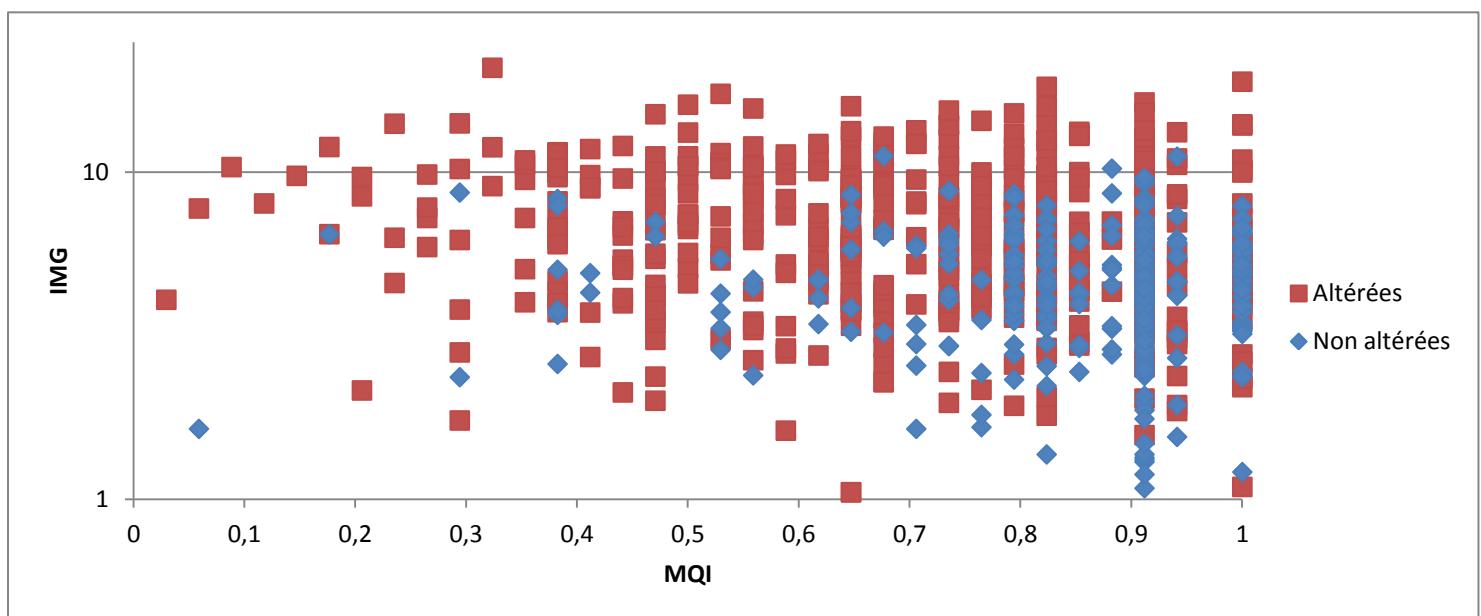


Figure 41 : Nuage de points du MQI selon la géométrie du lit des cours d'eau par rapport à l'IMG des stations non altérées et altérées

La courbe de la Figure 42 représente l'ensemble des scores MQI selon la géométrie du lit des cours d'eau et leur répartition. Pour les stations non altérées, il y a une station dont le MQI est compris entre 0 et 0,1, une station entre 0,1 et 0,2, 2 stations entre 0,2 et 0,3, 7 stations entre 0,3 et 0,4, 4 stations entre 0,4 et 0,5, 8 stations entre 0,5 et 0,6, 14 stations entre 0,6 et 0,7, 52 stations entre 0,7 et 0,8, 50 stations entre 0,8 et 0,9, 157 stations entre 0,9 et 1 et aucune station égale à 1. Pour les stations altérées, il y a trois stations dont le MQI est compris entre 0 et 0,1, quatre stations entre 0,1 et 0,2, 16 stations entre 0,2 et 0,3, 24 stations entre 0,3 et 0,4, 40 stations entre 0,4 et 0,5, 43 stations entre 0,5 et 0,6, 86 stations entre 0,6 et 0,7, 103 stations entre 0,7 et 0,8, 75 stations entre 0,8 et 0,9, 113 stations entre 0,9 et 1 et aucune station égale à 1.

Ici, on peut noter une plus grande disparité entre les stations altérées et non altérées, notamment due au recouvrement plus large des scores MQI des stations altérées par rapport aux non altérées. En effet, il commence à y avoir un nombre de stations non altérées assez conséquent pour être représentatif à partir de 0,7, c'est-à-dire à partir des stations de bonne qualité, pour un pic entre 0,8 et 0,9, soit des stations de très bonne qualité. A l'inverse, les stations altérées sont en nombre important à partir de 0,4 et se répartissent de 0,4 à 0,9 progressivement. Il n'y a pas de pic aussi flagrant que pour les stations non altérées, mais un intervalle conséquent entre 0,6 et 0,8. Les stations altérées sont donc majoritairement de qualités moyennes à bonnes.

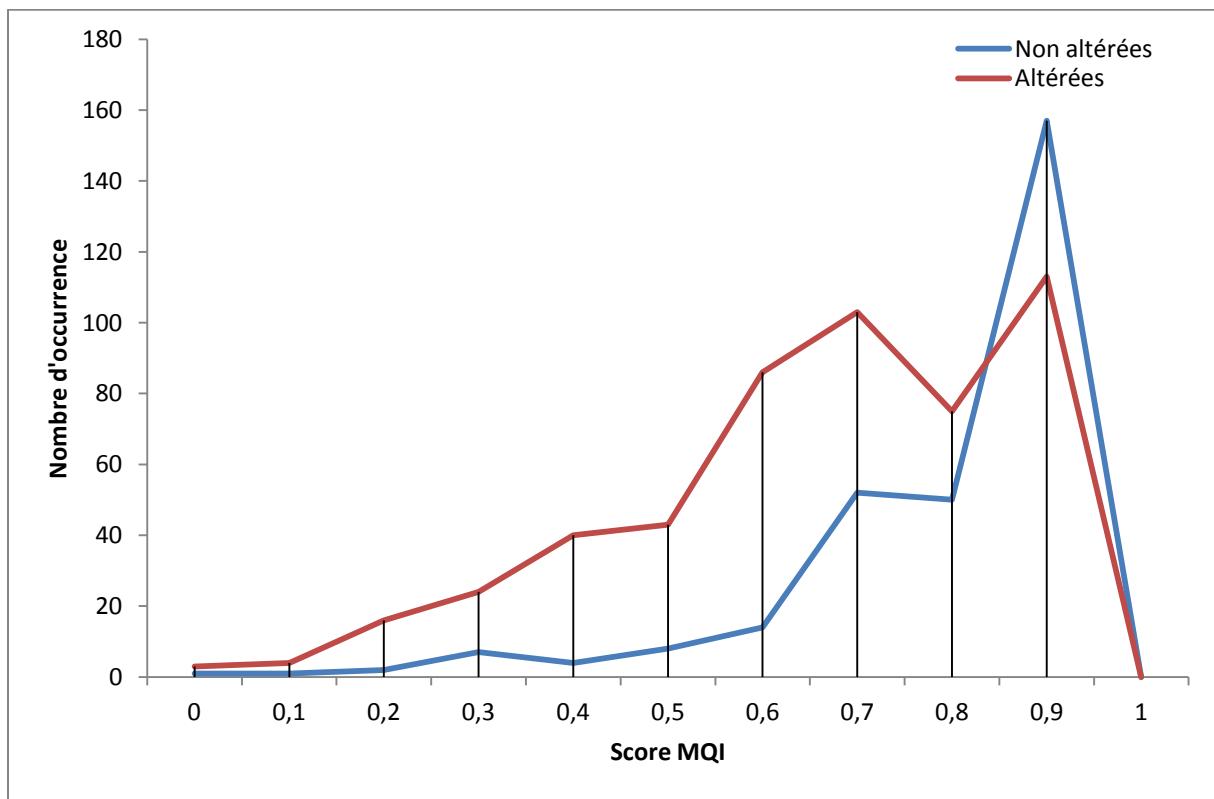


Figure 42 : Courbe d'occurrence du MQI selon la géométrie du lit des cours d'eau des stations altérées et non altérées

De même que pour le MQI global, nous avons étudié nos données grâce à des boîtes à moustache (Figure 43), toujours en différenciant les stations altérées des stations non altérées pour chacune des classes de qualité du MQI. Pour les stations non altérées (en vert), il y a que quatre stations dans la classe de qualité « très pauvre », le graphique correspondant obtenu est donc faussé par le manque de données.

Pour les stations altérées (en rouge) on note une courbe moins marquée que pour le MQI global, c'est-à-dire que les stations considérées comme très bonnes par le MQI, sont relativement semblables aux autres catégories. Cependant, on peut noter un léger resserrement vers le bas des stations considérées comme de bonne à très bonne qualité. La différence reste toute relative. Hormis la classe des stations considérées comme très pauvres qui a une médiane légèrement plus haute, et la classe des stations considérées comme moyennes qui a des extrêmes maximums et minimums, les autres boîtes sont relativement similaires. Dès lors, on peut noter que le rapport entre le MQI et l'IMG est bien moins flagrant que pour le MQI global

Pour les stations non altérées, la médiane en général est peu parlante. Les extrêmes maximums ne sont pas très parlants, mais les extrêmes minimums montrent sommairement que les IMG les plus bas ont aussi un MQI de qualité bonne voire très bonne. Cependant, la classe des stations considérées comme bonnes est plus étendue que les autres classes, et les très bons ont des IMG supérieurs à 10. De fait il n'y a pas de réelle tendance qui se dessine.

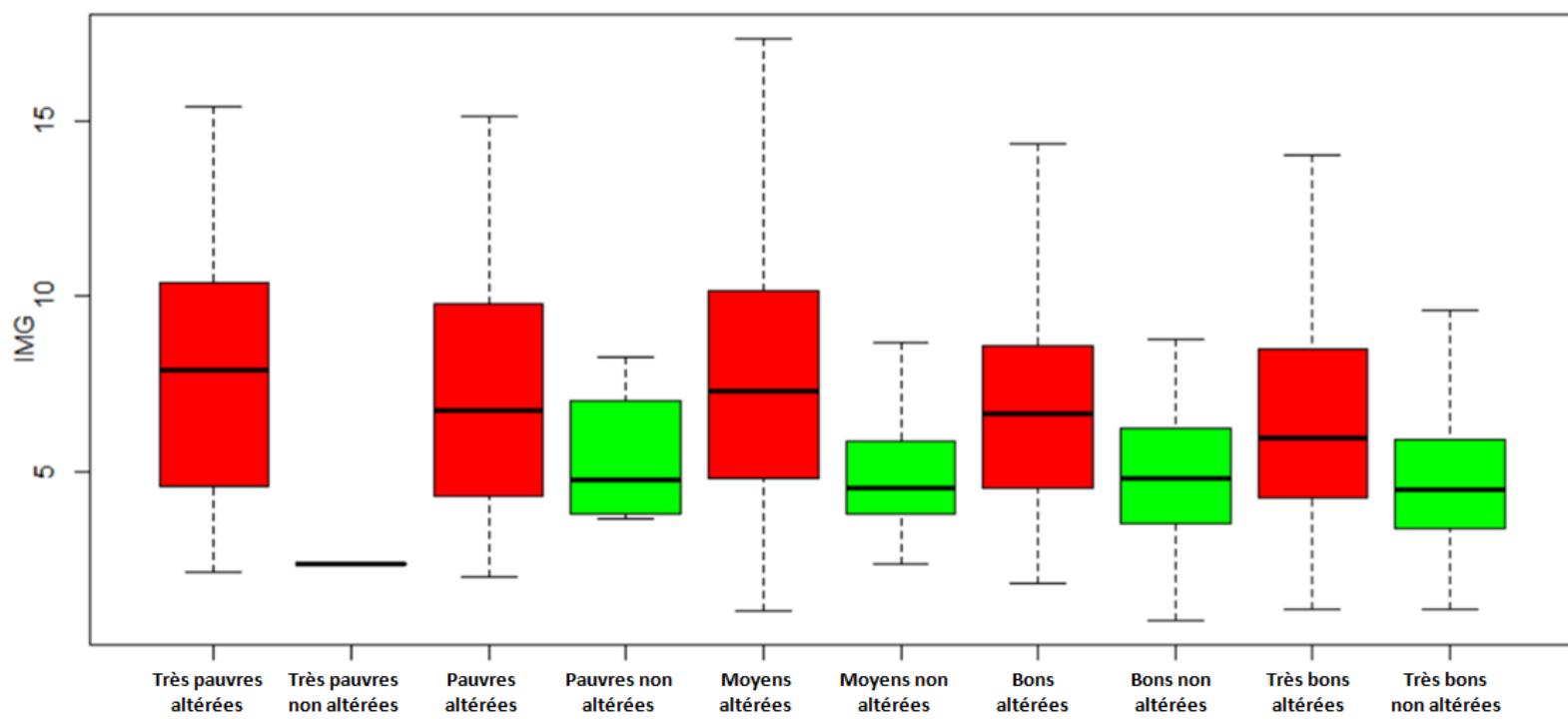


Figure 43 : Boîte à moustache des stations altérées et non altérées pour un MQI selon la géométrie du lit

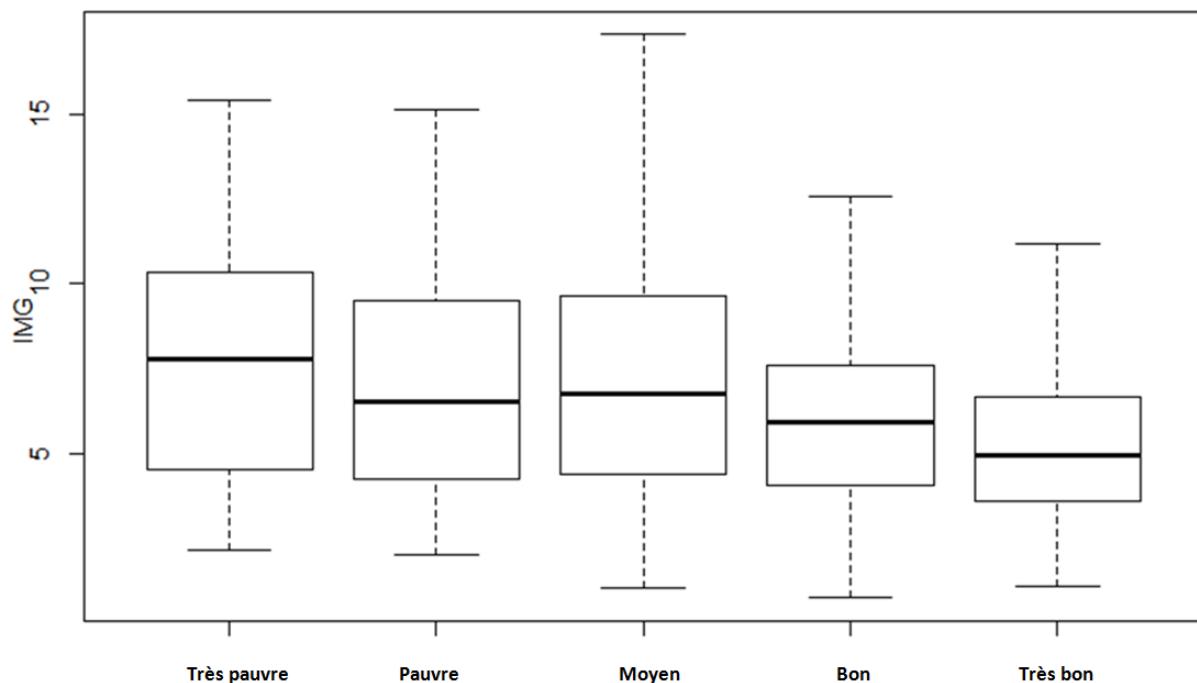


Figure 44 : Boîtes à moustache des stations de la France pour un MQI basé sur la géométrie du lit sans différenciation des stations de référence et des stations altérées

Si l'on regarde la Figure 44, on remarque que la corrélation qui existait entre le MQI et l'IMG pour un MQI global est moins marquée avec un MQI uniquement basé sur la géométrie du lit. En effet, même si la médiane des stations considérées comme de très pauvre qualité est plus haute que celle des stations de bonne à très bonne qualité, la différence n'est pas aussi flagrante que sur la Figure 39. De même, les IMG les plus bas n'appartiennent pas à une classe en particulier, mais semble assez répartis, ce qui montre une fois encore que le rapport entre le MQI basé sur la géométrie du lit et l'IMG est moins flagrant que celui entre le MQI global et l'IMG.

Comme pour le MQI Global, nous avons refait des boîtes à moustache pour chaque HER (Figure 45). Si la différence est toujours marquée entre les stations altérées et les stations non altérées, cette disparité est encore une fois beaucoup moins présente. Dans la plupart des HER les stations altérées ont un écart entre leur minimum et leur maximum plus étendu que les stations non altérées, et les IMG restent plus hauts.

Dans l'HER 3, qui comporte 94 stations, les graphiques sont beaucoup plus étendus que pour le MQI global, les stations de référence sont plus présentes dans les classes de qualité pauvre à moyenne, et les troisième quartiles, sont, pour les stations altérées, plus hauts. Les moustaches sont moins resserrées pour l'ensemble des stations, bien qu'il y ait toujours une différence entre les stations de très pauvre qualité et les stations de très bonne qualité, la courbe que forment l'ensemble des médianes est moins clairement décroissante.

Dans l'HER 4, qui contient 24 stations, il y a une moins large répartition des stations dans les classes de qualité du MQI. Ces dernières se répartissent essentiellement entre les

classes de qualité moyenne et de très bonne qualité, mais, comme pour l'HER 3, les médianes ne montrent pas de tendance qui lierait les scores MQI avec l'IMG.

Dans l'HER 7, qui est composée de 27 stations, les diagrammes sont plus resserrés vers le haut, et la classe de qualité moyenne des stations non altérées est beaucoup moins étendue. Cependant, comme pour les autres graphiques, le lien entre le MQI basé sur la géométrie du lit et l'IMG n'est pas remarquable.

Pour l'HER 21, composée de 88 stations, les boîtes sont assez semblables les unes aux autres et la médiane reste plus ou moins linéaire. Malgré cela, les moustaches, particulièrement des classes de bonne à très bonne qualité sont plus étendues que pour les autres classes. Si le Massif Central Nord contient essentiellement des IMG très bas, il n'en reste pas moins que les IMG les plus bas n'appartiennent pas forcément à la classe des stations de très bonne qualité, et inversement, les IMG les plus hauts n'appartiennent pas aux classes de qualité moyenne à très pauvre.

L'étude de ces différents HER, mais aussi des diagrammes à l'échelle de la France, que l'on différencie les stations de référence des stations altérées (Figure 43) ou non (Figure 44), nous montre bien que le MQI basé uniquement sur des éléments de géométrie du lit est moins corrélé à l'IMG que le MQI global.

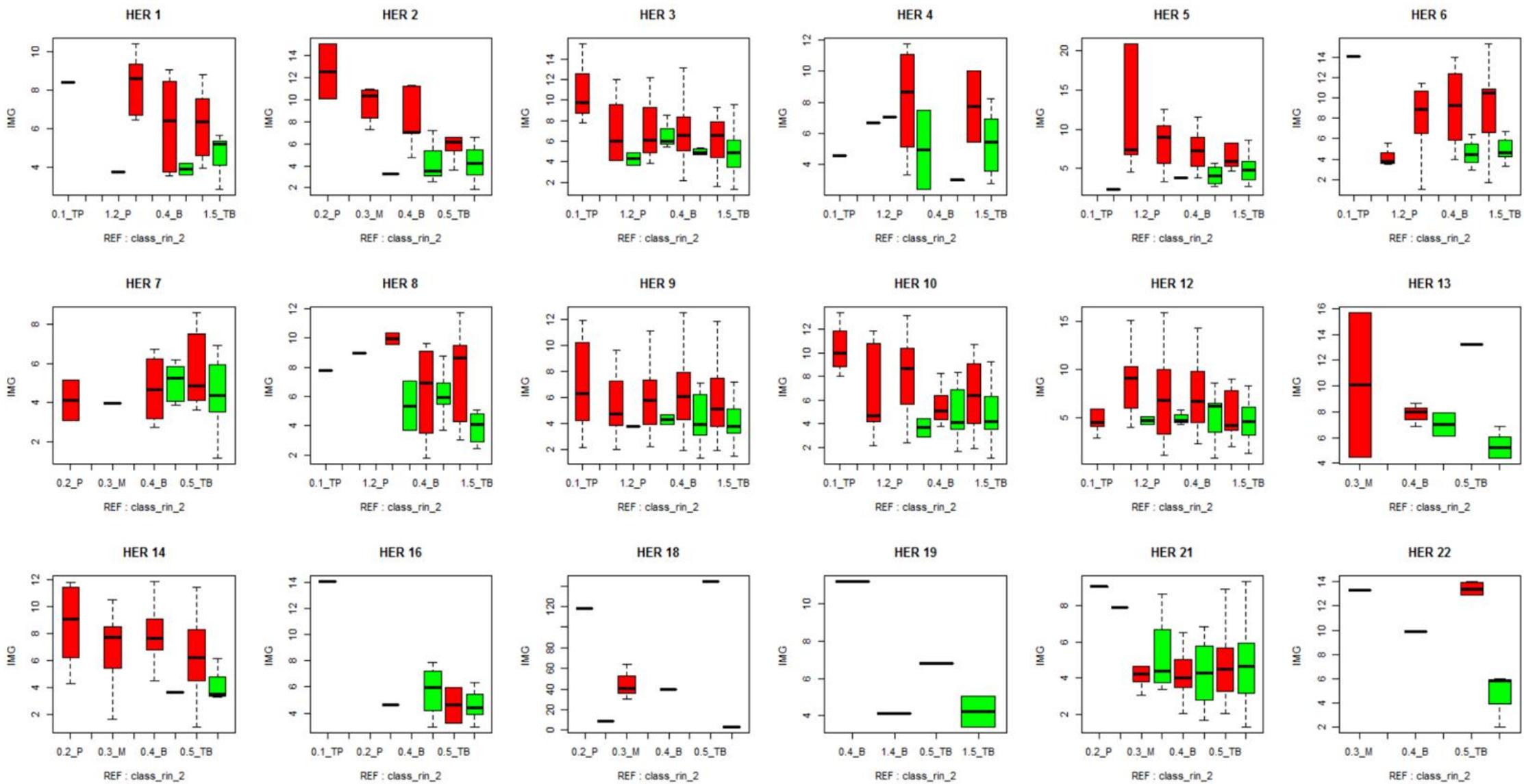


Figure 45 : Boîte à moustache par HER des stations altérées et non altérées pour un MQI basé sur la géométrie du lit

Discussion

Les résultats obtenus pour la mise en relation de l'Indice Morphologique Global (Gob *et al.*, 2014a) des stations Carhyce avec un *Morphological Quality Index* (Rinaldi *et al.*, 2014) recalculé sur ces dernières sont moins probants que ce à quoi l'on pouvait s'attendre. En effet, pour les stations prospectées à pied, comme pour les deux études faites à partir d'une systématisation du MQI, les coefficients de détermination (R^2) ne dépassent pas 0,2, ce qui n'est pas suffisant pour parler de réelle relation existante entre les deux méthodes. Cela laisse cependant entrevoir une tendance qui permet de faire le lien entre IMG et MQI, c'est-à-dire entre l'IMG et les altérations hydromorphologiques observables sans mesure quantifiable par un expert.

Les résultats des stations prospectées à pied

Les stations Carhyce prospectées à pied sont celles qui ont le meilleur coefficient de détermination ($R^2 = 0,2074$), même si celui-ci reste faible. Ces stations sont aussi celles où nous avons utilisé le MQI en respectant strictement le protocole décrit par l'auteur (Rinaldi *et al.*, 2014). Nous avons fait une pré-évaluation des sites *via* les SIG, avant de visiter chacune des stations. Grâce aux SIG, nous avons observé la géologie des sites, ainsi que l'occupation des sols sur une zone de 10km alentour environ. Cependant, nous n'avons pu effectuer ces relevés que pour 15 stations, toutes situées dans la même HER. De plus, le Massif Central Nord est une des régions la moins altérée en France en termes d'hydromorphologie, du moins si l'on se réfère à l'IMG des stations de cette région, qui font partie des plus bas de la métropole (Figure 46). En effet, la majorité des stations dans le Massif Central Nord ont un IMG compris entre 1 et 9 (94% des stations) alors que dans le reste de la France 87% des stations ont un IMG compris dans cet intervalle. De plus, dans l'HER 21, aucune station n'a un IMG au-dessus de 15. Ainsi, si le lien entre l'IMG et le MQI est relativement plus parlant dans cette région qu'avec la systématisation de la méthode, il faut nuancer ce résultat en sachant qu'il n'y a pas une grande diversité d'altération dans cette région.

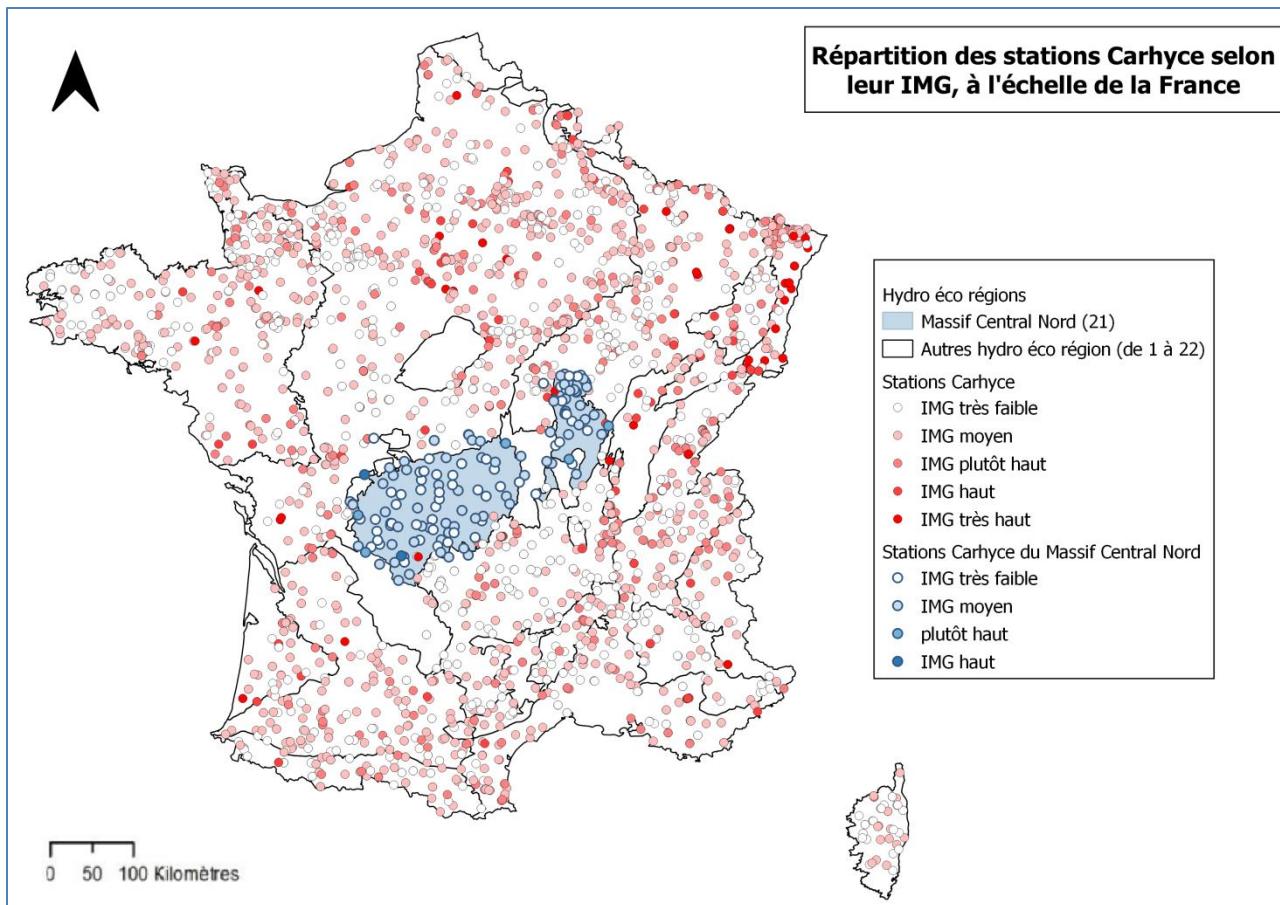


Figure 46 : Carte de la répartition des stations Carhyce à l'échelle de la France métropolitaine ainsi que de leur IMG comparés à ceux du Massif Central nord

Les résultats de la systématisation de la méthode avec un MQI global

Le coefficient de détermination entre le MQI systématisé grâce aux diverses banques de données sur les cours d'eau français, et l'IMG, est quasiment nul ($R^2 = 0,005$). Cependant, lorsqu'on regarde la répartition par classe d'IMG, une légère tendance apparaît. Cela signifie que le rapport en IMG et MQI existe. Autrement dit, bien que le MQI et l'IMG ne se basent pas sur les mêmes éléments pour caractériser le bon état hydromorphologique d'un cours d'eau, et qu'elles ne ciblent pas exactement les mêmes types d'altérations, les deux peuvent, différemment, être de bons indicateurs pour mesurer différents types d'altération hydromorphologique.

D'une manière plus générale, les deux protocoles répondent à la demande de l'Union Européenne de veiller au bon état écologique des cours d'eau. Cependant, les concepteurs de Carhyce observent bien plus spécifiquement les altérations de la géométrie du lit du cours d'eau, c'est-à-dire des paramètres purement hydrologiques (Tamisier *et al.*, 2014). A l'inverse, le MQI est un outil plus général pour mesurer en premier lieu les altérations, principalement anthropiques, que ses auteurs définissent comme des éléments artificiels (Rinaldi *et al.*, 2011). Dans un second temps, il est basé sur les fonctionnalités d'un cours

d'eau et leurs ajustements, c'est-à-dire les différentes formes et les différents processus qui façonnent et modifient le cours d'eau au cours du temps. Ce sont les éléments majeurs du score MQI. Dès lors, il apparaît que les deux méthodes n'ont pas exactement la même approche de ce qui altère un cours d'eau, et de ce que représentent ces dites altérations dans le fonctionnement global de celui-ci. En somme, le MQI prend en compte le passé du cours d'eau ainsi que les éléments non hydrologiques mais en lien avec celui-ci (les aménagements anthropiques notamment). Carhyce quant à elle, est une méthode statistique qui étudie à un instant T une altération statistiquement comparable à des modèles régionaux.

Dès lors, si les deux méthodes répondent à la loi DCE, elles l'approchent de deux manières très différentes, ce qui rend difficile leur comparaison de celles-ci. A partir de cette approche, le très faible coefficient de détermination peut sembler moins aberrant.

Les résultats de la systématisation de la méthode avec un MQI basé essentiellement sur la géométrie du lit

La seconde méthode de calcul n'apporte rien de plus, et fausse peut-être même le faible lien qui existait entre le MQI global et l'IMG. Etant donné que cette automatisation du MQI a été faite, notamment, avec des données de l'IPR, qui ont aussi grandement servi à définir les stations de référence des modèles statistiques de Carhyce – 4 des 7 éléments choisis pour faire un MQI basé uniquement sur la géométrie du lit font aussi des données de l'IPR utilisées pour définir les stations de référence – le calcul est très certainement biaisé par la redondance des données utilisées. En effet, les références sont majoritairement des stations de bonne à très bonne qualité, selon les classes MQI, principalement parce qu'elles ont été préalablement sélectionnées car elles faisaient parties des moins altérées dans les différentes catégories de l'IPR. Travailler exclusivement à partir de cela ne fait que ségrégner plus clairement les stations de référence par rapport aux stations plus altérées.

Perspectives

Nous avons vu que si les résultats mettaient au jour un lien très fragile entre les deux méthodes, c'était peut-être principalement dû au fait qu'elles n'ont pas la même approche de la sauvegarde du bon état écologique des cours d'eau en matière d'hydromorphologie. Cependant, afin de confirmer cette théorie, il aurait été intéressant d'avoir un plus grand nombre de stations prospectées à pied, et ce dans plusieurs hydro éco régions très différentes, comme une région de plaine, de littoral, fortement urbanisée, ou encore une région de haute montagne afin d'avoir un panel statistique plus conséquent, et plus représentatif de la diversité de l'hydrologie et de l'hydromorphologie française. Un plus

grand panel de stations ne montreraient pas forcément des résultats très différents de ceux précédemment décrits, mais ils permettraient sûrement de préciser leurs interprétations.

De plus, un plus grand respect du protocole de relevés de terrain, notamment à propos de l'historique des cours d'eau, mais aussi des différentes échelles de tronçons à étudier, aurait éventuellement apporté d'autres éléments de corrélation plus probants. Il aurait alors fallu réévaluer le type d'outils que nous voulions comparer – une base de données nationale qui fonctionne par rapport à des modèles régionaux qui permettent d'évaluer chaque station par rapport à un ensemble – et ne plus travailler qu'à l'échelle ultra locale, sur quelques cours d'eau spécifiques. En fonctionnant comme cela, le manque de visibilité à large échelle aurait sans doute constitué une limite importante.

Quant à la systématisation du MQI grâce à un croisement de différentes bases de données, on pourrait regretter un manque de diversité des types de données accessibles à l'échelle de la France. En effet, les données de l'IPR par exemple sont avant tout relevées par des poissonniers et des biologistes, et sont donc initialement pensées avec une logique différente de celle des hydrologues et des hydromorphologues. De même, il n'existe pas de base de données recensant les formes anciennes et les différents aménagements qui ont eu lieu sur les cours d'eau à l'échelle nationale. Plusieurs bases sont établies régionalement voire très localement, sur un cours d'eau, ou encore par rapport à un type d'industrie. Ce manque d'information constitue aussi une lacune dans notre calcul d'un MQI à l'échelle de la France. Il serait alors peut-être intéressant de travailler à l'élaboration d'une base de données plus complète et plus précise afin de voir si les résultats différeraient.

Conclusion

La Directive Cadre de l'Eau (DCE, 2000/60/CE) a pour objectif de garantir la durabilité de la ressource en eau dans l'Union Européenne. Il a pour cela été mis en place différents programmes et méthodes qui permettent de mesurer et de quantifier le degré d'altération des cours d'eau, que ce soit chimiquement, biologiquement, ou encore hydromorphologiquement. Le but premier est de restaurer les rivières qui ont besoin de l'être, et de protéger celles qui le sont déjà afin de garantir la durabilité des écosystèmes, y compris les sociétés humaines.

C'est dans cette optique qu'ont été développées la base de données Carhyce ainsi que la méthode du MQI. Puisque ces deux méthodes se concentrent toutes deux sur l'hydromorphologie des cours d'eau, nous avons décidé de les comparer, dans le but premier d'évaluer l'efficacité de l'IMG en tant qu'outil décisionnel pour la restauration des cours d'eau, le MQI ayant déjà été approuvé depuis plusieurs années par l'Union Européenne.

Pour ce faire, nous avons utilisé deux méthodes. Nous avons dans un premier temps effectué des relevés de terrain sur 15 stations dans le Massif Central Nord, afin d'avoir des scores MQI correspondant le plus exactement possible à la méthode décrite par les auteurs (Rinaldi *et al.*, 2014). Dans un second temps, nous avons tenté de standardiser la méthode afin d'avoir une étude représentative à l'échelle nationale.

La prospection à pied des stations nous a permis de pouvoir étudier assez précisément chaque élément participant à l'évaluation du MQI avec plus de finesse. Les deux évaluations, quant à elles, construites à partir de différentes bases de données – une qui englobait un maximum d'élément du MQI initial et une se basant exclusivement sur les éléments de géométrie du lit – nous ont permis de constater qu'il était en réalité difficile de comparer l'IMG des stations Carhyce avec les scores MQI obtenus. En effet, si les deux méthodes travaillent exclusivement sur l'hydromorphologie d'un cours d'eau, la méthode italienne est d'avantage qualitative, avant tout basée sur une expertise d'hydromorphologue. A l'inverse, la base de données Carhyce a été conçue pour être utilisable par tous et est avant tout quantitative. Elle se base sur des modèles, dans lesquels elle place chaque rivière par rapport aux autres rivières présentes dans les différents HER, et permet ainsi de voir rapidement quel élément de la station diffère par rapport à d'autres stations d'une même région.

En définitive, il reste difficile de faire ressortir de cette comparaison un réel échec ou une vraie réussite. La grande différence méthodologique entre les deux demeure une réelle limite de cette étude. Cependant, la tendance qui se dessine entre le MQI et l'IMG permet de montrer qu'il existe bien un lien entre les altérations hydromorphologiques et l'IMG, ce qui n'était pas véritablement prouvé auparavant.

Bibliographie

Ouvrages et articles

- ARONSON, J., CLEWELL, AF., BILGAUT, J. & MILTON, S., (2006)**, Ecological restoration : a new frontier for nature conservation and economics, *Journal for Nature Conservation*, p. 135-139.
- BETEILLE, R., (1984)**, La France du vide, *Annales de géographie*, vol. 93, n°517, p. 378-379.
- BRAVARD, J.-P. & MALAVOI, J.-R., (2010)**, *Eléments d'hydromorphologie fluviale*, Onéma, 224 p.
- BRAVARD, J.-P. & PETIT, F., (2000)**, *Les cours d'eau: dynamique du système fluvial*, A. Colin, Paris, 222 p.
- BRIERLEY, G. J. & FRYIRS, K. A. (ÉD.), (2004)**, *Geomorphology and River Management*, Blackwell Publishing, Malden, MA, USA.
- BUNN, S. E. & ARTHINGTON, A. H., (2002)**, Basic Principles and Ecological Consequences of Altered Flow Regimes for Aquatic Biodiversity, *Environmental Management*, vol. 30, n°4, p. 492-507.
- CAIRNS, J., (1991)**, The status of the theoretical and applied science of restoration ecology, p. 186-194.
- CHANDESRIS, A., MENGLN, N. & PELLA, H., (2008)**, Système relationnel d'audit de l'hydromorphologie des cours d'eau : principes et méthodes, p. 81.
- CHARLIER, J., LACOSTE, Y., ADJADJI, J.-P., BEYER, A. & CARROUE, L., (2014)**, *Atlas du 21e siècle*, Atlas, Nathan.
- DUFOUR, S. & PIÉGAY, H., (2009)**, From the myth of a lost paradise to targeted river restoration: forget natural references and focus on human benefits, *River Research and Applications*, vol. 25, n°5, p. 568-581.
- GILET, L., (2012)**, *Impact du recalibrage et de la rectification sur la morphologie des cours d'eau en France*, Paris 1 Panthéon Sorbonne.
- GOB, F., BILODEAU, C., THOMMERET, N., BELLARD, J., ALBERT, M.-B., TAMISIER, V., ... KREUTZENBERGER, K., (2014a)**, Un outil de caractérisation hydromorphologique des cours d'eau pour l'application de la DCE en France (CARHYCE), *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. 20, n°1, p. 57-72.
- GOB, F., BILODEAU, C., THOMMERET, N., TAMISIER, V., ALBERT, M.-B. & JEROME, B., (2014b)**, *Vers la construction d'indicateurs hydromorphologiques soutenant la biologie à partir de la base de données nationale CARHYCE. Valorisation des données CARHYCE*.
- GORE, J., (1985)**, *The restoration of Rivers and Streams: Theories and Experience*, Mass., 280 p.

GURNELL, A. M., RINALDI, M., BELLETTI, B., BIZZI, S., BLAMAUER, B., BRACA, G., ... ZILIANI, L., (2016), A multi-scale hierarchical framework for developing understanding of river behaviour to support river management, *Aquatic Sciences*, vol. 78, n°1, p. 1-16.

JOHNSON, P. A. & FECKO, B. J., (2008), Regional channel geometry equations: a statistical comparison for physiographic provinces in the eastern US, *River Research and Applications*, vol. 24, n°6, p. 823-834.

KEATON, J., MESSINGER, T. & DOHENY, E. J., (2005), *Development and Analysis of Regional Curves for Streams in the Non-Urban Valley and Ridge Physiographic Province, Maryland, Virginia and West Virginia* (Scientific Investigations Report), Scientific Investigations Report, U.S Department of the Interior ; U.S Geological Survey.

KREUTZENBERGER, K., BAUDOIN, J.-M., BOUTET-BERRY, L., CAGNANT, M., GOB, F., LAMAND, F., ... TUAL, M., (2017), *Protocole de recueil de données hydromorphologiques à l'échelle de la station sur les cours d'eau prospectables à pieds* (guide & protocole), guide & protocole, Agence Française pour la Biodiversité (AFB), 56 p.

LAMOURoux, N., PELLA, H., VANDERBECQ, A., SAUQUET, C. E. & LEJOT, J., (2010), *Estimkart 2.0 : Une plate-forme de modèles écohydrologiques pour contribuer à la gestion des cours d'eau à l'échelle des bassins français. Version provisoire.*, Cemagref - Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse-ONEMA, 45 p.

LEONARD, A., AUGU, H. & KREUTZENBERGER, K., (2013), *Référentiel des Obstacles à l'Ecoulement, Descriptif du contenu de la version simplifiée, Version 5.0. Guide technique*, 33 p.

LEOPOLD, L. B. & MADDOCK JR., T., (1953), *The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications* (USGS Numbered Series n° 252), *The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications*, USGS Numbered Series, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 64 p.

LEOPOLD, L. B. & WOLMAN, M. G., (1957), *River channel patterns: braided, meandering and straight.* (Professional Paper), Professional Paper, Prof.Paper, 39-85 p.

MACDONALD, A., LANE, SN., HAYCOCK, N. & CHALK, E., (2004), Rivers of dreams: on the gulf between theoretical and practical aspects of an upland river restoration., *Transactions of the Institute of British Geographers*, n°29, p. 257-281.

MARZIN, A., ARCHAIBAULT, V., BELLARD, J., CHAUVIN, C., DELMAS, F. & PONT, D., (2012), Ecological assessment of running waters: Do macrophytes, macroinvertebrates, diatoms and fish show similar responses to human pressures?, *Ecological Indicators*, vol. 23, p. 56-65.

MARZIN, A., VERDONSCHOT, P. & PONT, D., (2013), The relative influence of catchment, riparian corridor, and reach-scale anthropogenic pressures on fish and macroinvertebrate assemblages in French rivers, *Hydrobiologia*, vol. 704, .

NAVRATIL, O., ALBERT, M.-B., HÉROUIN, E. & GRESILLON, J.-M., (2006), Determination of bankfull discharge magnitude and frequency: comparison of methods on 16 gravel-bed river reaches, *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 31, n°11, p. 1345-1363.

OBERDORFF, T., PONT, D., HUGUENY, B., JEROME, B., BERREBI, 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, <http://dx.doi.org/10.1051/kmae:2002043>.

RINALDI, M., PIÉGAY, H. & SURIAN, N., (2013), Geomorphological Approaches for River Management and Restoration in Italian and French Rivers, In : A. SIMON, S. J. BENNETT et J. M. CASTRO (éd.), *Geophysical Monograph Series*, American Geophysical Union, Washington, D. C., p. 95-113.

RINALDI, M. & SIMON, A., (1998), Bed-level adjustments in the Arno River, central Italy, *Geomorphology*, vol. 22, n°1, p. 57-71.

RINALDI, M., SURIAN, N. & BUSSETTINI, M., (2014), IDRAIM, sistema di valutazione idromorfologica, analisi a monitoraggio dei corsi d'acqua, ISPRA- Settore Editoria.

RINALDI, M., SURIAN, N., COMITI, F. & BUSSETTINI, M., (2011), The Morphological Quality Index (MQI) for stream evaluation and hydromorphological classification, *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, vol. 11, p. 17-36.

SIMON, A. & RINALDI, M., (2006), Disturbance, stream incision, and channel evolution: The roles of excess transport capacity and boundary materials in controlling channel response, *Geomorphology*, vol. 79, n°3, p. 361-383.

TABACHI, E., (2003), Le rôle de la ripisylve dans la dynamique des écoulements d'eau, vol. XXIV, n°3, p. 289-290.

TAMISIER, V., GOB, F., BIODEAU, C. & THOMMERET, N., (2014), Valorisation des données Carhyce pour la construction d'un outil d'aide à la gestion des cours d'eau., p. 142.

WASSON, J. G., CHANDESRIS, A., PELLA, H. & BLANC, L., (2002), Les hydro-écorégions de France métropolitaine. Approche régionale de la typologie des eaux courantes et éléments pour la définition des peuplements de référence d'invertébrés. Cemagref Lyon.

WASSON, J. G., CHANDESRIS, A., PELLA, H. & BLANC, L., (2004), Les hydro-écorégions : une approche fonctionnelle de la typologie des rivières pour la Directive cadre européenne sur l'eau, *Ingénieries eau-agriculture-territoires*, n°40, p. 3-10.

WATSON, C., BIEDENHARN, D. & SCOTT, S., (1999), Channel Rehabilitation: Processes, Design, and Implementation, p. 313.

WOLMAN, M. G., (1954), A method of sampling coarse river-bed material., In : *Transactions of the American Geophysical Union* 35, p. 951-956.

Webographie

Interface d'Exploitation des données Carhyce :

<http://194.57.254.11/IED/> (dernière consultation : 18 juin 2020 à 17h34)

Texte de loi de l'Union Européenne sur la directive Cadre sur l'Eau :

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=LEGISSUM:l28002b> (dernière consultation : 15 décembre 2019 à 15h41)

Copernicus, CORINE Land Cover :

<https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover> (dernière consultation : 13 février 2020 à 12h11)

Référentiel des Obstacles à l'écoulement :

http://carmen.carmencarto.fr/66/ka_roe_current_metropole.map (dernière consultation : 12 février à 11h09)

Reform :

<https://reformrivers.eu/> (dernière consultation : 15 avril à 09h56)

Annexes

Annexe 1 : tableau récapitulatif des données et des méthodes utilisées pour chaque notion évaluée

Indicateur et paramètres évalué	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	Télédétection 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	Télédétection / 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 (ex: les routes), dans une zone tampon de 50m de large de chaque côté de la rivière	Télédétection / 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	Télédétection 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		
<i>Configuration morphologique</i>		
F5 présence d'une ceinture potentiellement érodable Largeur et longueur longitudinale de la ceinture érodable, c'est-à-dire zone sans structures pertinentes (ex: protection des berges, levée) ou infrastructures (maisons, routes)	Télédétection / 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	Télédétection / 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	Télédétection et/ou enquête de terrain : identification et vérification des formes fluviales (quali)	PC-U
<i>Configuration de la section</i>		
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) Télédétection / SIG : identification et mesure de la longueur des portions altérées (quantit)	Tous les types
<i>Structure et substrat du lit de la rivière</i>		
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 climatique et dans les ruisseaux avec une absence naturelle de végétation
<i>Végétation de la ripisylve</i>		
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	Télédétection / SIG : identification et mesure de la largeur moyenne de la végétation fonctionnelle (quantit)	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	Télédétection / SIG : identification et mesure de la longueur de la végétation (quantit)	Tous, non évalué au dessus de la limite des arbres et dans les cours d'eau avec une absence naturelle de ripisylve
Artificialité		
<i>Travaux de modification de la continuité longitudinale en amont</i>		
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 (quantit) 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	Télédétection / SIG / base de données d'interventions : identification des	Tous

Présence, type et emplacement (zone de drainage) des structures pertinentes responsables de l'interception de la charge de fond (barrages, barrages de retenue, déversoirs)	structures et de l'aire de drainage relative (quanti)	
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	Télédétection / 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)	Télédétection /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)	Télédétection / SIG/ base de données des interventions : longueur des structures (quanti)	Tous
A7 levées artificielles /digues Longueur et du chenal des levées artificielles	Télédétection / 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	Télédétection / 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	Base de données des interventions / info disponibles auprès des organismes publics Etude de terrain/télédétection preuves indirectes (quali)	Tous – non évalué pour les ERT de type 1

dernières années)		
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	Télédétection / SIG (quantit)	Tous – uniquement pour les chenaux assez grands
V2 variation de la largeur Variation de la largeur des chenaux des années 1930 aux années 1960	Télédétection/ SIG (quantit)	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 quantit)	Tous – dans le cas où des preuves ou des infos sont disponibles

Nom du cours d'eau				
<i>Type de confinement</i>				
Sigles	Classes	Score	SIG	
Fonctionnalités				
Continuité				
F1	A – absence d'altération dans la continuité des sédiments et du bois	0		
	B – légère altération (obstacles aux flux mais sans interception)	3		
	C – altération significative (interception complète des sédiments et du bois)	5		
F2	PC-U uniquement			
	A – présence d'une plaine inondable contemporaine continue (>66% de la portée) et large ($>nW$, où $n=1$ pour les chenaux errant ou simple et 2 pour les chenaux en tresse ou en anastomose et W = largeur du canal)	0		
	B1 – présence d'une plaine d'inondation contemporaine discontinue (10-66%) mais large ou >66% mais étroite	2		
	B2 – présence d'une plaine d'inondation contemporaine discontinue (10-66%) et étroite	3		
	C – absence de plaine inondable contemporaine ou présence négligeable ($\leq 10\%$ de toute la largeur)	5		
F3	C uniquement			
	A – connectivité complète entre les versants et le couloir fluvial (>90%)	0		
	B – connectivité pour une partie importante (33-90%)	3		
F4	PC-U uniquement			
	A – l'érosion des berges se produit pour >10% et est répartie sur >33% de la portée	0		
	B – l'érosion des berges se produit pour $\leq 10\%$, ou pour >10% mais est concentré le long de $\leq 33\%$, ou une présence significative (>25%) de berges en érosion par des défaillances massives	2		
	C – absence complète ($\leq 2\%$) de berges en retrait, ou présence généralisée (>50%) de berges instables par défaillance de masse	3		
F5	PC-U uniquement			
	A – présence d'un couloir potentiellement érodable (EC) pour une longueur >66% et large ($>nW$, où $n=1$ pour les chenaux errant ou simple et 2 pour les chenaux en tresse ou en anastomose et W = largeur du canal)	0		
	B – présence d'un EC étroit ($\leq nW$) >66% ou large mais pour 33-66%	2		
	C – présence d'un EC sur toute la largeur mais pour $\leq 33\%$	3		
Morphologie				
<i>Configuration morphologique</i>				
F6	C uniquement			
	A – formes du lit conformes à la pente moyenne de la vallée	0		
	B – formes de lit non conformes à la pente moyenne de la vallée	3		
F7	C – altération complète des formes du lit ou présence d'un lit artificiel	5		
	A – absence ($\leq 5\%$) d'altération de l'hétérogénéité naturelle des unités géomorphiques et de la largeur du canal	0		
	B – altération pour une portion limitée du tronçon ($\leq 33\%$)	3		
	C – altération cohérente pour une portion significative du tronçon (>33%)	5		

F8	PC-U uniquement			
	A – présence de formes fluviales de plaines inondables (lacs, méandres, chenaux secondaires, etc.)	0		
	B – présence de formes fluviales de plaine inondable (abandonnés au cours des dernières décennies) mais avec réactivation possible	2		
	C – absence formes fluviales de plaine inondable	3		
<i>Configuration de tronçon</i>				
F9	A – absence ($\leq 5\%$) d'altération de l'hétérogénéité naturelle du tronçon transversale	0		
	B – présence d'altération pour une partie limitée du tronçon ($\leq 33\%$)	3		
	C – présence d'altération pour une partie significative du tronçon ($> 33\%$)	5		
F10	A – hétérogénéité naturelle des sédiments du lit et pas de colmatage significatif	0		
	B – pavage évident (PC-U uniquement) ou colmatage dans diverses parties du site	2		
	C1 – pavage évident et répandu ($> 90\%$) (PC-U uniquement), colmatage ou enfouissement ($\leq 50\%$) ou affleurements occasionnels de substrat (PC-U uniquement)	5		
	C2 – enfouissement évident ($> 50\%$) ou affleurement de substrats répandus ($> 33\%$) (PC-U uniquement) ou altération généralisée du substrat par des revêtements de lit ($> 33\%$)	6		
F11	A – présence significative de matériaux ligneux sur tout le tronçon	0		
	B - présence négligeable de matériaux ligneux pour $\leq 50\%$ du tronçon	2		
	C – présence négligeable de matériaux ligneux pour $> 50\%$ du tronçon	3		
<i>Ripisylve</i>				
F12	A – ripisylve connectée large (PC-U : $>nW$, où $n = 1$ ou 2 pour les canaux errants - tressés ou pour fil unique - anabranches, respectivement, et W = largeur du canal; C : $> 90\%$ des versants, 50 m sur chaque rive)	0		
	B – largeur intermédiaire de la ripisylve connectée (PC-U : $0,5 W \div nW$; C : $33 \div 90\%$ des versants, 50 m sur chaque rive)	2		
	C – végétation ripisylve connectée étroite (PC-U : $\leq 0,5 W$; C : $\leq 33\%$ des pentes, à 50 m de chaque rive)	3		
F13	A – extension linéaire de la végétation rivulaire $> 90\%$ de la longueur max disponible	0		
	B – végétation rivulaire 33-90%	3		
	C – végétation rivulaire $\leq 33\%$	5		
Artificialités				
<i>Travaux de modification de la continuité longitudinale en amont</i>				
A1 m	A – pas d'altération significative ($\leq 10\%$) des débits morphogènes (intervalle de retour de 1.5 à 10 ans) et Q avec intervalle de retour > 10 ans	0		
	B – altération significative ($> 10\%$) de Q avec intervalle de retour > 10 ans	3		
	C – altération significative ($> 10\%$) des décharges formant des chenaux	6		
A2	A – absence ou présence négligeable de structures d'interception des flux de sédiments	0		
	B1 – présence de barrage avec zone de drainage 5-33% et / ou barrage de contrôle avec interception totale des zones de charge et de drainage 33-66% et / ou barrage ou barrage de contrôle avec couche de fond et des zones de drainage $> 33\%$ (zone de plaine/colline), ou $> 66\%$ (zone de montagne)	3		
	B2 – présence de barrages pour la zone de drainage 33-66%, et/ou déversoirs ou vérifier les barrages avec interception totale de la couche de fond et des zones de	6		

	drainage >66%		
	C1 – présence de barrage pour la zone de drainage >66%	9	
	C2 – présence d'un barrage à la limite amont du tronçon	12	

Travaux de modification de la continuité longitudinale dans le tronçon

A3	A – pas d'altération significative ($\leq 10\%$) des débits morphogènes et Q avec intervalle de retour >10 ans	0	
	B – altération significative ($>10\%$) de Q avec intervalle de retour >10 ans	3	
	C – altération significative ($>10\%$) des décharges formant des chenaux	6	
A4	A – absence de structures qui interceptent le flux sédimentaire (barrages, barrages de retenue, déversoirs)	0	
	B – chenaux avec $S \leq 1\%$: barrage de vérification de la consolidation et/ou déversoirs de captage (y compris les bassins de rétention réservés) ≤ 1 tous les km ; chenaux pentus ($S > 1\%$) : barrages / barrages de contrôle de consolidation ≤ 1 tous les 200m et/ou un ou plusieurs barrages de contrôle de rétention Ou présence d'un barrage ou d'un réservoir artificiel à la limite aval du tronçon (toute pente du lit)	4	
	C – pour les pentes supérieures à 1% : présence de barrages de contrôle et de déversoir > 1 tous les 200m et/ou 1 ou plusieurs barrages de rétention pour les chenaux $S \leq 1\%$: présence de barrages de contrôle et /ou déversoir > 1 tous les 1000m ou présence d'un barrage et/ou réservoir artificiel dans le tronçon en limite aval	6	
	<i>Lorsque les ouvrages d'art, y compris les seuils de lit et les rampes (A9), sont > 1 tous les d_1, ajouter</i>	6	
	<i>Lorsque les ouvrages d'art, y compris les seuils de lit et les rampes (A9), sont > 1 tous les $d_2 = 100m$, ajouter</i>	12	
	<i>D1=150m et d2=100m dans les chenaux escarpés, d1=750m et d2=500m dans les chenaux avec $S \leq 1\%$</i>		
A5	A – absence de structure de franchissement (pont, gué)	0	
	B – présence de certaines structures de franchissement (≤ 1 tous les km en moyenne dans le tronçon)	2	
	C – présence de nombreuses structures de franchissement (> 1 tous les km)	3	

Travaux qui altèrent la continuité latérale

A6	A – absence ou présence localisée de protection de berges ($\leq 5\%$ sur la longueur totale des berges)	0	
	B – présence de protections pour $\leq 33\%$ de la longueur totale des berges (somme des deux berges)	3	
	C – présence de protections pour $> 33\%$ de la longueur totale des berges (somme des deux berges)	6	
	Pour une densité élevée de protection de berges ($> 50\%$) ajouter	6	
	Pour une densité très élevée de protection de berges ($> 80\%$) ajouter	12	
A7	PC-U uniquement		
	A – levées absentes, en retrait ou présentes et en contact $\leq 5\%$ de longueur totale des berges	0	
	B – présence moyenne de levées proches et/ou en contact ($\leq 50\%$ de longueur de berge)	3	
	C – forte présence de levées proches et/ou en contact (en contact $> 50\%$ de longueur de rive)	6	
	<i>Pour une forte densité de levées de bordure ($> 66\%$) ajoutez</i>	6	

	<i>Pour une densité extrême de levées de rive (>80%), ajoutez</i>	12	
Travaux de modification de la morphologie du lit de la rivière et/ou du substrat			
A8	PC-U uniquement		
	A – absence de modifications artificielles du cours du fleuve dans le passé (coupe de méandres, détournement des chenaux, etc.)	0	
	B – présence de changements pour $\leq 10\%$ de la longueur de portée	2	
	C – présence de changements pour $>10\%$ de la longueur de portée	3	
	<i>Dans le cas de travaux historiques de drainage et de dragage pour >50% de la portée (lorsqu'une note supplémentaire n'est pas déjà appliquée pour A6 et/ou A7) ajoutez</i>	6	
	<i>Dans le cas de travaux historiques de drainage et de dragage pour >80% de la portée (lorsqu'une note supplémentaire n'est pas déjà appliquée pour A6 et/ou A7), ajoutez</i>	12	
A9	PC-U uniquement		
	A – absence de structure (seuils de lit/rampes) et revêtements	0	
	B – présence limitée de structures (≤ 1 tous les n, où <i>n= 200m pour les zones de montagnes, n=1000m pour les zones de plaines et de collines</i>) et/ou de revêtements ($\leq 15\%$ imperméable et/ou $\leq 25\%$ perméables)	3	
	C1 – présence de nombreuses structures (>1 tous les n) et/ou revêtements de lit importants ($\leq 33\%$ imperméable et/ou $\leq 50\%$ perméable)	6	
	C2 – présence de revêtement de lit imperméable $>33\%$ et/ou de revêtements perméables $>50\%$	8	
	<i>Pour une densité de revêtement extrêmement élevée (imperméable >80%) ajoutez</i>	12	
Opérations d'entretien et de collecte			
A10	PC-U uniquement		
	A – absence d'activités d'enlèvement de sédiments importantes récentes (20 dernières années) et passées (au cours des 100 dernières années)	0	
	B1 – activité d'élimination des sédiments dans le passé mais absence au cours des 20 dernières années	3	
	B2 – activité récente d'élimination des sédiments (20 dernières années), mais absence au cours des 4 dernières années	4	
	C – activité d'élimination des sédiments dans le passé et au cours des 20 dernières années	6	
	C uniquement		
	A – absence d'activité importante d'élimination des sédiments au cours des 20 dernières années	0	
	B – activité d'élimination localisée des sédiments au cours des 20 dernières années	3	
	C – activité d'enlèvement de sédiments généralisée au cours des 20 dernières années	6	
A11	PC-U uniquement		
	A – absence d'élimination des matières ligneuses au moins au cours des 20 dernières années	0	
	B – enlèvement partiel de bois sur les 20 dernières années	2	
	C – enlèvement total de bois sur les 20 dernières années	5	
A12	PC-U uniquement		
	A – pas d'interventions de coupe sur la végétation ripisylve (20 dernières années), et la végétation aquatique (5 dernières années)	0	
	B – coupes sélectives et/ou coupes à blanc sur $\leq 50\%$ de la portée (20 dernières années) et coupe partielle ou nulle de la végétation aquatique (5 dernières années), ou pas de coupe de la ripisylve mais coupe partielle ou totale de la	2	

	végétation aquatique C – coupes claires sur >50% de la portée (20 dernières années), ou coupe sélectives et/ ou coupes claires de ripisylve ≤50% de la portée mais coupe totale de la végétation aquatique (5 dernières années)	5	
--	--	---	--

Variations morphologiques

V1	A – absence de changements dans la configuration des chenaux depuis les années 30-60	0	
	B – changement d'un modèle de chenal similaire à celui des années 1930-1960 (PC-U) ou changement de modèle de chenal des années 1930-1960 (C)	3	
	C – changement vers un modèle de chenal différent à celui des années 30-60 (uniquement PC-U)	6	
V2	A – changement absents ou limités (<15%) depuis les années 1930-1960	0	
	B – changement modérés (15/35%) par rapport à celui des années 1930-1960 (PC-U) ou changement >15% par rapport à celui des années 1930-1960 (C)	3	
	C – changement intenses (>35%) par rapport à ceux des années 30-60 (uniquement PC-U)	6	
V3	A – changements négligeables au niveau du lit (<0.5m)	0	
	B – changement limités ou modérés du niveau du lit (0.5-3m)	4	
	C1 – changements intenses du niveau du lit (>3m)	8	
	C2 – changements très intenses du niveau du lit (>6m) (uniquement PC-U)	12	

Sur le terrain
SIG et télédétection
Les deux

Total	
Total max	C = 119
	PC-U = 142

Nom du cours d'eau			
Type de confinement			
Sigles	Classes	Score	Équivalence
Fonctionnalités			
Continuité			
F1 <i>BarAmt</i>	A – absence d'altération dans la continuité des sédiments et du bois B – légère altération (obstacles aux flux mais sans interception) C – altération significative (interception complète des sédiments et du bois)	0 3 5	Non Partiel oui
F2 <i>Largeur Fond de Vallée syrah/ largeur plein bord Carhyce Largeur Qb</i>	PC-U uniquement A – présence d'une plaine inondable contemporaine continue ($>66\%$ de la portée) et large ($>nW$, où $n=1$ pour les chenaux errant ou simple et 2 pour les chenaux en tresse ou en anastomose et W =largeur du canal) B1 – présence d'une plaine d'inondation contemporaine discontinue (10-66%) mais large ou $>66\%$ mais étroite B2 – présence d'une plaine d'inondation contemporaine discontinue (10-66%) et étroite C – absence de plaine inondable contemporaine ou présence négligeable ($\leq 10\%$ de toute la largeur)	0 2 3 5	
F3 <i>Syrah pourcen tage-de route/ch emin-de fer en plaine alluviale TauxV Com'</i>	C uniquement A – connectivité complète entre les versants et le couloir fluvial ($>90\%$) B – connectivité pour une partie importante (33-90%) C – connectivité pour une petite partie ($\leq 33\%$)	0 3 5	
F4	PC-U uniquement A – l'érosion des berges se produit pour $>10\%$ et est répartie sur $>33\%$ de la portée B – l'érosion des berges se produit pour $\leq 10\%$, ou pour $>10\%$ mais est concentré le long de $\leq 33\%$, ou une présence significative ($>25\%$) de berges en érosion par des défaillances massives C – absence complète ($\leq 2\%$) de berges en retrait, ou présence généralisée ($>50\%$) de berges instables par défaillance de masse	0 2 3	
F5 <i>Utiliser le TauxV Com' dans</i>	PC-U uniquement A – présence d'un couloir potentiellement érodable (EC) pour une longueur $>66\%$ et large ($>nW$, où $n=1$ pour les chenaux errant ou simple et 2 pour les chenaux en tresse ou en anastomose et W =largeur du canal) B – présence d'un EC étroit ($<nW$) $>66\%$ ou large mais pour 33-66%	0 2	

<i>syrah</i>	C – présence d'un EC sur toute la largeur mais pour ≤33% Plus les voies de communication sont importantes plus on va avoir un couloir potentiellement érodable faible	3	
Morphologie			
<i>Configuration morphologique</i>			
F6 <i>ROE snapé sur les USRA</i>	C uniquement		
	A – formes du lit conformes à la pente moyenne de la vallée	0	Si 0 ROE
	B – formes de lit non conformes à la pente moyenne de la vallée	3	Si 1 ROE
	C – altération complète des formes du lit ou présence d'un lit artificiel	5	Si + de 1 ROE
F7 <i>Morpho Facies Retenue</i>	A – absence (≤5%) d'altération de l'hétérogénéité naturelle des unités géomorphiques et de la largeur du canal	0	Nul
	B – altération pour une portion limitée du tronçon (≤33%)	3	Faible / Moyen
	C – altération cohérente pour une portion significative du tronçon (>33%)	5	Fort
F8	PC-U uniquement		
	A – présence de formes fluviales de plaines inondables (lacs, méandres, chenaux secondaires, etc.)	0	
	B – présence de formes fluviales de plaine inondable (abandonnés au cours des dernières décennies) mais avec réactivation possible	2	
	C – absence formes fluviales de plaine inondable	3	
<i>Configuration de tronçon</i>			
F9 <i>Morpho Facies Accel</i>	A – absence (≤5%) d'altération de l'hétérogénéité naturelle du tronçon transversale	0	Non
	B – présence d'altération pour une partie limitée du tronçon (≤33%)	3	Si B pour F7
	C – présence d'altération pour une partie significative du tronçon (>33%)	5	Si C pour F7
F10 <i>Morpho Colmat</i>	A – hétérogénéité naturelle des sédiments du lit et pas de colmatage significatif	0	Nul
	B – pavage évident (PC-U uniquement) ou colmatage dans diverses parties du site	2	Faible
	C1 – pavage évident et répandu (>90%) (PC-U uniquement), colmatage ou enfouissement (≤50%) ou affleurements occasionnels de substrat (PC-U uniquement)	5	Moyen
	C2 – enfouissement évident (>50%) ou affleurement de substrats répandus (>33%) (PC-U uniquement) ou altération généralisée du substrat par des revêtements de lit (>33%)	6	Fort
F11 <i>Taux de débris ligneux/embâcle via les données Carhyce qu'on appellera Taux Embâcle</i>	A – présence significative de matériaux ligneux sur tout le tronçon	0	>50%
	B - présence négligeable de matériaux ligneux pour ≤50% du tronçon	2	Entre 25 et 50%
	C – présence négligeable de matériaux ligneux pour >50% du tronçon	3	<25%
Ripisylve			

F12 <i>CODE_ERI</i> <i>Carhyce</i> <i>Rang</i>	A – ripisylve connectée large (PC-U : $>nW$, où $n = 1$ ou 2 pour les canaux errants - tressés ou pour fil unique - anabranches, respectivement, et W = largeur du canal; C : > 90% des versants, 50 m sur chaque rive)	0	5
	B – largeur intermédiaire de la ripisylve connectée (PC-U : 0,5 $W \div nW$; C : 33 ÷ 90% des versants, 50 m sur chaque rive)	2	3&4
	C – végétation ripisylve connectée étroite (PC-U : $\le 0,5 W$; C : $\le 33\%$ des pentes, à 50 m de chaque rive)	3	0&1&2
F13 <i>CODE_CRI</i> <i>Carhyce</i> <i>Rang</i>	A – extension linéaire de la végétation rivulaire >90% de la longueur max disponible	0	6&5
	B – végétation rivulaire 33-90%	3	4
	C – végétation rivulaire $\le 33\%$	5	1&2&3

Artificialités

Travaux de modification de la continuité longitudinale en amont

A1 m <i>Hydro</i> <i>Regim</i> <i>Modif</i>	A – pas d'altération significative ($\le 10\%$) des débits morphogènes (intervalle de retour de 1.5 à 10 ans) et Q avec intervalle de retour >10 ans	0	Nul
	B – altération significative ($>10\%$) de Q avec intervalle de retour >10 ans	3	Faible / Moyen
	C – altération significative ($>10\%$) des décharges formant des chenaux	6	Fort
A2 <i>Transport</i> <i>Solide +</i> <i>Hydro</i> <i>QRes</i>	A – absence ou présence négligeable de structures d'interception des flux de sédiments	0	Nul
	B1 – présence de barrage avec zone de drainage 5-33% et / ou barrage de contrôle avec interception totale des zones de charge et de drainage 33-66% et / ou barrage ou barrage de contrôle avec couche de fond et des zones de drainage $>33\%$ (zone de plaine/colline), ou $>66\%$ (zone de montagne)	3	Faible
	B2 – présence de barrages pour la zone de drainage 33-66%, et / ou déversoirs ou vérifier les barrages avec interception totale de la couche de fond et des zones de drainage $>66\%$	6	X
	C1 – présence de barrage pour la zone de drainage $>66\%$	9	Fort
	C2 – présence d'un barrage à la limite amont du tronçon	12	Si Hydro QRes est non nul

Travaux de modification de la continuité longitudinale dans le tronçon

A3 <i>ROE</i> <i>huteur de</i> <i>barrage</i>	A – pas d'altération significative ($\le 10\%$) des débits morphogènes et Q avec intervalle de retour >10 ans	0	<2m
	B – altération significative ($>10\%$) de Q avec intervalle de retour >10 ans	3	Entre 2 et 3m
	C – altération significative ($>10\%$) des décharges formant des chenaux	6	>3m
A4 <i>ROE</i>	A – absence de structures qui interceptent le flux sédimentaire (barrages, barrages de retenue, déversoirs)	0	<1m
	B – chenaux avec $S \le 1\%$: barrage de vérification de la consolidation et / ou déversoirs de captage (y compris les bassins de rétention réservés) ≤ 1 tous les km ; chenaux pentus ($S > 1\%$) : barrages / barrages de contrôle de consolidation ≤ 1 tous les 200m et / ou un ou plusieurs barrages de contrôle de rétention Ou présence d'un barrage ou d'un réservoir artificiel à la limite aval du tronçon (toute pente du lit)	4	Entre 1 et 3 m
	C – pour les pentes supérieures à 1% : présence de barrages de contrôle et de déversoir >1 tous les 200m et / ou 1 ou plusieurs barrages de rétention pour les chenaux $S \le 1\%$: présence de barrages de contrôle et / ou déversoir >1 tous les 1000m ou présence d'un barrage et / ou réservoir artificiel dans le	6	>3m

	tronçon en limite aval		
	<i>Lorsque les ouvrages d'art, y compris les seuils de lit et les rampes (A9), sont >1 tous les d1, ajouter</i> <i>Lorsque les ouvrages d'art, y compris les seuils de lit et les rampes (A9), sont >1 tous les d2=100m, ajouter</i>	6 12	Si plus de 2 ROE >3m
	<i>D1=150m et d2=100m dans les chenaux escarpés, d1=750m et d2=500m dans les chenaux avec S≤1%</i>		
A5 <i>ROE</i>	A – absence de structure de franchissement (pont, gué) B – présence de certaines structures de franchissement (≤1 tous les km en moyenne dans le tronçon) C – présence de nombreuses structures de franchissement (>1 tous les km)	0 2 3	0 ROE 1 ROE + que 1 ROE
Travaux qui altèrent la continuité latérale			
A6 <i>Morpho Berges et Carhyce (taux entre berges artificialisées et berges totales)</i>	A – absence ou présence localisée de protection de berges (≤5% sur la longueur totale des berges) B – présence de protections pour ≤33% de la longueur totale des berges (somme des deux berges) C – présence de protections pour >33% de la longueur totale des berges (somme des deux berges) Pour une densité élevée de protection de berges (>50%) ajouter Pour une densité très élevée de protection de berges (>80%) ajouter	0 3 6 6 12	Nul Faible Moyen Fort (si c'est sup à 80% utiliser ratio carhyce)
A7 <i>Morpho DigMaj</i>	PC-U uniquement		
	A – levées absentes, en retrait ou présentes et en contact ≤5% de longueur totale des berges	0	Nul
	B – présence moyenne de levées proches et/ou en contact (≤50% de longueur de berge)	3	Faible
	C – forte présence de levées proches et/ou en contact (en contact >50% de longueur de rive)	6	Fort
	<i>Pour une forte densité de levées de bordure (>66%) ajoutez</i> <i>Pour une densité extrême de levées de rive (>80%), ajoutez</i>	6 12	X
Travaux de modification de la morphologie du lit de la rivière et/ou du substrat			
A8 <i>Morpho Rectif</i>	PC-U uniquement		
	A – absence de modifications artificielles du cours du fleuve dans le passé (coupe de méandres, détournement des chenaux, etc.)	0	Nul
	B – présence de changements pour ≤10% de la longueur de portée	2	Intermédiaire
	C – présence de changements pour >10% de la longueur de portée	3	Rectifié
	<i>Dans le cas de travaux historiques de drainage et de dragage pour >50% de la portée (lorsqu'une note supplémentaire n'est pas déjà appliquée pour A6 et/ou A7) ajoutez</i> <i>Dans le cas de travaux historiques de drainage et de dragage pour >80% de la portée (lorsqu'une note supplémentaire n'est pas déjà appliquée pour A6 et/ou A7), ajoutez</i>	6 12	X
A9	A – absence de structure (seuils de lit/rampes) et revêtements	0	

	B – présence limitée de structures (≤ 1 tous les n , où $n = 200m$ pour les zones de montagnes, $n = 1000m$ pour les zones de plaines et de collines) et/ou de revêtements ($\leq 15\%$ imperméable et/ou $\leq 25\%$ perméables)	3	
	C1 – présence de nombreuses structures (> 1 tous les n) et/ou revêtements de lit importants ($\leq 33\%$ imperméable et/ou $\leq 50\%$ perméable)	6	
	C2 – présence de revêtement de lit imperméable $> 33\%$ et/ou de revêtements perméables $> 50\%$	8	
	Pour une densité de revêtement extrêmement élevée (imperméable $> 80\%$) ajoutez	12	

Opérations d'entretien et de collecte

A10 <i>Morpho Recal</i>	PC-U uniquement		
	A – absence d'activités d'enlèvement de sédiments importantes récentes (20 dernières années) et passées (au cours des 100 dernières années)	0	Nul
	B1 – activité d'élimination des sédiments dans le passé mais absence au cours des 20 dernières années	3	Intermédiaire
	B2 – activité récente d'élimination des sédiments (20 dernières années), mais absence au cours des 4 dernières années	4	
	C – activité d'élimination des sédiments dans le passée et au cours des 20 dernières années	6	Recalibré
A11 <i>Morpho Ripisylve</i>	C uniquement		
	A – absence d'activité importante d'élimination des sédiments au cours des 20 dernières années	0	Nul
	B – activité d'élimination localisée des sédiments au cours des 20 dernières années	3	Intermédiaire
	C – activité d'enlèvement de sédiments généralisée au cours des 20 dernières années	6	
	A – absence d'élimination des matières ligneuses au moins au cours des 20 dernières années	0	
	B – enlèvement partiel de bois sur les 20 dernières années	2	
	C – enlèvement total de bois sur les 20 dernières années	5	
A12 <i>Morpho Ripisylve</i>	A – pas d'interventions de coupe sur la végétation ripisylve (20 dernières années), et la végétation aquatique (5 dernières années)	0	Nul
	B – coupes sélectives et/ou coupes à blanc sur $\leq 50\%$ de la portée (20 dernières années) et coupe partielle ou nulle de la végétation aquatique (5 dernières années), ou pas de coupe de la ripisylve mais coupe partielle ou totale de la végétation aquatique	2	Faible / Moyen
	C – coupes claires sur $> 50\%$ de la portée (20 dernières années), ou coupe sélectives et/ ou coupes claires de ripisylve $\leq 50\%$ de la portée mais coupe totale de la végétation aquatique (5 dernières années)	5	Fort
	Variations morphologiques		

V1	A – absence de changements dans la configuration des chenaux depuis les années 30-60	0	
	B – changement d'un modèle de chenal similaire à celui des années 1930-1960 (PC-U) ou changement de modèle de chenal des années 1930-1960 (C)	3	
	C – changement vers un modèle de chenal différent à celui des années 30-60 (uniquement PC-U)	6	
V2	A – changement absents ou limités ($\leq 15\%$) depuis les années 1930-1960	0	
	B – changement modérés (15/35%) par rapport à celui des années 1930-1960 (PC-U) ou changement $> 15\%$ par rapport à celui des années 1930-1960 (C)	3	
	C – changement intenses ($> 35\%$) par rapport à ceux des années 30-60	6	

	(uniquement PC-U)		
✓3	A—changements négligeables au niveau du lit ($\leq 0.5m$)	0	
	B—changements limités ou modérés du niveau du lit (0.5-3m)	4	
	C1—changements intenses du niveau du lit ($>3m$)	8	
	C2—changements très intenses du niveau du lit ($>6m$) (uniquement PC-U)	12	

	Sur le terrain
	SIG et télédétection
	Les deux

Total	
Total max	

	Pas de correspondance dans l'IPR ou ailleurs
	Correspondance possible