

Analyse multi-échelles des filtres environnementaux limitant l'invasibilité des berges de cours d'eau par les renouées asiatiques (*Fallopia* sp.): le cas de la Saône

Rapport final

Action n° 42 du Programme 2010 au titre de l'accord cadre Agence de l'Eau ZABR

PIOLA Florence (UMR 5023 LEHNA)

NAVRATIL Oldrich (UMR 5600 EVS)

PUIJALON Sara (UMR 5023 LEHNA)

LEJOT Jérôme (UMR 5600 EVS)

Rapport rendu le 14/11/2016



Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Sommaire

Remerciements

Index et sigles

1. Introduction
2. Etat de l'art sur la Renouée du Japon
3. Présentation du site d'étude et données utilisées
4. Etude de l'invasibilité à l'échelle des hydro-écorégions
5. Etude de l'invasibilité à l'échelle des bassins de 50-600 km²
6. Etude de l'invasibilité à l'échelle des tronçons
7. Analyses menées en mésocosme
8. Discussion générale
9. Conclusion

Bibliographie

Annexes

Remerciements

Ce projet a été financé dans le cadre de l'accord cadre Agence de l'Eau-ZABR (Zone Atelier Bassin du Rhône). Nous remercions Olivier Gorin, François Chambaud et Stéphane Stroffek de l'Agence de l'Eau pour l'accompagnement de ce projet.

Il a bénéficié de la participation de nombreuses personnes :

- Fropier Céline, Marchand Jeannice, Martin Bruno lors d'un projet tuteuré en master 2 Cogeval'eau de 3 mois à l'IRG-EVS sur le recueil des données SIG, leur bancarisation et des relevés terrain (Fropier et al., 2014) ;
- Dorian Rachex, en stage de 6 mois (master 1 INS, Lyon2) à l'IRG-EVS, pour le développement de la partie télédétection de la renouée sur la Saône et les levés terrains (Rachex, 2014) ; Marine Sabastia, en stage de 6 mois (master 1 INS, Lyon2) à l'IRG-EVS, pour la constitution de l'état de l'art, la mise en place de la base de données SIG à l'échelle du RHT et les levés terrains (Sabastia, 2015) ;
- Nicolai Brekenfeld, en CDD recherche pour 5 mois à l'IRG-EVS, pour les analyses statistiques spatialisées (Brenkefeld, 2016) ;
- Angéline Ragougneau, en CDD de 4 mois au LEHNA, pour des relevés de terrain et des expérimentations en mésocosmes ;
- Benjamin Neyret, en stage de 2 mois (Licence BOP, Lyon 1).

Nous tenons à remercier le bureau d'étude Concept Cours d'EAU et Mireille Boyer pour leur mise à disposition des données de présence des renouées sur le bassin RM et Corse, Stéphane Dray (CNRS LBBE) pour ses conseils méthodologiques, Nicolas Lamouroux et Hervé Pella (IRSTEA Lyon) pour leur mise à disposition de la base RHT et les organismes producteurs et gestionnaires de données (Agence de l'Eau, EPTB Saône Doubs, syndicat de l'Azergues, IGN, BRGM).

Index et sigles

RHT : Réseau Hydrographique Théorique

ONEMA : Office national de l'eau et des milieux aquatiques

SYRAH : Système Relationnel d'Audit de l'Hydro-morphologie

AERMC : Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse

SIG : Système d'Information Géographique

RMC : Rhône-Méditerranée-Corse

ZABR : Zone Atelier Bassin du Rhône

IGN : Institut national de l'information géographique et forestière

CARMEN : CARTographie du Ministère de l'ENvironnement

GLM : Modèle Linéaire Généralisé

EPTB : Etablissement Public Territorial du Bassin

SSN : Spatial Stream Network

FP : Faux Positif

RSMPE : Erreur quadratique moyenne

ISSG : Invasive Species Specialist Group

IUCN : Union internationale pour la Conservation de la Nature et des Ressources naturelles

LEHNA : Laboratoire UMR-CNRS d'Ecologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés

EVS : Laboratoire UMR-CNRS Environnement Ville Société

HER : Hydroecorégion

1. Introduction

1.1. Contexte de l'étude et problématique de recherche

La renouée du Japon est une plante herbacée originaire d'Asie du Sud-est. Introduite en Europe au XIX^{ème} siècle par un médecin botaniste du nom de Philipp Von Siebold, elle est au départ importée pour ses qualités mellifères et ornementales. En 1874, elle obtient une médaille d'or par la Société d'agriculture et d'horticulture (Pashley et al, 2003). Malgré cela, cette plante allochtone colonise doucement des milieux inaptes à la concurrencer, s'étendant alors progressivement à travers l'Europe. Décrite aujourd'hui comme une espèce invasive, elle est par ailleurs considérée par l'ISSG (Invasive Species Specialist Group) de l'IUCN (Union internationale pour la Conservation de la Nature et des Ressources naturelles) comme l'une des cent espèces exotiques les plus néfastes au monde.

Le complexe d'espèces invasives *Fallopia* ou les renouées (*F. japonica*, *F. sachalinensis* et leurs hybrides *F. x bohemica*) colonise activement les zones alluviales des cours d'eau. Dans ces hydrosystèmes, la bonne alimentation en eau et la richesse du sol en éléments minéraux pourraient lui conférer des performances particulièrement élevées, menant à des peuplements monospécifiques. Les berges peuvent être rapidement colonisées par les renouées qui concurrencent ainsi les espèces natives. En région Rhône-Alpes, certains cours d'eau sont particulièrement envahis (peuplements monospécifiques sur des linéaires) et représentent des foyers de propagules végétatives (fragments de tiges et de rhizomes) et sexuées (akènes). D'autres, alors même que leurs affluents sont très colonisés, ne présentent pas un degré d'invasion important en terme de nombre de foyer d'implantation de la plante et de taille des peuplements. Il existe donc probablement des filtres environnementaux limitant l'installation et la croissance de l'invasive. La rivière Saône semble présenter des tronçons avec un envahissement faible voire nul en dépit de la présence d'affluents fortement envahis (ex. Azergues, Brévenne). Cette rivière et son bassin versant peuvent donc constituer un modèle d'étude intéressant pour identifier les facteurs ou filtres environnementaux limitant localement l'installation et la prolifération de *Fallopia*.

La Zone d'Atelier Bassin du Rhône (ZABR) et l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée et Corse (AERMC) ont souhaité lancer un projet pluridisciplinaire impliquant les UMR-CNRS LEHNA et EVS, permettant ainsi la rencontre entre la géographie et la biologie. Le projet ZABR Action 42 intitulé : « *Analyse multi-échelles des filtres environnementaux limitant l'invasibilité des*

Zone Atelier Bassin du Rhône

berges de cours d'eau par les renouées asiatiques (Fallopia sp.): le cas de la Saône » vise à une meilleure compréhension de la distribution spatiale de la plante et à l'amélioration de nos connaissances sur l'invasibilité des milieux. Par « invasibilité », nous entendons le degré de vulnérabilité d'un écosystème face à l'invasion d'un agent perturbateur. La Renouée ayant envahi une bonne partie des cours d'eau situés au nord du bassin RMC, il semble important de mieux appréhender son comportement pour parer à une installation et une prolifération à l'aval du bassin RMC. Pour cela, il sera important de déterminer un degré de vulnérabilité des cours d'eau face à la prolifération de cette plante. Notre problématique de recherche peut alors se résumer de la manière suivante : « Dans quelles mesures les caractéristiques physiographiques et anthropiques des cours d'eau et de leur ripisylve jouent-elles un rôle dans l'implantation et la prolifération de la renouée du Japon dans le réseau hydrographique ? ».

Les résultats devraient, à terme, permettre aux gestionnaires de travailler sur une gestion plus ciblée et donc plus adaptée en fonction des caractéristiques propres de leur bassin versant et de leurs cours d'eau.

1.2. *Cadre méthodologique et plan du rapport*

Après avoir rappelé les grandes caractéristiques de cette plante et les enjeux associés à sa dispersion dans les écosystèmes fluviaux (section 2), nous présenterons le bassin RMC et le bassin Saône-Doubs, ainsi que les jeux de données utilisés (section 3). Pour cette étude, nous avons rassemblé (1) de nombreuses données SIG collectées auprès des gestionnaires et organismes publics (variables dites explicatives), (2) des données de densité de renouée collectées à l'échelle du bassin RMC en 2001 par Boyer (2001), (3) des données de renouée collectées sur le terrain de 2010 à 2015 sur le bassin Saône-Doubs et enfin (4) des échantillons de renouée et de sols sur différents sites pour effectuer des tests en laboratoire. L'invasibilité des milieux rivulaires par la renouée sera alors étudiée selon différentes approches et échelles complémentaires.

Notre méthode a consisté à travailler à différentes échelles spatiales afin de croiser les résultats et fournir des modèles robustes et réalistes. Disposant de données de présence de la renouée à l'échelle RMC (jeux de données de Boyer, 2001), nous avons considéré pertinent de travailler tout d'abord à très large échelle, i.e. le bassin Rhône-Méditerranée et Corse et ensuite sur le bassin Saône-Doubs. Nous chercherons dans un premier temps à comprendre comment les

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

renouées se distribuent spatialement selon les HydroEcoRégions HER 1 et HER2 (section 4). Nous analyserons ensuite comment les facteurs physiographiques, climatiques et anthropiques à l'échelle de bassins de 50 à 600 km² peuvent expliquer la présence/absence de renouée sur ces bassins (section 5). Nous travaillerons ensuite à l'échelle du réseau hydrographique en considérant des tronçons homogènes (appelés aussi arcs de cours d'eau) définis par le Réseau Hydrographique Théorique (RHT, Pella et al, 2012). Pour distinguer les caractéristiques de prolifération de la renouée à l'échelle de ces arcs et sa dispersion dans le réseau hydrographique, nous avons utilisé une adaptation du Modèle Linéaire Généralisé (noté GLM) récemment proposée par van Hoef et al. (2006) et Peterson et al. (2013) qui permet de prendre en compte, d'une part la variance associée à des variables explicatives locales ou de bassin (climatiques, occupation du sol, hydrologique, géomorphologique...), et d'autre part la covariance spatiale (section 6). Cette dernière est très importante à considérer lorsque l'on analyse des observations biologiques distribuées sur un réseau hydrographique impliquant donc une forte autocorrélation spatiale. A cette étape, nous utiliserons les données diachroniques collectées sur 9 cours d'eau affluents de la Saône pour choisir le ou les modèles les plus pertinents. Enfin, une dernière approche a consisté à venir tester en mésocosme, i.e. milieu contrôlé en laboratoire, des hypothèses complémentaires aux approches précédentes (section 7). Nous proposerons enfin une discussion générale (section 8) et une conclusion (section 9) présentant les perspectives de recherche et opérationnelles de ces travaux.

2. Présentation du modèle Renouées

2.1. Caractéristiques générales de la plante

Les renouées du Japon sensu lato ou *Fallopia* spp (Figure 1) forment un complexe d'espèces comprenant 3 principaux taxa : *F. japonica*, *F. sachalinensis* et *F. x bohemica*. La confusion entre les espèces est fréquente tant dans leur désignation que dans leur identification. L'implication de plusieurs taxa est une source de confusion, qui est accentuée par le fait que les renouées envahissantes soient désignées par plusieurs noms dans la littérature scientifique. Par exemple, pour le taxon de la renouée du Japon, on peut trouver les dénominations *Polygonum cuspidatum*, *Reynoutria japonica* ou *Fallopia japonica*.

Fallopia japonica var *japonica* (appelée ci-après seulement *F. japonica*, pour des raisons de simplification) est présente largement en Grande Bretagne, en France et en Europe Centrale, de la côte Atlantique à la mer Noire et des côtes Sud de Norvège et Finlande jusqu'au Nord du Portugal (Beerling et al., 1995, figure 5). En Europe, il n'existe qu'un seul génotype de *F. japonica*. *F. sachalinensis*, moins répandue que *F. japonica*, a été introduite au milieu du 19ème siècle (Bailey et Conolly, 2000). Cette espèce peut atteindre 4m de hauteur et ses feuilles mesurer 40cm sur 20cm. Par rapport à sa zone native où elle est tétraploïde, en Europe on trouve des populations tétraploïdes, hexaploïdes et octoploïdes (Bailey et al., 2009). Ce taxon, gynodioïque, a la capacité de s'hybrider avec les deux précédents. L'hybride *F. x bohemica* lui aussi fertile, est capable de se reproduire avec ses parents (Bailey et al., 2009). Ce taxon, bien distribué, a donc une grande diversité génétique, avec trois niveaux de ploïdie. Cette diversité génétique s'accompagne d'une grande diversité morphologique, puisque tous les intermédiaires entre *F. japonica* et *F. sachalinensis* sont possibles. On distingue les taxa grâce à la forme de la feuille (figure 5) et à la présence de trichomes sur la face inférieure du limbe (Bailey et al., 2009 ; Bailey et Wisskirchen, 2006).

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône



Figure 1 : *Fallopia japonica* ou Renouée

Pour éviter les confusions, au cours de ce rapport, nous utiliserons les termes : « Renouée », « *Fallopia* », « Renouée du Japon » ou « Renouées asiatiques », pour désigner les trois taxa de renouées qui nous intéressent : *F. x bohemica* ou Renouée de Bohême, *F. japonica* ou Renouée du Japon et *F. sachalinensis* ou Renouée de Sakhaline (Tableau 1).

Tableau 1 : Descriptif des caractères morphologiques de *Fallopia japonica*, *Fallopia x bohemica* et *Fallopia sachalinensis* (d'après Boyer, 2001 et Bailey et Wisskirchen, 2006).

caractères / espèces	<i>Fallopia japonica</i>	<i>Fallopia x bohemica</i>	<i>Fallopia sachalinense</i>
tâches sur les tiges	tiges densément tachetées de rouge brun	tiges plus ou moins tachetées de rouge brun	pas de tâche (Idécoloration des tiges possibles en fin de saison et confusion possible avec l'hybride!)
nervure principale des feuilles	presque carré	carré à légèrement rond	nettement arrondi
base de la feuille	tronquée	tronquée ou +/- cordée	cordée
extrémité de la feuille	cuspidée	cuspidée ou pointue	pointue
pilosité sous les feuilles	sans poils mais avec des ornements aussi larges que hautes	avec des poils courts et vigoureux jusqu'à 0.5 mm de long	long poils souples de plus de 1 mm
longueurs des feuilles sur la tige principale	10-18 cm les feuilles sur les tiges secondaires sont de la même taille que celles sur la tige principale ou légèrement plus petites	20-35 cm les feuilles sur les tiges secondaires sont plus petites que celles sur la tige principale	30-40 cm les feuilles sur les tiges secondaires sont plus petites que celles sur la tige principale
hauteur de la plante	1.5 – 2.5 (3.0) m	2.5-3.5 (4.0) m	3 – 4.5 m
épaisseur des feuilles	épaisse, coriace	dure mais non coriace	fine, douce
couleur des fleurs	blanches	blanches	mâle stérile ("femelle") : verdâtres mâle fertile : blanches
inflorescences mâle stérile ("femelle")	panicules moyennes partant dans diverses directions	panicules moyennes partant dans diverses directions et cambrées	panicules plutôt courtes partant dans diverses directions
inflorescences mâle fertile	panicules toujours dressées et très longues (très rare)	panicules toujours dressées et longues	panicules dressées et moyennes

La partie aérienne de la plante pousse au cours du printemps et il faut attendre juillet pour voir la plante fleurir. Les rhizomes peuvent mesurer jusqu'à 15 à 20 mètres de long bien qu'ils

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

fassent le plus souvent entre 5 et 6 mètres (Fuchs, 1957; Locandro, 1973). Leur capacité à s'étendre sur plusieurs mètres est un des caractères les plus représentatifs des aptitudes de la plante à conquérir de nouveaux espaces.

Les renouées sont observées sur tous types de sols, ayant un pH allant de 3 à 8, mais toujours dans des sols ayant un taux d'humidité élevé (Bimova et al., 2004; Barney, 2006). Il est également admis que les renouées ont une préférence pour les milieux sujets à des perturbations anthropiques ou naturelles tels que les bords de routes, les zones de dépôts de remblais, les friches anthropiques, les bords de rivières, etc... (Tiebre et al., 2008). La plante qui supporte des conditions hydriques assez variables ne supporte cependant pas une submersion durable.

Bien que la Renouée soit capable de se développer dans un substrat pauvre en nutriments (Barney et al., 2006), elle préfère coloniser des sols où l'*eutrophisation* est importante (Dassonville et al., 2008) où ses aptitudes compétitives seront supérieures comparées à un environnement pauvre en nutriment (Rouifed, 2011). De plus, ce sont des plantes qui demandent un ensoleillement important, même si elles peuvent supporter un ombrage léger. Parfois, elles poussent exceptionnellement en forêt, même si leur production et leur croissance s'en trouvent affectées (Kosmale, 1981).

La plante a la capacité de produire de nombreux métabolites secondaires, notamment des substances chimiques allélopathiques, contribuant à éliminer les autres plantes (Piola et al. 2013 ; Fan et al. 2010 ; Murell et al. 2011 ; Barral, 1994) ou contrôler le cycle de l'azote en inhibant l'activité des bactéries dénitrifiantes (Bardon et al. 2014).

2.2. *Reproduction sexuée et asexuée*

La plante se reproduit par une multiplication végétative intense mais également par une reproduction sexuée efficace. La reproduction asexuée ou végétative permet à la plante de se dupliquer à partir d'un morceau de rhizome ou de tige comportant un nœud (Brock et al, 1995). Brock et Wade (1992) ont constaté que 70% des rhizomes de la Renouée du Japon, d'un poids moyen de 4,4 g, se régénèrent et 5% pour des fragments de 1 cm de long et de 0,7 g. Néanmoins, la régénération à partir de fragment de rhizome est plus efficace que celles des tiges notamment pour la Renouée du Japon et la renouée de Bohême (Bimová et al., 2003).

Il faut aussi noter que les tiges de la Renouée se régénèrent beaucoup mieux dans l'eau que dans ou sur le sol, à l'inverse des rhizomes qui ont une préférence pour le sol (Bimová et al., 2003).

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

En ce qui concerne la reproduction sexuée, les taxa du complexe *Fallopia* produisent des akènes ailés capables de flotter et d'être dispersés par les cours d'eau (Rouifed et al. 2011). *F. japonica* dont seuls des pieds mâles stériles avaient été introduits au départ, a longtemps été considérée comme ne se reproduisant pas par voie sexuée. Or, d'après des travaux menés en Grande Bretagne (Pachley et al., 2003) il apparait que celle-ci a la capacité de se reproduire également par reproduction sexée. En effet, dès leur introduction, les deux espèces *F. japonica* et *F. sachalinensis* se sont hybridées et ont produit des descendants fertiles *F. x bohémica*. Ces hybrides polyploïdes présentent une importante diversité génétique et des rétrocroisements avec les espèces parentales se sont produites et se produisent encore.

2.3. *Facteurs d'invasibilité des écosystèmes fluviaux*

Les capacités de la plante à se reproduire ne sont pas les seules raisons responsables du succès de son invasion. En effet, le milieu où elle s'établit joue aussi un rôle important, notamment concernant les ressources que celui-ci abrite. Cela est décrit comme la théorie de la disponibilité des ressources fluctuantes. Tout ce qui peut provoquer une augmentation des ressources disponibles ferait augmenter, dans le même temps, la vulnérabilité de l'écosystème à une invasion si il y a au même moment, introduction de propagules (David et al., 2004).

Le milieu rivulaire présente un risque plus élevé d'envahissement dû à la dynamique hydro-morphologique (colonisation amont aval de proche en proche). L'eau est un moyen de dispersion pour la plante. Des crues répétées dans certains bassins, font des milieux rivulaires des zones très sensibles à la dissémination et l'implantation de propagules (Pyšek et Prach, 1993). Enfin, on constate la quasi-totale absence de prédateurs ou de compétiteurs susceptibles de concurrencer la plante. Dans son aire d'origine, elle est intégrée dans la communauté végétale et elle est utilisée pour ses propriétés médicinales en raison de la richesse de son métabolisme secondaire. Contrairement aux pays qui sont actuellement touchés par une invasion de renouées, la considérant ainsi comme une espèce nuisible, les pays de l'Asie du Sud-est dont elle est originaire ne la considèrent pas différemment des autres espèces allochtones. Elle ne pose pas de problème notamment parce qu'elle est concurrencée par la flore locale ou consommée par des herbivores locaux.

2.4. *Impacts associés à la présence de la plante le long des cours d'eau*

Zone Atelier Bassin du Rhône

Il découle de tout ce qui a été dit précédemment que la Renouée est, en France, et particulièrement au Nord-ouest du bassin Rhône-Méditerranée-Corse, un véritable élément de perturbation, tant pour les écosystèmes rivulaires que pour la population environnante. Ces impacts sont de deux ordres : écologiques et socio-économiques.

2.4.1. Impacts écologiques

La renouée semble effectivement avoir un certain nombre d'effets négatifs, principalement sur l'environnement proche des cours d'eau et sur le fonctionnement même de ces derniers. Bien que moins préoccupants pour nous, nous notons également des effets nuisibles sur le paysage, les réseaux de transport et les usages liés à la pratique des cours d'eau. Par ailleurs, nous ne négligeons pas non plus les conséquences économiques que cela engendre en termes de lutte et de gestion.

Les feuilles de la plante, nous l'avons vu, peuvent être très grandes et aussi nombreuses. Elles créent donc un ombrage très important (Shaw et al., 2006) limitant la lumière arrivant au sol et donc le développement de certaines herbacées. Plusieurs études ont montré que la diversité des espèces végétales est plus faible sous les renouées (Aguilera et al., 2010 ; Maurel et al., 2010 ; Gerber et al., 2008). De plus, son pouvoir allélopathique accentue l'élimination des plantes avoisinantes qui se nécrosent par les racines (Barral, 1994).

Ces perturbations de la flore induisent des modifications sur la faune aquatique et terrestre. Il a en effet été constaté une diminution des herbivores et de leurs prédateurs. Les poissons voient la diversité et la quantité de leurs proies diminuer (Le Guen et Haury, 2010). Finalement, c'est l'ensemble de la chaîne alimentaire qui est perturbée (Kappes et al., 2007 ; Topp et al., 2007). Néanmoins, le dictionnaire de l'écologie rédigé par Ramade (1999) nous explique que les invasions d'espèce allochtones seraient surtout un indicateur de déséquilibre des milieux ; étant déjà fragilisés, ils seraient sujets à une invasion. L'expansion de l'espèce serait donc favorisée une fragilisation de l'écosystème présente avant même l'envahissement.

Bien qu'importée, en partie, pour ses propriétés fixatrices de berges, il est fréquent de lire sur les sites des syndicats ou des associations de rivières que la Renouée produit finalement un effet inverse. Ils mettent en avant une déstabilisation et une prédisposition accrue à l'érosion. (Syndicat de rivière de la Chalaronne, Syndicat intercommunal du bassin de l'Yzeron, Association rivière Rhône-Alpes)

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Cette dégradation des berges serait due, d'une part, à l'absence de végétation sous les tiges en hiver et d'autre part, à l'absence ou au manque d'espèces ligneuses telles que l'Aulne et le Saule. Ces derniers sont en effet de très bons fixateurs de berges et permettent également leur stabilisation. La Renouée développe également un réseau racinaire très faible en dehors des rhizomes. Le diamètre de ces rhizomes est parfois très important et favoriserait donc la fragmentation des berges.

Quant à la chute des tiges dans les cours d'eau, elle peut aussi favoriser la formation d'embâcles dans les petits cours d'eau et ainsi modifier le fonctionnement de ceux-ci. Pour finir, l'ombrage généré par les feuilles et leur décomposition induit une modification biochimique des milieux rivulaires, tant au niveau des sols que de l'eau. Effectivement, nous constatons une modification de la structure des sols due à une importante production de biomasse aérienne (Maurel et al., 2010). Il semble qu'il y ait une homogénéisation des concentrations de nutriments dans le sol. Toutefois, des milieux initialement pauvres sont donc malgré tout enrichis par la présence des renouées (Dassonville et al., 2008).

2.4.2. Impacts socio-économiques

Nous noterons d'autres conséquences qui bien que moins importantes pour notre projet gardent néanmoins une portée négative. On retrouve, des impacts sur les usages liés aux cours d'eau, comme par exemple la pêche, avec les renouées qui gênent parfois l'accès aux berges. Nous retrouvons dans les diverses lectures sur la Renouée que celle-ci aurait un impact négatif sur le paysage. En effet, les imposantes surfaces de la *Fallopia* forment parfois des murs végétaux qui ferment les paysages et banalisent la structure paysagère (Le Guen et al., 2010). Pour toutes les raisons que nous venons de voir, la mise en place d'une gestion pour contrôler la plante est de plus en plus fréquente. Cela engendre néanmoins des coûts financiers très importants, alors que les résultats sont rarement identifiables. A titre indicatif, l'Union Européenne dépense plus de 12 milliards d'euros chaque année pour lutter contre les plantes invasives comme la Renouée (Conférence sur la biodiversité, 2014).

2.5. *L'homme facteur de contrôle et de dissémination*

Comme nous l'avons vu, la Renouée n'est pas originaire d'Europe. Elle a en effet été introduite et plantée par l'Homme qui tente aujourd'hui de la contrôler. La présence humaine

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

semble influencer l'implantation des nouvelles taches. Nous pensons que plus la pression anthropique est élevée, plus les occasions de transporter de la renouée, de la déplacer ou d'agir sur elle de manière plus ou moins raisonnée sont fréquentes.

Maskell et al. (2006) nous confirment que la présence de renouées est fortement corrélée à l'activité humaine. Les zones les plus envahies sont souvent des zones urbaines et anthropisées. Il est courant de trouver de renouées le long des routes, près des remblais, dans des enrochements, etc... Nous pouvons donc penser que plus le taux d'anthropisation est élevé plus la présence de renouée est importante. Les activités humaines sont à l'origine d'une dissémination importante des propagules (Thomas et al., 2011). Elles sont souvent à l'origine des déplacements de terres contaminées vers des milieux encore non colonisés. Le cas le plus représentatif concerne notamment la construction de ponts, de seuils, de digues ou protections de berges. Ces aménagements représentent un risque direct de contamination pour les cours d'eau puisque leur construction demande un apport de remblais et l'utilisation de machines pouvant être contaminées.



Figure 2 : Fauchage en bordure de berge, plants de renouées coupés de couleur rouge-orange

2.6. *Législation*

Depuis quelques années la législation tend à empêcher l'introduction de nouvelles espèces exotiques sur le territoire. En Grande-Bretagne, la loi interdit de disperser volontairement la Renouée et impose de l'éradiquer des terrains constructibles. En Belgique, la

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

renouée est considérée comme une espèce invasive et la plantation est interdite en Wallonie depuis janvier 2013 (Circulaire relative aux plantes exotiques envahissantes, 2013).

La réglementation française par le biais de l'article L.411-3 du Code de l'environnement « prévoit d'interdire l'introduction dans le milieu naturel des espèces exotiques envahissantes. Il interdit aussi leur transport et leur commercialisation. Ces espèces doivent figurer sur des arrêtés interministériels. » La rédaction des arrêtés fixant ces listes est en cours, mais la renouée n'en fait pas encore partie. L'article L.411-3 prévoit aussi que « dès que la présence dans le milieu naturel d'une des espèces visées est constatée, l'autorité administrative peut procéder ou faire procéder à la capture, au prélèvement, à la garde ou à la destruction des spécimens de l'espèce introduite. »

Des éléments plus récents légifèrent sur la question des invasifs :

- Loi n°2016-1087 du 8/08/2016 pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et les paysages ;
- Projet de décret relatif au contrôle et à la gestion de l'introduction et de la propagation de certaines espèces animales et végétales ;
- Règlement européen n°113/2014 du parlement européen et du Conseil de l'Europe du 22/10/2014 relatif à la prévention et la gestion de l'introduction et de la propagation des espèces exotiques envahissantes
- Liste européenne des EEE de juillet 2016

3. Présentation du site d'étude et données utilisées

3.1. Bassin Rhône-Méditerranée-Corse

Notre zone d'étude prend en compte une très grande partie du bassin Rhône-Méditerranée-Corse (Figure 3). Il s'agit donc du même territoire étudié par Boyer (2001) lors de son travail cartographique de localisation de la renouée en 2001. Le bassin Rhône-Méditerranée-Corse couvre 138 450 km², soit 28% du territoire national. Il s'étend de la Lorraine à la Corse, jusqu'au Languedoc-Roussillon. Il prend en compte 5 régions, 31 départements dont 7 en font partiellement partie. Il compte 14 millions d'habitants. (DREAL, 2011 ; EauFrance).

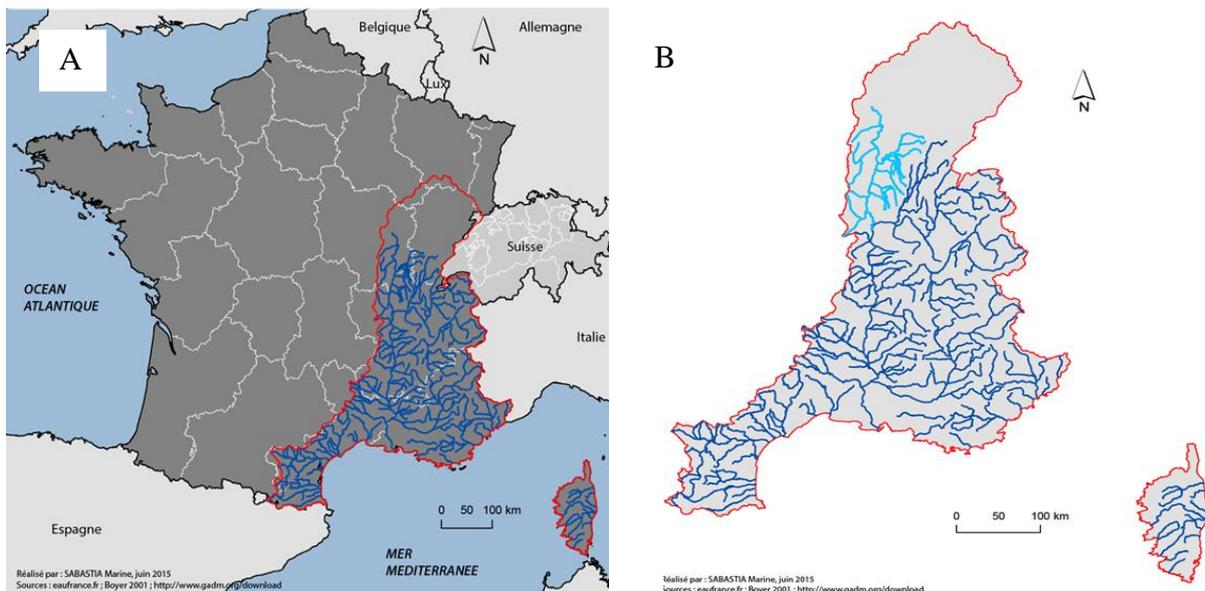


Figure 3 : Localisation de la zone étudiée par rapport au bassin Rhône-Méditerranée et Corse (Fig. 3A) et localisation du secteur d'étude sur la Saône (en bleu clair ; Fig. 3B). Seuls les cours d'eau étudiés ont été représentés (bleu clair sur la Saône et bleu foncé sur le reste du bassin étudié).

Le bassin compte 11 000 cours d'eau et 1 000 km de côtes. Ses ressources hydriques sont importantes et hétérogènes. Son réseau hydrologique est dense et sa morphologie diversifiée. Les glaciers représentent 15.5 milliards de m³ d'eau accumulée. Il réunit aussi une grande quantité de plans d'eau, une importante diversité de masses d'eau souterraines et des zones humides riches et variées.

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Il s'agit d'un bassin aux propriétés hydriques très intéressantes, qui subit un développement touristique et urbain massif. Cela pose alors de nombreuses questions en termes de pollution et de gestion de la ressource en eau. Il faut également prendre en considération la restauration des milieux physiques naturels très fortement impactés par la pression anthropique que subit le bassin (eaurmc.fr).

Le bassin Rhône-Méditerranée-Corse est contenu dans un système de 5 massifs montagneux :

- Le Jura
- Les Vosges
- Le Massif Central
- Les Alpes
- Les Pyrénées

Ces derniers font du bassin un ensemble très diversifié. Le bassin RMC abrite également un grand nombre de systèmes karstiques (les Gorges de l'Ardèche, du Verdon, ...) qui, dans certaines conditions, jouent eux aussi un rôle important dans les variations des débits et les crues (DREAL, 2011).

En 2006, le bassin Rhône-Méditerranée-Corse était occupé à 55% par des zones forestières et des milieux semis-naturels, 37,5% par des territoires agricoles et 5,5% par des sols artificialisés. Les espaces artificiels se développent peu à peu au détriment des terres agricoles (DREAL, 2011). Le réseau hydrographique du bassin RMC est ponctué de plus de 20 000 seuils et barrages (eaurmc.fr, 2013). Ces obstacles entament tout d'abord la continuité écologique et sédimentaire, et sont également un signe d'interventions humaines et donc d'éventuels apports de remblais contaminés par les renouées. Pour ses diverses qualités, tant d'un point de vue environnemental que paysager, le bassin Rhône-Méditerranée-Corse est aujourd'hui sujet à une pression anthropique grandissante.

3.2. *Le bassin Saône-Doubs*

Le bassin Saône-Doubs qui se situe au Nord-ouest du bassin Rhône-Méditerranée-Corse contient le bassin de la Saône. La Saône est le cours d'eau principal du bassin et son affluent principal est le Doubs (Fig. 3B). Le bassin couvre 29 442 km² (49 km² en Suisse). Son réseau hydrographique comprend 9 000 km de rivières (22 000 km pour l'ensemble du chevelu). Ce bassin s'étend sur 5 régions françaises, 2 cantons suisses et 10 départements.

Nous ne nous intéresserons pas au bassin Saône-Doubs dans sa totalité car Boyer (2001) n'avait matérialisé que l'aval du bassin, ne prenant pas en compte la petite Saône et le Doubs

Zone Atelier Bassin du Rhône

puisque'une étude avait déjà été menée par l'Association Echel en 1999. Cette étude n'a malheureusement pas pu être retrouvée pour la Saône amont. Nous ne nous intéresserons donc dans cette étude seulement à la partie aval de la Saône, approximativement, de Chalon-sur-Saône à Lyon.

3.3. Données utilisées et prétraitements mis en place

3.3.1. La base de données renouée

Les observations de Boyer (2001) nous fournissent une information importante et précieuse sur la densité de renouées à l'échelle du bassin RMC en 2001. Cette étude nous apporte la seule donnée vectorisée et géo-référencée nous informant de la présence ou l'absence de renouée sur tout le bassin Rhône-Méditerranée et Corse. Nous avons choisi de reprendre cette base de données existante pour tester l'existence d'indicateurs favorisant, ou non, l'implantation et la prolifération de cette plante. Il nous faut préciser que le rapport de Boyer (2001) est un travail exhaustif quant à la cartographie de « *l'extension [...] de la plante en distinguant les différents degrés de colonisation des cours d'eau* » des renouées du Japon sur le réseau RMC. En effet, 11 491 km de linéaire de cours d'eau ont été représentés, soit 186 rivières, le tout segmenté en tronçons de 1 km. L'étude s'est focalisée sur des cours d'eau dont l'ordre de Strahler était supérieur à 4, ou égal à 3 quand la longueur du cours d'eau était supérieure à 29 km. Le travail d'observation mené est uniquement le résultat de relevés qualitatifs de terrain et d'enquêtes auprès de gestionnaires sachant parfaitement identifier la renouée (Boyer, 2001). 382 organismes ont été contactés parmi lesquelles 242 structures intercommunales. Au final, les données de 29 cours d'eau ont été obtenues par ce biais. Le reste de l'étude a été mené sur le terrain (Figure 4 ; Sabastia, 2015). La Figure 4 illustre de manière schématique la démarche de l'auteur tout au long de son étude, de la récolte de données jusqu'à l'analyse de données.

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

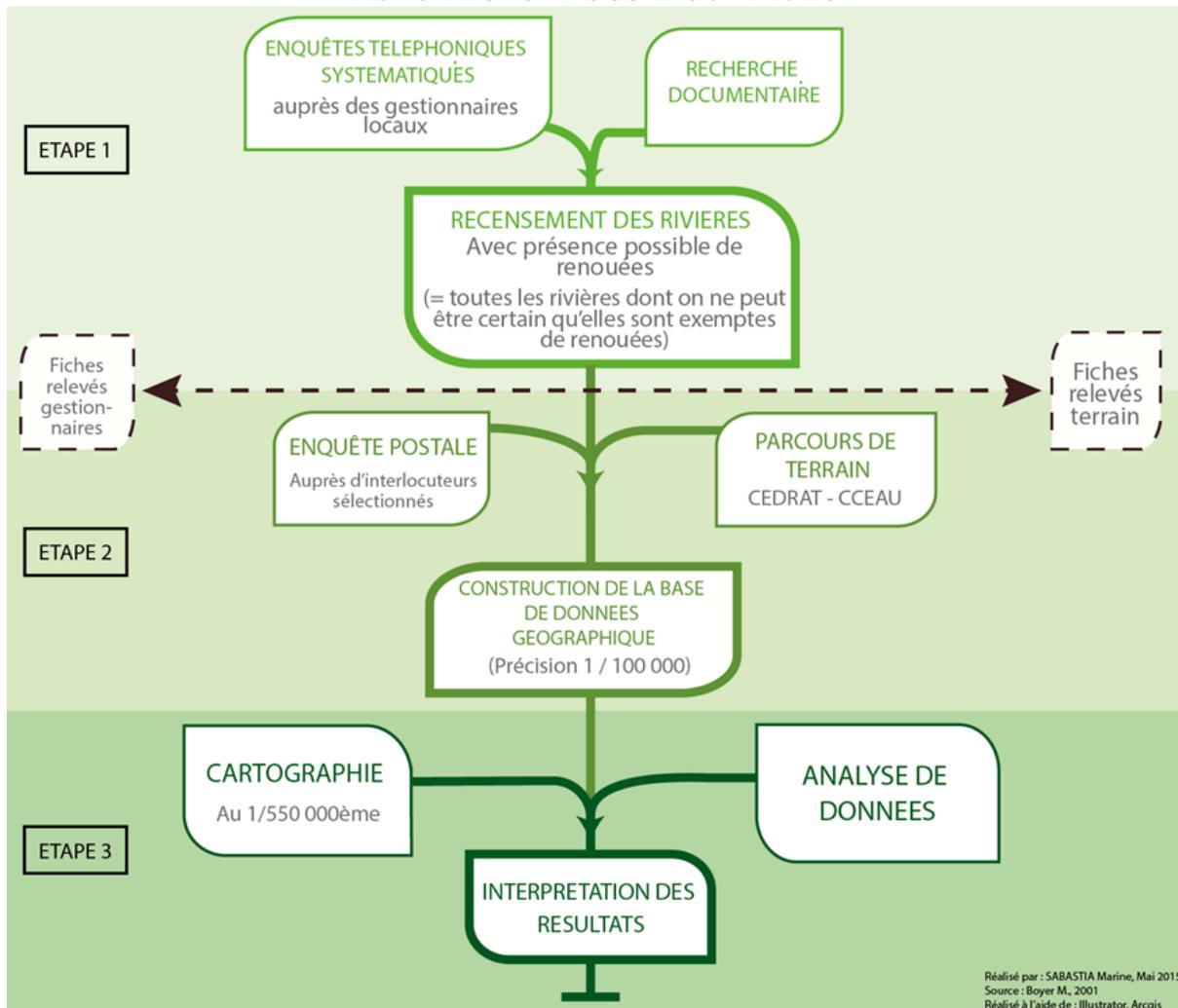


Figure 4 : Démarche générale adoptée par Boyer (2001).

Lors des relevés de terrain, des informations sur des éléments de l'environnement comme la granulométrie, la dynamique du cours d'eau, l'environnement du tronçon, le degré d'artificialisation des berges, la densité de ripisylve ont aussi été récoltées. La différence entre des tronçons non-envahis et des tronçons envahis a été testée (test du Chi2) afin d'identifier des variables discriminantes les plus pertinentes. Les tronçons qui avaient les plus fortes pentes, les granulométries les plus grossières, les berges les plus érodées, les plus artificialisées et des lits rectifiés ou recalibrés ressortaient comme étant ceux qui abritaient préférentiellement la renouée (Boyer, 2001).

Ainsi, nous avons retravaillé cette base de données en la mettant en cohérence avec la base de données RHT Réseau Hydrographique Théorique produit par Irstea Lyon (Pella et al., 2012 ; <http://www.irstea.fr/rht>). Ce réseau segmente le réseau hydrographique RM et Corse en arcs de

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

longueurs variables. Chaque arc correspond au segment situé entre deux confluences. La méthode pour la mise à l'échelle des différentes données est détaillée dans Sabastia (2015).

Le principal avantage de la base de données du RHT est de nous fournir à l'échelle de chaque arc de cours d'eau des informations sur le relief (altitude moyenne), la morphologie du lit mineur (hauteur, largeur, pente), sa granulométrie, des informations climatiques (températures et précipitations mensuelles moyennes) et sur l'hydrologie (le module, QMNA5, et crue de période de retour 10 ans, les débits classés).

Ce travail de mise en cohérence nous a permis de constituer un jeu de donnée sur le réseau RMC de 4 998 arcs avec une information sur la présence et l'absence de renouée, ainsi que des données de densité en quatre classes. En raison des distributions très inégales des données de densité de renouée entre ces quatre classes, seule la présence (agrégation des classes de densité 1, 2 et 3) et l'absence (classe de densité 0) de renouée ont été utilisées dans notre étude (Figure 5 et 6).

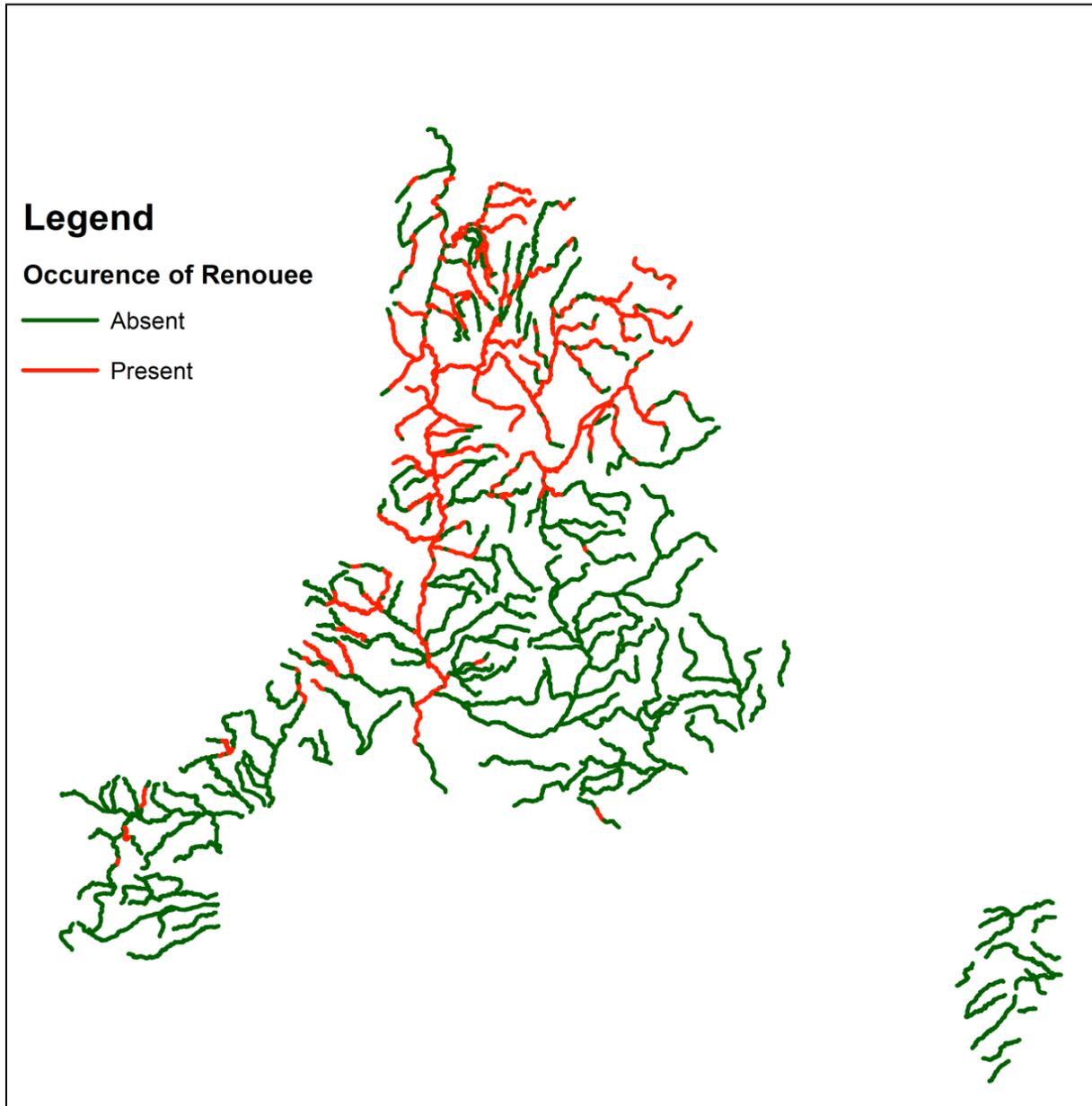


Figure 5: Répartition (en présence et absence) de la renouée à l'échelle du bassin RMC en 2001; données de Boyer (2001) reprises par Sabastia (2015) et Brekenfeld (2016).

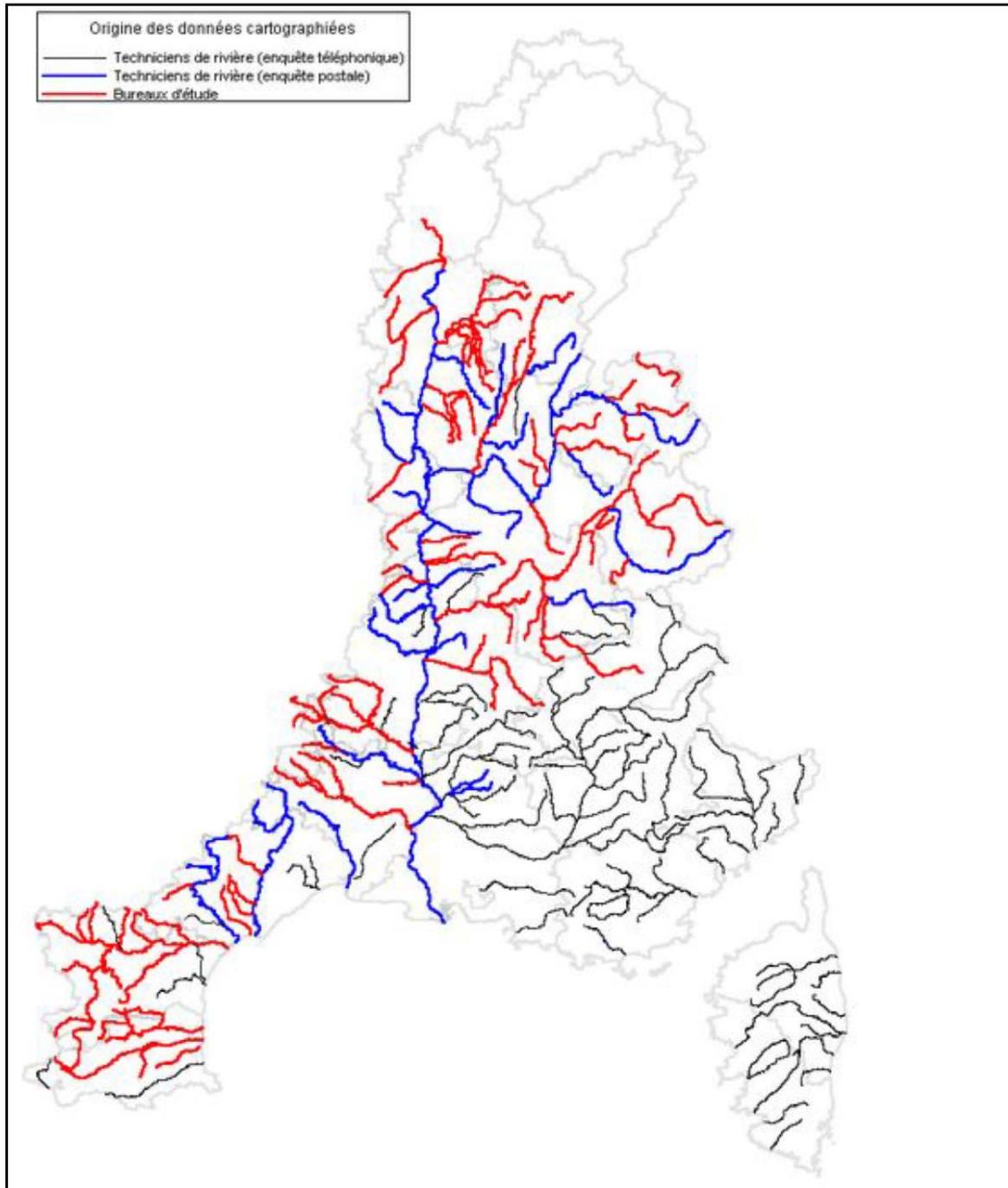


Figure 6 : Origine des données issues de l'étude de Boyer (2001). Le réseau hydrographique de la Saône amont n'a pas été indiqué car il n'a pas été pris en compte dans cette étude.

3.3.2. Base de données à large échelle des variables explicatives

Des informations SIG sur le bassin RMC ont été collectées auprès de différents organismes (Tableau 2) par le biais d'internet, sur les différentes plateformes de données pour certaines accessibles à tous comme l'IGN, EauFrance, CARMEN, BRGM, INRA, etc.

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Quelques données ont été obtenues par le biais de l'Université Lyon 2, par l'INRA et par l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse (Fropier et al., 2014 ; Sabastia, 2015). Ces données ont été retravaillées et mises en cohérence avec le RHT (Pella et al., 2012). La méthode adoptée est détaillée dans Sabastia (2015) et Brekenfeld (2016).

Nous avons donc au final constitué un jeu de données de près de 5 000 arcs de longueur variable et 200 variables explicatives sur les caractéristiques physiques et chimiques de chaque arc de cours d'eau observé par Boyer (2001) et de leur bassin versant associé (climat, occupation des sols, relief, précipitations, surface...).

Nous distinguons quatre types de variables explicatives listées en annexes A et B :

- Les variables « arcs ». Ces variables décrivent l'arc lui-même, i.e. sa pente, sa granulométrie, sa largeur, sa hauteur, l'érosion des berges, le nombre d'obstacle à l'écoulement et leur densité linéaire, le nombre de station d'épuration, etc... ;
- Les variables « buffer-arc ». Ces variables décrivent à l'échelle des arcs l'occupation des sols, la ripisylve, etc... dans une zone tampon (ou buffer) à proximité du cours d'eau. La largeur de ce buffer est définie proportionnellement au rang de Strahler de chaque cours d'eau (Sabastia, 2015) ;
- Les variables « bassins ». Ces variables décrivent le bassin versant dans son ensemble (comme la géologie ou l'occupation du sol). Nous considérons que les variables hydrologiques sont aussi des variables synthétiques de bassin versant (i.e. les débits spécifiques de crue, le QMNA5, module, QIX10, les débits classés) ;
- Les variables « buffer-bassin ». Ces variables décrivent le bassin versant, mais cette fois-ci en prenant uniquement en compte les surfaces des zones tampons (ou buffer) définies le long des cours d'eau et pour lesquels nous avons des observations de « présence/absence de renouée » en 2001.

Les variables « bassin » et « bassin-buffer » ont été utilisées pour analyser la répartition de la renouée en fonction des HER et des bassins versants. A ces variables, nous avons ajouté les variables « arc » et « buffer-arc » pour les analyses menées à l'échelle des tronçons de cours d'eau.

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Tableau 2 : Liste, usage, échelle, origine et date des données acquises pour cette étude (d'après Sabastia, 2015).

Base de données	Informations qui en résultent	Echelle	Année	Gestionnaire
BD TOPO	-Pression anthropique -Végétation ripisylve	1/5 000 au 1/50 000	2015	IGN
Réseau Hydrographique Théorique	-Température moyenne en janvier -Température moyenne en juillet -Altitude moyenne de l'arc -Surface du bassin unitaire à l'arc -Ordre de Strahler -Cumul des superficies des bassins versants unitaires amont -Pente de l'arc -QMNA5, module -Débits classés -Nom de l'arc tel qu'il est défini dans la BD Carthage	1/25000 au 1/60 000	2011	Irstea
BD Boyer	-Densité de renouée	1/100 000	2001	Agence de l'eau RMC
Lithologie	-Lithologie (roches volcaniques, métamorphiques et sédimentaires)	1/ 1 000 000	2008	BRGM
Corine Land Cover	-Type d'occupation du sol (prairie, forêt, surface artificialisées...)	1/100 000	2006	Agence européenne pour l'environnement
Référentiel d'Obstacle à l'Écoulement Station d'épuration	-Nombre d'obstacles à l'écoulement -Nombre de stations -Rejets	1/25 000	2014	ONEMA
TRI (Territoire à Risque important d'Inondation)	-Surface inondables en m ²	1/25 000	2013 - 2014	DREAL
Base SYRAH	-Largeur de plein bord - Débit spécifique de crue		2012	Agence de l'Eau

3.3.3. Zone Atelier Bassin du Rhône Données spécifiques récoltées sur le bassin Saône-Doubs de 2010 à 2015

Des données ont été récoltées sur la Saône aval à l'aide d'un protocole un peu différent que celui de Boyer (2001). Le but était d'obtenir des données de présence/absence de renouées collectées à une date ultérieure à 2001, pour réaliser une analyse diachronique de l'évolution de la Renouée. Nous avons réussi à obtenir trois jeux de données sur trois tronçons de cours d'eau : la Saône aval, l'aval de la Chalaronne et l'aval de la Grosne.

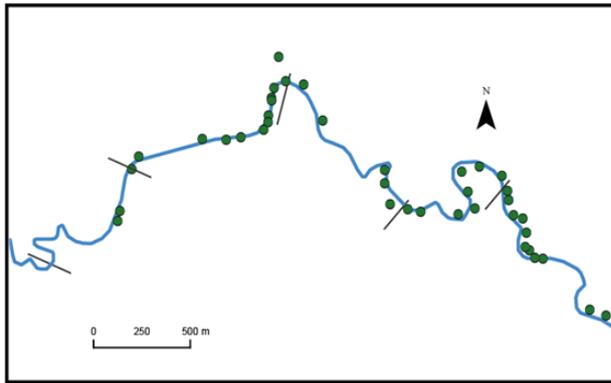
Les données sur l'aval de la Grosne nous ont été transmises par l'Etablissement Public Territorial du Bassin Saône-Doubs. C'est une donnée de 2010 qui met en évidence la présence de renouées. Nous avons dû interpréter et ajuster cette donnée de manière à l'adapter à la base de données de Boyer (2001) pour analyse diachronique (2001 et 2010).

Les données sur la Chalaronne datent également de 2010 et ont été relevées sur le terrain, par une étudiante en stage au syndicat de rivière de la Chalaronne la même année. Il s'agissait de données ponctuelles nous donnant des indications sur la présence de renouées. Contrairement à la base de données de la Grosne elle ne contenait aucune donnée sur la largeur des massifs ou des taches de renouées. Pour autant, il nous a fallu mettre en conformité les données en fonction de la segmentation de Boyer par tronçon de 1 km (exemple Figure 7) et évaluer la densité selon la fiche présente dans les annexes de Boyer (2001).

Les données de la Saône, avant et après la confluence avec l'Azergues, ont été récoltées en 2013. Elles ont été saisies sous format papier. Il a donc fallu, dans un premier temps, matérialiser ces données sous un logiciel SIG pour pouvoir, par la suite, comme cela a été fait pour la Grosne, les mettre à l'échelle de Boyer (2001), avec une segmentation par tronçon de 1 km. Ces données ont été récoltées directement sur le terrain avec l'aide d'un GPS et de cartes SCAN25 de l'IGN.

Zone Atelier Bassin du Rhône

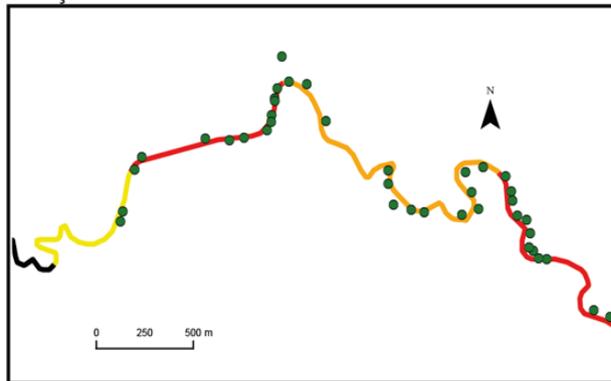
Données disponibles distribuées par le syndicat de la Chalaronne



- La Chalaronne
- Limite tronçon 1 km (Boyer)
- Renouées du Japon (massifs)

Interprétation des densités à partir de la méthode de Mireille Boyer

Résultat de l'interprétation en densité de renouées par tronçon de 1 km



- Pas de renouées
- Présence sporadique
- Présence moyenne
- Présence forte
- Renouées du Japon (massifs)

Réalisé par : SABASTIA Marine, juillet 2015
Source : Syndicat rivière la Chalaronne, Boyer M., 2001
Réalisé à l'aide de : Illustrator, Arcgis

Figure 7 : Schéma explicatif de la mise à l'échelle de données ponctuelles de présence de renouées sur la Chalaronne vers une donnée linéaire de densités à l'échelle des tronçons de 1 km de Boyer (2001).

3.3.4. Observation de couples de tronçons envahis/non-envahis

Différents couples de tronçons ont été sélectionnés sur tout le bassin de la Saône en vue d'une comparaison de tronçons par paire envahi/non envahi. Nous les avons choisis sur six cours d'eau différents : la Seille, le Solnan, l'Azergues, la Ressouze, l'Ardière, la Vallière (Figure 8).

Chaque paire de tronçons a une longueur identique (3 km) et réunit des caractéristiques communes propres au cours d'eau (rang de Strahler, module, conditions écologiques et chimiques, etc...) facilitant ainsi leur comparaison.

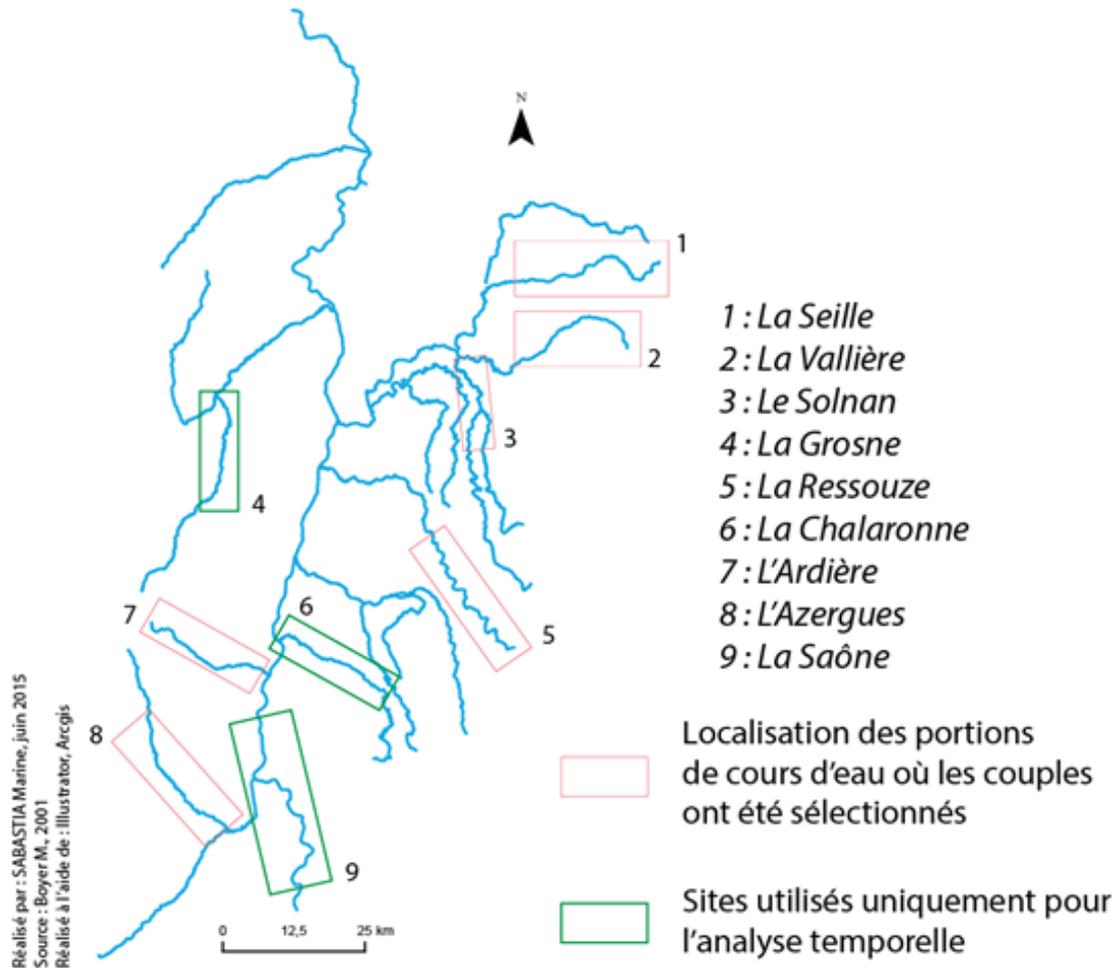


Figure 8 : Schéma explicatif de la démarche adoptée pour le choix des couples envahi/non-envahi (Sabastia, 2015).

Des mesures sur le terrain ont été réalisées pour chaque tronçon en mai-juin 2015. Nous nous sommes intéressés d'une part à la présence de renouées, la taille des massifs, leur disposition par rapport au cours d'eau. Notre intérêt s'est aussi porté sur d'éventuelles informations qui pourraient expliquer la présence ou de l'absence de plantes, comme la forme du cours d'eau, son débit, la densité et type de ripisylve, les modalités de gestion de cette dernière, etc.

4. Etude de l'invasibilité à l'échelle des hydroécorégions (HER)

4.1. Objectifs, données et méthode utilisées

L'analyse des données de présence/absence de renouée a été menée à une première échelle spatiale, celle des hydroécocoregions (Wasson et al., 2002) de niveau 1 (HER1) et de niveau 2 (HER2). Nous faisons ici l'hypothèse selon laquelle la typologie régionale définie par les hydro-écocorégions permet de discriminer la présence/absence de renouée à large échelle.

Nous avons utilisé les données HER de niveau 1 et de niveau 2 puis estimé pour chaque région le % d'arc (en effectif) et le % de longueur d'arc présentant de la renouée. Nous avons ensuite cherché à identifier les variables prédictives permettant d'expliquer la densité de présence de renouée à ces échelles. Pour cela, nous avons utilisé les valeurs moyennes, pour chaque HER, des variables explicatives estimées à l'échelle des arcs du RHT.

En comparant notre base de données avec le RHT global, nous trouvons que dans la plupart des HER, 15% à 25% des arcs du RHT ont été considérés. En effet, seuls les cours d'eau de rang de Strahler >4 ont été pris en compte lors des observations de renouée à large échelle (Boyer, 2001). Pour « Côtes Calcaires Est », située sur le bassin de la Saône amont, le pourcentage d'arcs avec des observations est très faible (environ 2%).

4.2. Résultats et discussion

Le bassin RMC est divisé en 15 hydroécocoregions (HER), mais pour deux régions (« Vosges » et « Alsace »), nous ne disposons pas de données sur la renouée (Tableau 3). Les nombres respectifs de tronçons et la longueur totale des segments diffèrent largement entre HER (Figure 9). Pour l'HER « Pyrénées » et « Corse », la renouée n'est pas présente du tout, alors que dans les régions « Plaine de Saône », « Jura-Préalpes du Nord » et « Massif Central Sud » environ 60% des segments observés indiquent une présence de renouée.

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Tableau 3: Les hydroécocoregions (HER1) de notre base de données, leur surfaces respectives [km²], la longueur totale et le nombre de segments (arcs) au sein de chaque HER, le pourcentage de segments (arcs) de notre base de données par rapport au RHT (selon la longueur totale et le nombre de segments), le nombre de segments où la Renouée est présente ou absente, et le pourcentage de segments où la Renouée est présente par rapport à la longueur totale et le nombre de segments dans que HER.

Ecohydro-region	Area [km ²]	Total length of Seg.	Number of Seg.	Percentage of Seg. Database (Boyer)/RHT		Number of Seg. Renouee		Percentage of seg. Renouee present	
				Length	Number	Present	Absent	Length	Number
MEDITERRANEEN	32612	3080	1406	18.7	20.1	183	1223	12.8	13.0
PLAINE SAONE	9741	929	319	16.1	15.0	164	155	58.3	51.4
JURA-PREALPES DU NORD	24782	2115	936	17.7	18.2	590	346	61.8	63.0
CEVENNES ALPES INTERNES	636813653	9091022	348560	26.118.4	25.921.3	128112	220448	38.121.5	36.820.0
COTEAUX AQUITAINS	1461	226	98	24.8	28.2	12	86	13.0	12.2
PREALPES DU SUD	12191	1352	670	23.7	25.6	9	661	1.0	1.3
PYRENEES	2737	288	130	21.7	24.0	0	130	0.0	0.0
CORSE	8702	568	285	14.8	16.1	0	285	0.0	0.0
COTES CALCAIRES EST	9809	73	43	1.8	2.4	10	33	23.9	23.3
MASSIF CENTRAL SUD	3827	343	160	21.3	22.6	113	47	61.2	70.6
GRANDS CAUSSES	904	61	22	16.2	13.2	1	21	1.1	4.5
MASSIF CENTRAL NORD	349	20	13	10.4	18.1	2	11	29.7	15.4

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

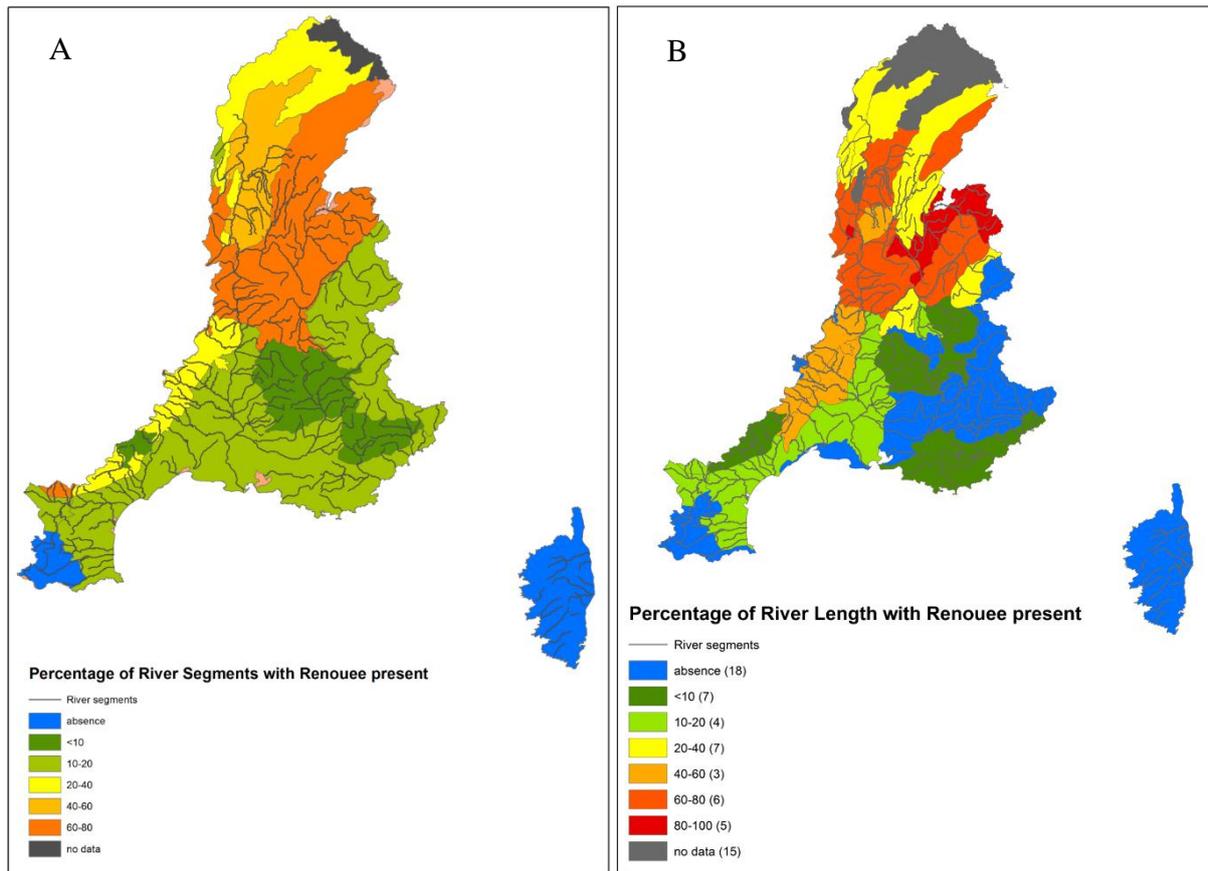


Figure 9: Le pourcentage de segments (arcs) dans chaque hydroécocoregion (HER1 ; Fig. A) et (HER2 ; Fig. B) où la renouée est présente.

Les Figures 9A et 9B permettent de dresser rapidement un état des lieux utile pour les gestionnaires de cours d'eau dont le bassin serait situé sur une HER fortement, moyennement ou faiblement envahie. Nous avons ainsi un tout premier état de vulnérabilité à large échelle basée sur des observations de présence de la renouée dans ces régions. Une première limite de notre étude de l'invasibilité à l'échelle des HER peut alors être identifiée : cet état est très dépendant de la période d'observation (ici en 2001), état qui a dû évoluer depuis 15 ans.

Nous avons ensuite cherché les variables les plus pertinentes pour discriminer les HER fortement, moyenne ou faiblement envahies. Les distributions de plusieurs variables explicatives diffèrent sensiblement entre les HER (Figure 10). Cependant, aucune de ces variables ne semble pouvoir discriminer clairement les régions fortement envahies des régions faiblement ou pas envahies. Seule la densité d'obstacle à l'écoulement (issue de la base ROE ; variable nommée « tx_ROE ») semble avoir un pouvoir explicatif sur la densité de renouée: la densité de renouée à un niveau régional augmenterait avec la densité linéaire d'obstacles à

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

l'écoulement sur le réseau hydrographique. Ce résultat semble en adéquation avec les observations sur le terrain qui relient le degré d'anthropisation à la présence de renouée.

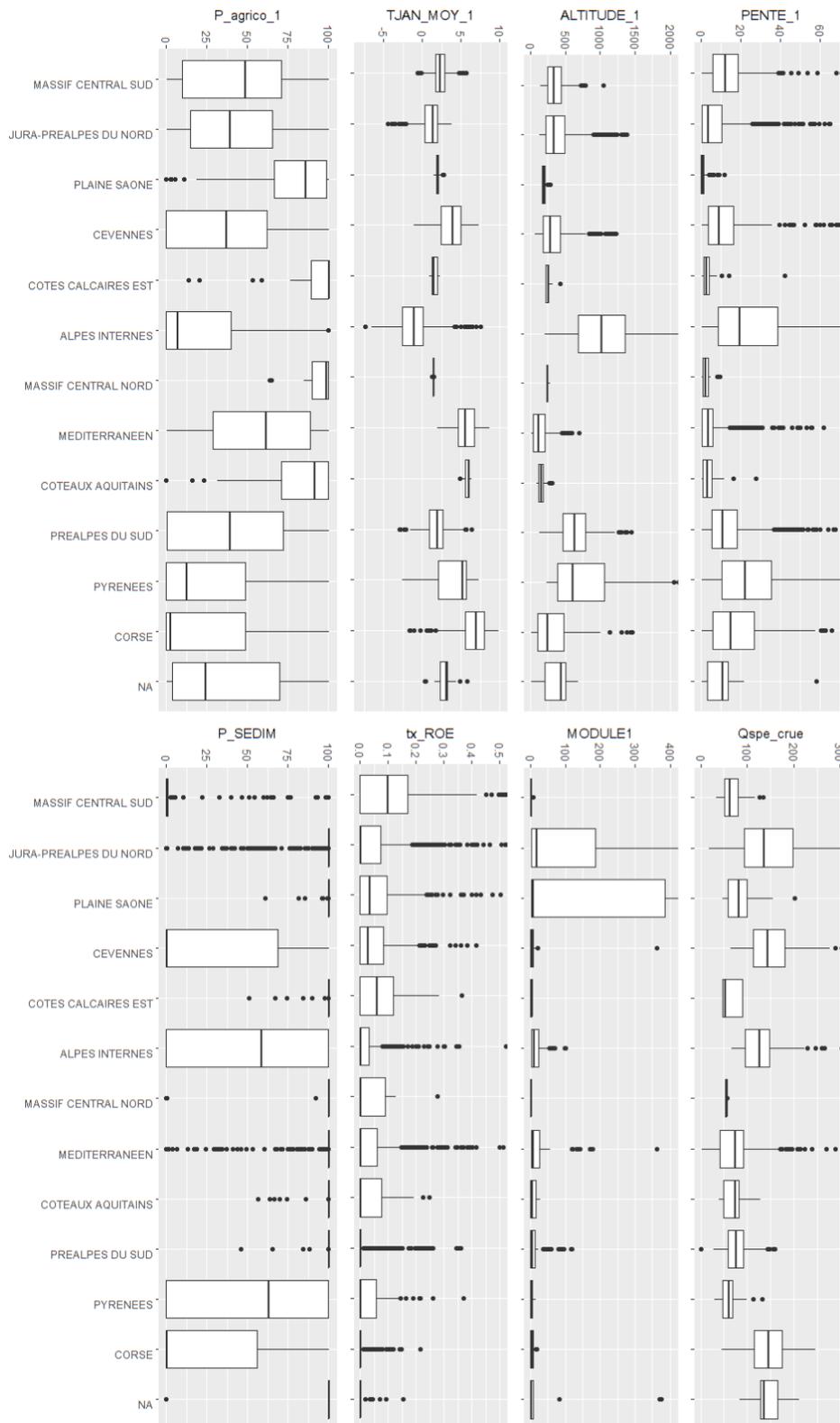


Figure 10 : Valeurs moyennes et distributions de plusieurs variables pour les 12 HER sur le bassin RMC. Les HER sont classées de la plus envahie (Massif Central Sud avec 61%) aux moins envahies (Pyénées et Corse ; 0%).

5. Etude de l'invasibilité à l'échelle de bassins versants de 50 à 600 km²

5.1. Objectifs, données et méthode

L'analyse des données de présence/absence de renouée a été menée ensuite à l'échelle de bassins versants de taille variant de 50 à 600 km². Nous avons cherché à savoir si nous pouvions prédire l'état d'invasion d'un bassin en fonction de variables prédictives climatiques, géologiques, d'occupation du sol, de pression anthropique, géomorphologiques et hydrologiques. Pour ce travail, nous avons considéré la variable aléatoire de réponse « densité de renouée », notée Y .

Il est important de noter que nous avons choisi cette échelle d'étude (bassins de 50-600 km²), car elle semble cohérente avec l'échelle à laquelle est gérée la renouée par les collectivités. Cette analyse présente toutefois une limite inhérente à ce choix d'échelle : elle ne prend pas en considération les tronçons situés plus en aval dans le réseau hydrographique, comme par exemple le cours principal du Rhône, de la Saône, de l'Isère, de la Drôme ou de la Durance (Figure 11).

Nous avons donc estimé les différentes variables explicatives associées aux caractéristiques physiographiques, climatiques et anthropiques de chaque bassin versant. Nous avons considéré des variables de bassin « bassin » et les variables « bassin-buffer »..

Nous avons aussi considéré dans notre analyse l'influence de la taille des bassins considérés sur les résultats finaux. En effet, nous pouvons supposer qu'une variable peut avoir un pouvoir explicatif à une échelle donnée (e.g. 50-100 km²) et moindre, voir nul à une autre échelle (e.g. 500-600 km²). Ainsi, plusieurs classes en taille de bassin ont été étudiées : 50-100 km², 100-200 km², 200-300 km², 300-400 km², 400-500 km² et 500-600 km² (Figure 11). Les classes de plus grandes tailles n'ont pas été analysées en raison des faibles effectifs associés ($n < 40$ à partir de la classe 600 km², Tableau 4). Tous les bassins appartenant à une classe ont été utilisés. Toutefois, dans le cas où nous trouvions des bassins emboîtés au sein d'une même classe de taille, nous n'avons retenu que le plus petit bassin et enlevé les bassins des arcs situés plus en aval afin d'éviter tout problème de redondance d'observation dans classe de taille de bassin versant.

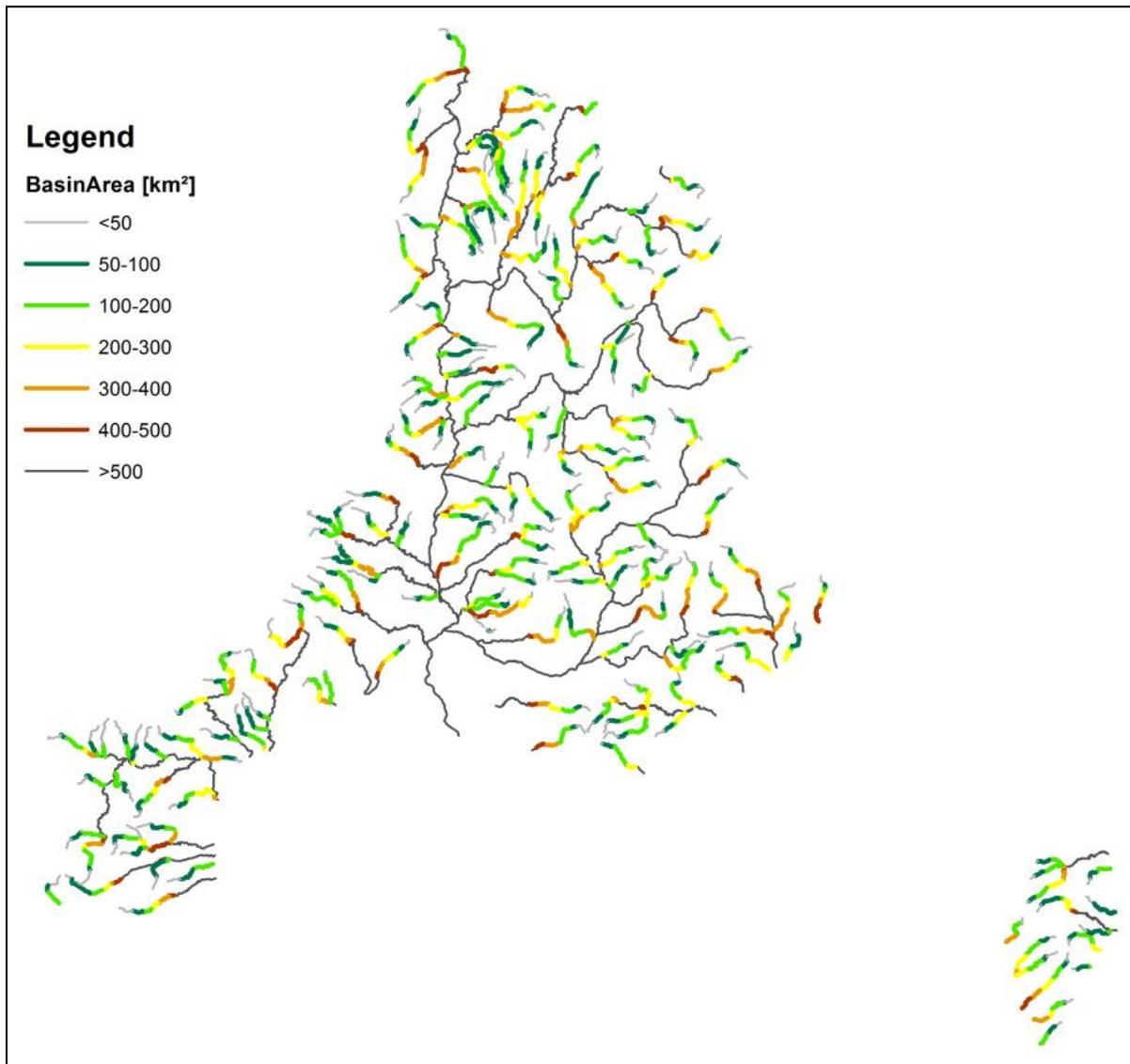


Figure 11: Classes de taille des arcs associés aux bassins versants considérés dans cette analyse (50-600 km²).

Tableau 4 : Nombre de bassins versants où la renouée est présente (densité > 0%) ou absente (0%) pour six classes de taille du bassin.

	50-100 km ²	100-200 km ²	200-300 km ²	300-400 km ²	400-500 km ²	500-600 km ²
Presence	34	47	45	33	27	22
Absence	136	129	78	51	34	24
Effectifs totaux	170	176	123	84	61	46

Nous avons fait le choix d'une méthode de régression logistique pour trouver un modèle qui permette de prédire l'état d'invasion par la renouée d'un bassin versant (variable aléatoire qualitative de réponse Y). à partir d'une combinaison linéaire de variables explicatives X_i

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

qualitatives et quantitatives (voir Annexe A). Y peut alors prendre deux modalités : $Y = 1$, « présence de renouée » ou $Y = 0$, « absence de renouée ». La probabilité pour que la variable de réponse Y prenne une valeur entre 0 et 1 est notée p . La principale hypothèse du modèle de régression logistique est que la fonction logit(p), i.e. $\log(p/(1-p))$ est une combinaison linéaire des variables explicatives X_i :

$$\log\left(\frac{p}{1-p}\right) = K_0 + \sum_{i=1}^n K_i X_i \quad \text{Equation 1}$$

avec n le nombre de variables explicatives X_i and K_i , le i ème coefficient linéaire. La probabilité p d'appartenir à un groupe de bassin « présence » ou « absence » est alors donné par :

$$p = \frac{e^{K_0 + \sum_{i=1}^n K_i X_i}}{1 + e^{K_0 + \sum_{i=1}^n K_i X_i}} \quad \text{Equation 2}$$

Ce modèle de régression logistique a été implémenté sous le logiciel *R* en utilisant la fonction *glm{stat}* et le modèle binomial de type *logit*.

Le modèle GLM fournit une probabilité p de « présence ». Chaque modèle est donc associé à un seuil permettant de définir si Y prend la modalité « présence » ou « absence » de renouée. Nous utiliserons par défaut un seuil de 0.5, i.e., le modèle GLM prédit une probabilité de 50% ou plus que la renouée soit présente lorsqu'elle fait partie du groupe « présence ». Nous testerons, lorsque cela sera nécessaire, la sensibilité des résultats des modèles retenus en fonction de la valeur de ce seuil.

5.2. Discussion sur le regroupement par classe de densité de renouée

Avant de choisir les variables les plus pertinentes pour notre analyse de régression logistique, nous avons choisi de décrire et d'analyser la distribution des variables explicatives en fonction de la densité de renouée exprimée en plusieurs classes. La Figure 12 représente la distribution en effectif de notre échantillon en fonction du pourcentage de densité de renouée dans le bassin (% de la longueur du réseau fluvial observé dans le bassin). Cette distribution est fortement dissymétrique.

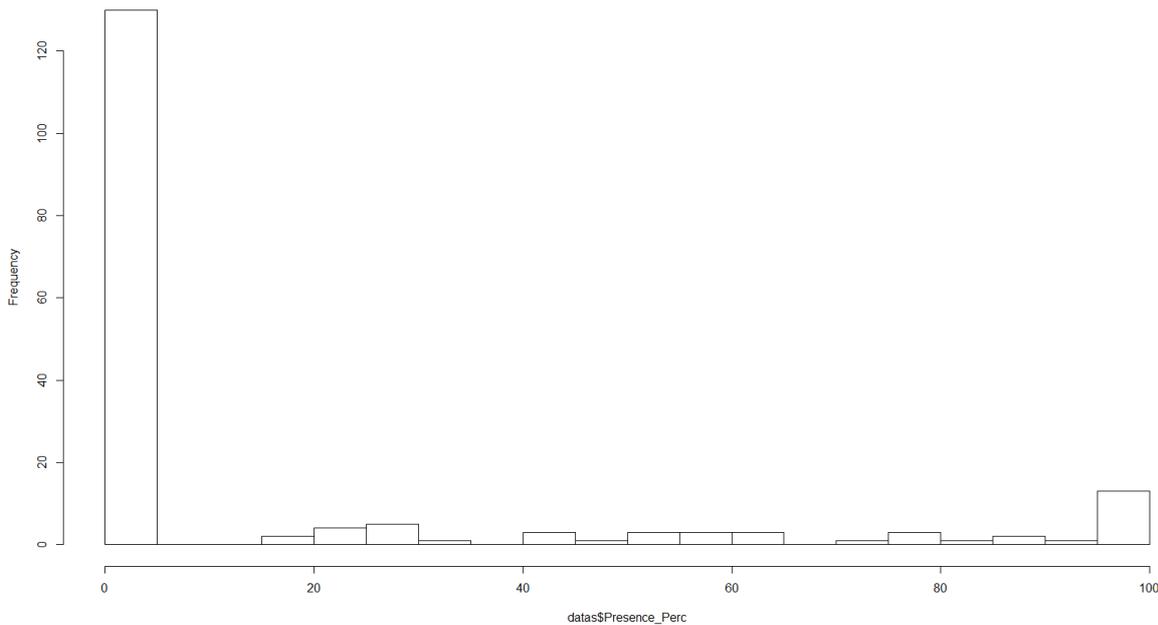


Figure 12 : Nombre de bassins versant (axe y) du groupe de taille 100-200 km² en fonction de la densité de présence de la renouée (pourcentage de longueur du réseau observé occupé par de la renouée).

Pour le groupe de taille «100 - 200 km²», 141 bassins ont été classés avec une densité de «0 - 33%», 14 comme «33 - 67%» et 21 comme «67 - 100%». Sur les 187 variables explicatives ont été testées, et 59 ont montré au moins une différence significative entre une paire de groupes de densité (test de Kruskal Wallis ; p-value < 0.05). Un sous-ensemble représentatif de ces variables est présenté à la Figure 13. Nous pouvons noter qu'aucune des variables explicatives n'a montré une différence significative entre tous les groupes de densité. La densité de renouée a aussi été classée en quatre groupes (0 - 25%, 25 - 50%, 50 - 75% et 75 - 100% ; Figure 14). Sur les 187 variables analysées, 55 ont montré une différence significative entre au moins une paire de classes de densité (test de Kruskal Wallis). Les variables ayant montré des différences significatives entre les classes de densité étaient très semblables quel que soit le nombre choisi de classes (2, 3 ou 4).

Il est intéressant de noter que les tendances observées à l'échelle des bassins versants pour ces différentes variables rejoignent les hypothèses biologiques que l'on peut formuler à propos de la renouée (Fig. 13 et 14):

- Tout d'abord, une implantation de renouée sur un bassin versant augmente significativement la probabilité d'en trouver sur l'arc situé à l'exutoire du bassin (variables « R_pres next upstream » et « R pres upstream ») ; cette observation souligne

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

l'importance de la propagation de l'amont vers l'aval de la plante au sein du réseau hydrographique ;

- Les variables climatiques vont dans le sens d'une augmentation de la densité de renouée avec les précipitations de bassin (par exemple les précipitations en février, mai et juin ; Figure 14). Cette observation ne fait que confirmer une hypothèse de base concernant cette plante : elle a besoin d'eau pour se développer, d'où sa forte présence le long des cours d'eau ;
- Les variables liées à l'urbanisation ou les pressions anthropiques (« artif_buffer », « urban cover », « population size », « anthropic pressure », et « densité linéaire d'obstacles à l'écoulement ») présentent toutes une tendance positive avec la densité de renouée (ex. Fig. 14). Ainsi, plus un bassin est soumis à une pression anthropique forte, plus la probabilité de trouver de la renouée sur le bassin est forte. D'autre part, des actions anthropiques peuvent aussi favoriser l'implantation de la renouée provenant de l'amont sous la forme de propagules végétatives ou d'akènes. Les enrochements, limitent le couvert végétal rivulaire et rendent plus propices l'installation des propagules végétatives ou des akènes provenant des plantes situées à l'amont. Les seuils transversaux peuvent aussi constituer des ouvrages infranchissables par les akènes et propagules à basses eaux et peuvent ainsi constituer des points de développement privilégiés de la renouée sur ces sites ;
- L'érosion des berges semble aussi être liée positivement à la densité de renouée (« Erodibility of banks »; Fig 14). Un bassin présentant des cours d'eau aux berges érodées pourrait favoriser l'arrachement des plants de renouée et le transport des propagules vers l'aval lors des crues. Les berges érodées (donc sans végétation) sont aussi plus propices à l'établissement et au développement des akènes et des propagules végétatives. La puissance du cours d'eau (« specif Puissance »), en lien aussi avec la capacité d'arrachage de la plante, le transport de propagules et l'érosion des berges, augmente aussi la probabilité de présence de la renouée sur un bassin (tendance nette pour les 3 classes ; Fig. 13) ;
- Toutes les variables caractérisant la forêt (en terme de densité, continuité) vont dans le même sens (« continuity of riparian forest », « rip forest, forest buffer », « size of riparian forest », « meadow cover ») : plus la végétation rivulaire est dense et continue le long du cours d'eau (à l'échelle du BV, sur un buffer ou non) et moins la renouée est présente ;

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

- Les variables caractérisant les crues montrent un comportement plus complexe (crue spécifique et Q01%). Une augmentation de la présence de la renouée avec le débit de crue peut être identifiée entre les classes « faible densité » et « densité moyenne ». Nous pouvons ensuite observer une diminution de l'intensité des crues lors du passage de la classe « densité moyenne » à « densité forte ». Nous pourrions interpréter la première partie de cette relation non monotone par le fait que des crues sont nécessaires pour arracher les propagules et les transporter dans le réseau hydrographique. Par contre, pour qu'une tache de renouée se développe correctement (passage de la classe « densité moyenne » et « densité forte »), il ne faut pas que ces contraintes hydrologiques soient trop fortes et/ou trop fréquentes.

Il est à noter qu'aucune variable caractérisant la géologie ou la lithologie (le long du réseau, ou dans le bassin) n'est ressortie de cette analyse à l'échelle du bassin.

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

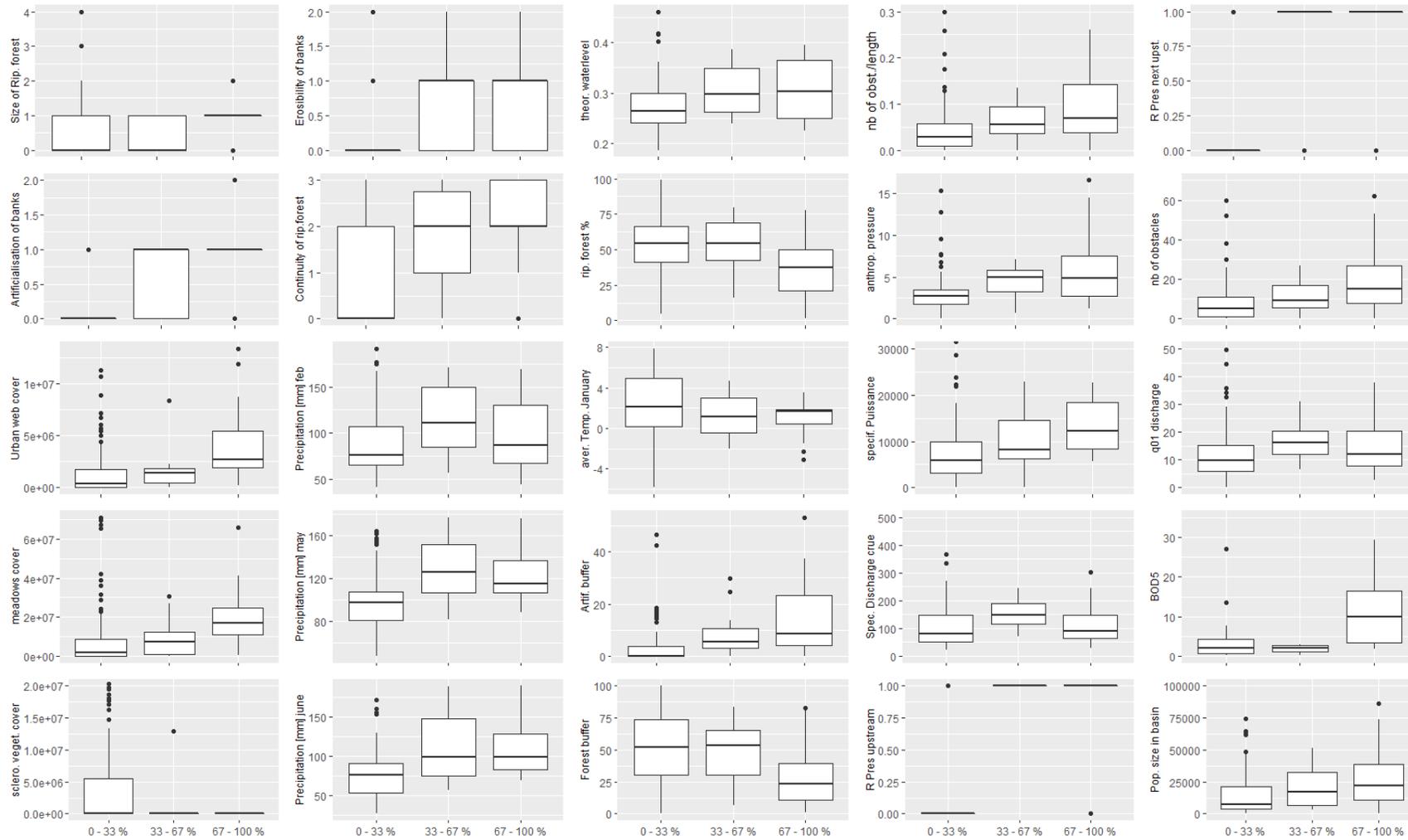


Figure 13 : Distribution des différentes variables explicatives en fonction de la densité de renouée (3 classes) dans les bassins versants pour le groupe de taille de bassin 100-200 km². Toutes les variables présentées ici présentent une différence entre au moins deux classes de densité selon le test de Kruskal-Wallis avec $p < 0.05$.

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

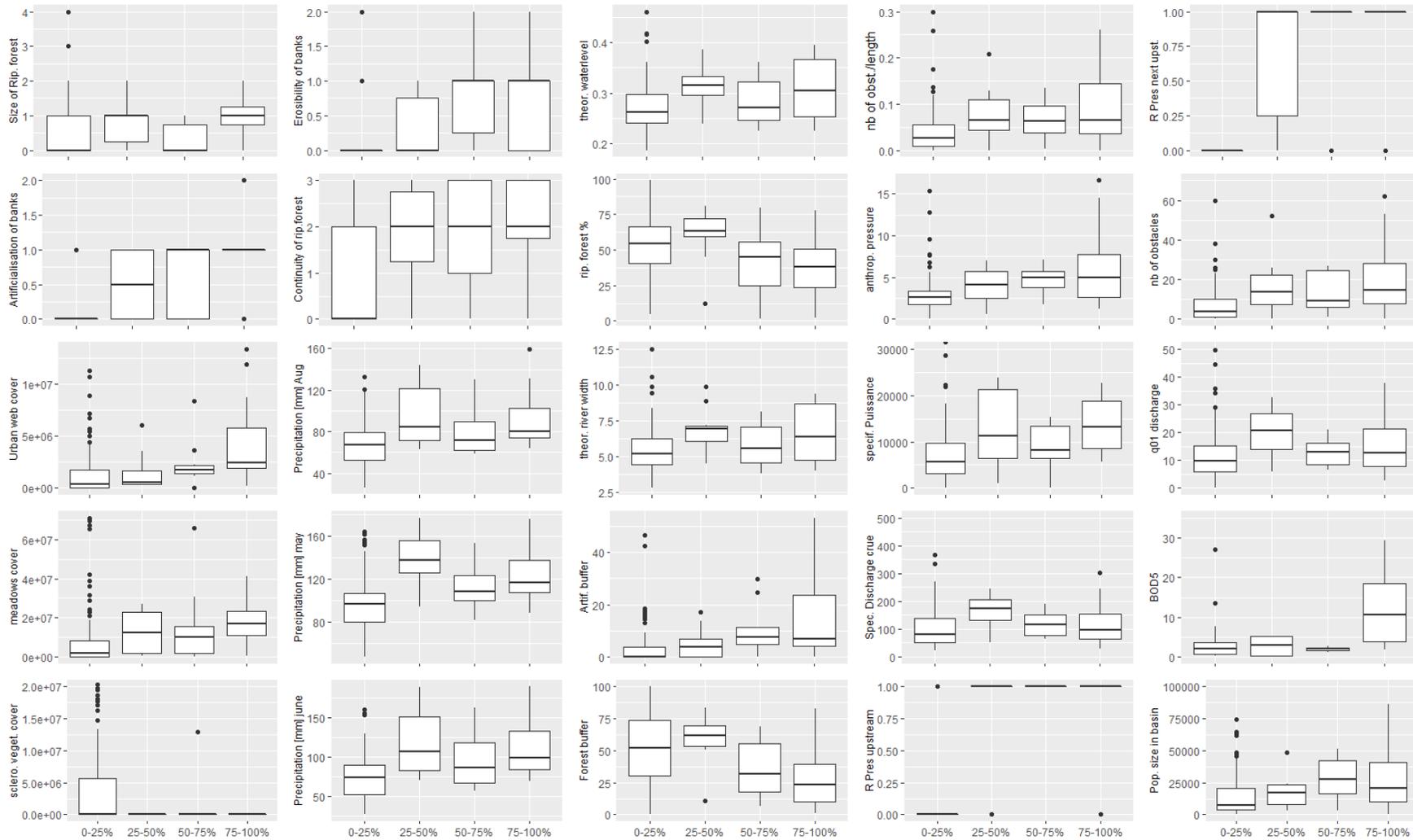


Figure 14 : Distribution des différentes variables explicatives en fonction de la densité de renouée (4 classes) dans les bassins versants pour le groupe de taille de bassin 100-200 km². Toutes les variables présentées ici présentent une différence entre au moins deux classes de densité selon le test de Kruskal-Wallis avec $p < 0.05$.

5.3. Application du modèle de régression logistique

Nous ne retiendrons dans la suite de cette analyse que deux classes de densité : $Y = 0$ ou « absence » totale de renouée et $Y = 1$ ou « présence » de renouée.

Nous avons donc tout d'abord opéré des regroupements entre certaines variables explicatives afin d'en diminuer le nombre (e.g. les variables de températures ou de précipitations mensuelles ont été regroupées en variables saisonnières). Nous avons ensuite conservé uniquement les variables explicatives pour lesquelles il n'y avait que très peu de valeurs manquantes dans le jeu de données initial ; les variables « N24 », « N26 », « Etateco », « Etatchim » ont donc été retirées du jeu de variables. Un modèle de régression logistique basé sur un modèle linéaire généralisé (GLM) suppose que les variables prédictives X_i soient indépendantes. Par conséquent, la redondance entre les variables doit être strictement évitée. Afin de tester la redondance entre les variables explicatives, nous avons calculé le coefficient de corrélation de Pearson pour chaque paire de variables prédictives retenues à ce stade afin de construire la matrice de corrélation et de ne retenir que les variables peu corrélées entre elles. Nous avons fixé la limite de ce coefficient de corrélation à 0,5 (en valeur absolue) afin de limiter la dépendance linéaire entre les variables. Nous avons ainsi retenu au final 22 variables explicatives présentées dans le Tableau 5.

Le choix des variables utilisées pour construire un modèle final dépend à la fois de critères statistiques, comme identifiés précédemment, mais aussi de critères biologiques et opérationnels. Nous veillerons donc à vérifier à chaque étape de la modélisation que les variables explicatives retenues soient bien cohérentes avec les processus biologiques de bases et les expertises de terrain. Enfin, nous avons aussi pris en compte un critère d'opérationnalité, important à considérer pour notre étude : les variables explicatives prises en compte par le modèle final devraient, dans la mesure du possible, pouvoir être collectées sur le terrain ou via SIG/ et télédétection à moindre coût et en limitant toute subjectivité quant à leur mesure (biais opérateur, temps de mesure). Cette contrainte est importante si l'on veut que les modèles proposés soient mis en œuvre facilement et de façon harmonisée au niveau opérationnel.

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Tableau 5: Liste des variables explicatives retenues à l'échelle du bassin

Names	Description	
ALTITUDE_1	Altitude moyenne de bassin	
MODULE1_sp	Débit moyen mensuel spécifique	
N28_bis_1	Artificialisation des berges de l'arc (Boyer, 2001)	
N25_bis_1	Erosion des berges (Boyer, 2001)	
N29_bis_1	Largeur de la ripisylve (Boyer, 2001)	
tx_ROE	Taux d'obstacles à l'écoulement par arc moyen pour le bassin	
P_artifi_1	% de surface artificialisées dans une zone tampon autour des arcs	
P_forets_1	% de forêts et milieux semi-naturels par arc, dans une zone tampon autour des arcs	
puiss_spU	Puissance spécifique	
P_SEDIM	% de roches sédimentaires dans une zone tampon	
Nb_station_length	Nombre de stations d'épuration par unité de longueur	
qmna5_rht	Débit mensuel minimal de période de retour 5 ans	
qixa_10	Débit de crue décennal en m ³ /s	
dec_acc	Précipitations en décembre	Précipitations en hiverwinter_acc
janv_acc	Précipitations en janvier	
fev_acc	Précipitations en février	Précipitation en été summer_acc
juin_acc	Précipitations en juin	
juil_acc	Précipitations en juillet	
aout_acc	Précipitations en août	
Roches_meubles	% de roches meubles et peu consolidées dans le bassin	
calcaires_craies	% de calcaires massifs et craies dans le bassin	
marnes	% de marnes dans le bassin	
Roches_heterogenes	% de roches hétérogènes carbonatées dans le bassin	
Roches_permeable	% de roches résistantes à faible charge ionique peu perméables dans le bassin	
surf_artifi	% de surface artificialisée dans le bassin	
surf_humid	% de zones humides, lacs, rivières, dans le bassin	

Pour sélectionner les variables du modèle GLM les plus pertinentes pour le jeu de données de chaque classe de bassin, le « modèle nul » (i.e. pas de variable explicative) et le modèle GLM appliqué à chaque variable une à une ont été appliqués, puis comparés statistiquement à l'aide du test de Wald et du rapport de vraisemblance (Likelihood Ratio test, noté LR par la suite). Le test de Wald permet de tester la valeur réelle du paramètre du modèle, alors que le facteur de vraisemblance est utilisé pour décider de rejeter le modèle nul en faveur du modèle de substitution avec une variable explicative. Ces deux tests fournissent des probabilités que l'on corrigera à l'aide de la méthode de Holm–Bonferroni afin de prendre en compte les problèmes d'inférence statistique lors de tests multiples (Tableau 5).

Le sous-ensemble de variables significatives (avec une p-value <0.05 pour les deux tests) identifiées à ce stade ne sont pas les mêmes pour tous les groupes de bassins (en italique dans le Tableau 5). Certaines variables ont un pouvoir discriminant fort pour la majorité des classes en taille de bassin versant considérées, comme les variables *artificialisation des berges « artif. of banks»*, le % de la surface artificielle dans une zone tampon autour du cours d'eau « artif. buffer», la densité linéaire d'obstacle à l'écoulement « nb of obstacle » et précipitations en été « summer acc» (Tableau 5 et Figure 15).

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

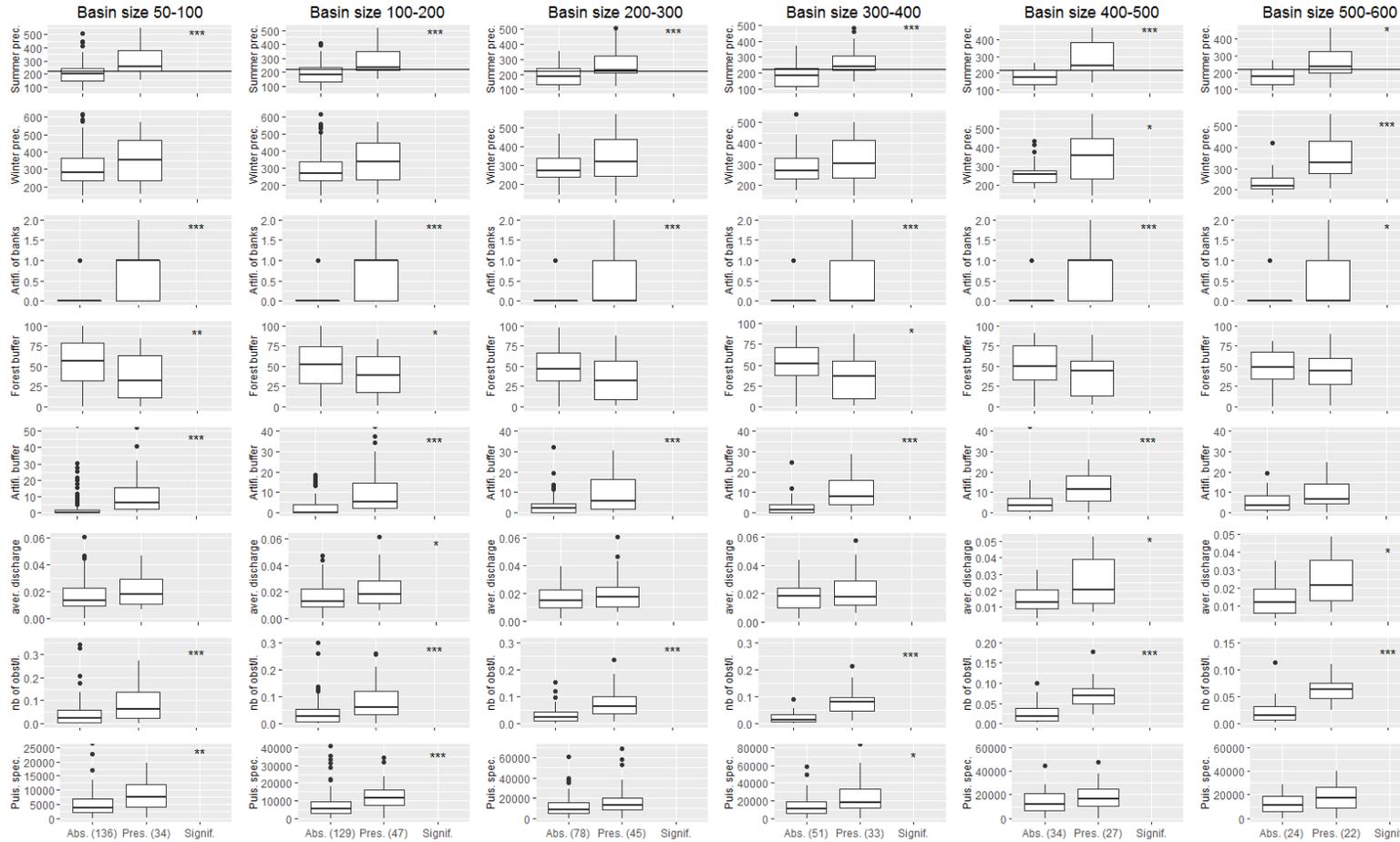


Figure 15 : Distributions de variables explicatives pour les classes « Présence » et « Absence » de renouée selon les différentes classes de bassin. Sont présentées ici seulement les variables étudiées dans le Tableau 5 qui présentent le plus de différence entre classe de présence. Le nombre de bassins est indiqué entre parenthèses et les étoiles indiquent les probabilités seuils corrigées (* = <0.05; ** = <0.01; *** = <0.001). Toutes les variables ont été testées avec le test de Wilcoxon. Seule la variable artificialisation des berges « artif. of banks » a été testée avec le test d'indépendance du Chi-2.

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Tableau 5 : Probabilités seuil des tests de Wald et du rapport de vraisemblance (Likelihood ratio) pour les différentes variables explicatives et taille de bassin. Ce test est mené pour chaque variable séparément pour toutes les classes de bassin. Les variables retenues sont celles qui présentent une p-value < 0.05 pour les deux tests (variables en italique). Ces variables sont retenues pour créer les modèles GLM par classe de bassin.

Names	Basin size classes (km ²)	50-100		100-200		200-300		300-400		400-500		500-600	
	Test	Wald p-value	Likelih. Ratio p-value										
	Description												
MODULE1_sp	Débit spécifique moyen inter-annuel	4.3E-1	4.6E-1	6.8E-2	6.0E-2	1.0E+0	1.0E+0	1.0E+0	1.0E+0	3.7E-2	7.1E-3	1.6E-1	4.1E-2
N28_bis_1	Artificialisation des berges	<i>8.1E-6</i>	<i>7.0E-7</i>	<i>1.9E-6</i>	<i>1.4E-7</i>	<i>1.1E-3</i>	<i>1.4E-4</i>	<i>1.1E-2</i>	<i>1.3E-3</i>	<i>1.1E-2</i>	<i>5.2E-4</i>	3.7E-1	1.6E-1
N25_bis_1	Erosion des berges	5.0E-2	5.1E-2	7.2E-2	7.0E-2	7.3E-2	4.9E-2	<i>1.0E-2</i>	<i>6.5E-4</i>	<i>1.4E-2</i>	<i>5.2E-4</i>	3.8E-1	9.9E-2
P_artifi_1	% artifi. buffer	<i>1.4E-2</i>	<i>1.3E-3</i>	<i>8.6E-4</i>	<i>1.1E-5</i>	<i>4.8E-2</i>	<i>4.4E-3</i>	<i>3.9E-3</i>	<i>2.6E-6</i>	1.3E-1	8.2E-3	1.0E+0	1.0E+0
P_forets_1	% forest buffer	<i>3.1E-2</i>	<i>1.9E-2</i>	1.7E-1	1.5E-1	1.5E-1	1.2E-1	<i>5.0E-2</i>	<i>2.5E-2</i>	1.0E+0	8.1E-1	1.0E+0	1.0E+0
tx_ROE	Nombre d'obstacle/unite de longueur	<i>7.1E-3</i>	<i>1.6E-3</i>	<i>9.9E-4</i>	<i>1.6E-5</i>	<i>7.8E-5</i>	<i>2.8E-8</i>	<i>2.3E-4</i>	<i>3.2E-11</i>	<i>1.1E-3</i>	<i>2.9E-7</i>	<i>1.3E-2</i>	<i>1.6E-5</i>
puiss_spé	Puissance spécifique	1.6E-1	1.3E-1	<i>7.9E-3</i>	<i>1.5E-3</i>	6.1E-1	2.6E-1	7.5E-2	2.0E-2	1.0E+0	7.0E-1	1.0E+0	5.1E-1
winter_acc	Precipitation en hiver	5.8E-1	6.4E-1	1.2E-1	1.2E-1	2.3E-1	2.0E-1	8.5E-1	7.9E-1	<i>3.7E-2</i>	<i>8.3E-3</i>	<i>3.8E-2</i>	<i>2.6E-4</i>
summer_acc	Précipitation en été	<i>2.8E-5</i>	<i>6.8E-7</i>	<i>6.4E-6</i>	<i>2.7E-8</i>	<i>7.6E-4</i>	<i>1.6E-5</i>	<i>3.5E-3</i>	<i>4.4E-5</i>	<i>2.0E-2</i>	<i>4.4E-7</i>	1.4E-1	8.3E-3
Roches_meubles	% de roches meubles	8.2E-1	8.5E-1	1.0E+0	1.0E+0	<i>2.4E-2</i>	<i>3.6E-3</i>	9.3E-1	8.2E-1	1.0E+0	1.0E+0	1.0E+0	1.0E+0
surf_artifi	% articialisation dans le bassin	1.4E-1	4.5E-2	<i>1.3E-2</i>	<i>4.2E-3</i>	1.0E+0	7.5E-1	8.4E-1	5.2E-1	1.0E+0	1.0E+0	1.0E+0	1.0E+0

Les tests de Wald et LR (Tableau 5) montrent que les variables explicatives « précipitations en été », « artificialisation des berges » et « densité linéaire d'obstacle à l'écoulement » permettent de discriminer les bassins des classes « présence » et « absence » de renouée quelle que soit la classe en taille de bassin considérée. Les autres variables ne montrent que des différences significatives pour certaines classes de bassin. Les classes de bassin où les précipitations moyennes annuelles en été sont inférieures à 220 mm (trait sur la Figure 15) présentent très peu de renouée. Ce résultat est en accord avec les hypothèses biologiques de fonctionnement de cette plante qui a besoin de beaucoup d'eau pour se développer. D'autre part, la présence de renouée sur les bassins (quelles que soient leurs tailles) est supérieure lorsque le degré d'artificialisation des berges et la densité linéaire d'obstacle à l'écoulement sont importantes. Cette tendance va dans le sens des observations que l'on peut faire sur le terrain : plus un milieu subit des pressions anthropiques, plus la probabilité d'introduire la renouée par des travaux (terrassement, déplacement de véhicule...) est grande et plus son développement est facilité en raison d'un couvert végétal peu dense sur ces zones et donc d'une faible compétition avec d'autres espèces.

A l'inverse, la variable « puissance spécifique » du cours d'eau semble être pertinente pour discriminer nos classes présence/absence, mais uniquement pour les petites tailles de bassins (50-100 km² et 100-200 km²). Plus la puissance spécifique est importante et plus la renouée est présente sur les bassins. Ce résultat semble cohérent avec les observations de terrain qui montrent qu'une dynamique alluviale importante entraîne potentiellement une plus forte érosion des berges et donc une forte dissémination des propagules de renouées dans le réseau, sous réserve d'une récurrence des crues pas trop importante.

Enfin, la variable explicative « % de forêt dans une zone tampon » autour des arcs de cours d'eau semble indiquer qu'une couverture arborée ou arbustive limite la présence de renouée, notamment pour les bassins dont la superficie est inférieure à 200 km². Ce résultat est en accord avec les observations de terrain selon lesquelles la renouée est une héliophile au caractère pionnier et se développerait donc mieux sur des espaces ouverts plutôt qu'à l'ombre, sous une couverture arborée ou arbustive dense.

Les variables retenues pour chaque classe de bassin avec une p-value < 0.05 (en italique dans le Tableau 5), sont alors utilisées pour construire un modèle propre à chaque classe en taille de bassin. Les modèles ainsi obtenus sont nommés « Modèle1 50-100 », i.e. le modèle calé sur les

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

données de la classe de bassin [50-100 km²], « Modèle2 100-200 », « Modèle3 200-300 », « Modèle4 300-400 », « Modèle5 400-500 » et « Modèle6 500-600 ».

Pour évaluer la qualité de ces modèles à prédire correctement la densité de renouée d'un bassin versant (bassin Y = 1 « présence » ou Y = 0 « absence » de renouée), nous avons retenu deux indicateurs : 1) la précision du modèle et 2) le taux de faux positifs (noté FP ; Tableau 6) que le modèle génère. La précision est définie comme le rapport entre le nombre de bassins correctement prédits - présence ou absence de renouée - et le nombre total de bassins étudiés par classe. Le taux de faux positifs (noté FP) est défini comme le rapport entre (i) le nombre de bassins prédits comme n'ayant pas de renouée alors que de la renouée était présente sur le bassin et (ii) le nombre total de bassins où la renouée est présente. Le taux de faux positifs FP est donc une information importante dans notre cas d'étude, car il définit la probabilité que l'on prend à estimer qu'un bassin est exempt de renouée, alors qu'en réalité elle est présente sur le bassin.

Tableau 6: Le tableau de contingence comparant les données observées et prédites (GLM) en terme de «Présence» ou «Absence» de renouée, avec le calcul de la précision et du taux de faux positif FP.

		Prédictions du modèle GLM		
		Absence (PA)	Présence (PP)	
Observation terrain	Absence (OA)	Vrai Positif (VP)	Faux Négatif (FN)	Taux de Vrai Positif (VPR) = $\frac{\sum VP}{\sum OA}$
	Présence (OP)	Faux Positif (FP)	Vrai Négatif (VN)	Taux de Faux Positif (FPR) = $\frac{\sum FP}{\sum OP}$
				Précision = $\frac{\sum (VP + VN)}{\sum (OA + OP)}$

Le Tableau 7 présente la précision et FP des 6 modèles appliqués à la classe de taille sur lesquels ils ont été développés. Les précisions et FP ont aussi été calculés en appliquant les différents modèles (modèle 1 à 6) aux jeux de données des autres classes de bassin (50-600 km²). Cette étape de validation permet de vérifier la robustesse des modèles et leur sensibilité à la classe de taille de bassin versant à laquelle ils sont appliqués. Elle permet ainsi de définir leur capacité à être généralisé.

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Tableau 7 : Précision et taux de faux positifs FP pour les 6 modèles GLM élaborés avec les variables identifiées pour chaque classe de bassin (Modèle1 50-100, Modèle2 100-200, etc...). Chacun de ces modèles ont été appliqués aux autres classes de bassin ([50-100 km²], [100-200 km²],...) pour validation.

		Classes de taille de bassin utilisées pour valider les 6 modèles (km ²)						
		50-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	
Classe de taille de bassin utilisé pour le choix des variables prédictives	Précision (%)	Modèle1 50-100	87.1	84.1	79.7	88.1	88.5	91.3
		Modèle2 100-200	87.6	82.4	80.5	86.9	90.2	91.3
		Modèle3 200-300	87.1	83.0	80.5	89.3	86.9	89.1
		Modèle4 300-400	86.5	83.5	78.9	90.5	86.9	93.5
		Modèle5 400-500	85.9	85.2	83.7	88.1	88.5	91.3
		Modèle6 500-600	80.6	80.7	78.0	86.9	90.2	87.0
		Modèle1 50-100	47.1	40.4	33.3	15.2	14.8	9.1
		Modèle2 100-200	44.1	40.4	33.3	18.2	11.1	9.1
		Modèle3 200-300	44.1	40.4	31.1	15.2	18.5	13.6
		Modèle4 300-400	50.0	40.4	33.3	12.1	18.5	9.1
		Modèle5 400-500	50.0	38.3	28.9	18.2	18.5	9.1
		Modèle6 500-600	85.3	63.8	42.2	21.2	14.8	13.6

Ces tests de validation de modèles permettent ainsi de montrer que la précision générale des modèles est généralement très élevée (> 80%) et peut atteindre 93 %. Ces modèles semblent robustes car leur précision ne dépend pas du jeu de validation utilisé (différentes classes de taille). Les taux de FP sont peu élevés (FP<20%) pour les modèles construits sur les jeux de données des classes de tailles supérieures à 300 km² ; ils peuvent être inférieurs à 10% pour les bassins des classes supérieures à 500 km². Par contre, ces mêmes modèles prédisent des FP

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

importants (30% < FP < 50%) pour les plus petits bassins (< 300 km²). Le risque de prédire qu'un bassin n'a pas de renouée alors qu'il en présente est élevé.

Ainsi, le modèle construit sur des données de la classe de bassin 300-400 km² est un bon compromis entre précision du modèle (>80%) et taux de faux positifs FP raisonnable (<20%). Ce modèle produit moins de FP pour les bassins de tailles supérieures à 300 km². Il s'exprime de la manière suivante :

$$\log\left(\frac{p}{1-p}\right) = -7.736 + 1.128 \cdot N28 + 0.653 \cdot N25 + 0.093 \cdot P_{\text{arti}} - 0.014 \cdot P_{\text{forest}} + 59.184 \cdot tx_{\text{ROE}} + 0.019 \cdot \text{sum_acc}$$

Equation 3

La présence de renouée est donc corrélée positivement avec (1) la variable climatiques (« sum_acc » : précipitation en été), (2) les variables de pression humaine (« P_{arti} » % de zone artificialisée le long du cours d'eau et « tx_{ROE} », densité linéaire de seuils/barrages et « N28 » (ou artificialisation des berges selon Boyer (2001)), et (3) l'érosion des berges (« N25 », degré d'érosion des berges selon Boyer (2001)). Par contre, elle est corrélée négativement avec la densité de forêt rivulaire (« P_{forest} », i.e. % forêt le long des cours d'eau). Ces résultats sont en cohérence avec les hypothèses biologiques énoncées précédemment et les résultats précédents (HER et analyse descriptive à l'échelle des sous bassin).

Comme nous l'avons mentionné précédemment, le choix des variables constitutives des modèles peut être mené en fonction de critères statistiques (précision, FP), biologiques, mais aussi en fonction de critères plus pratiques et opérationnels, comme la facilité pour les opérationnels à mesurer les variables explicatives sur un bassin versant. Par exemple, deux variables utilisées dans les 6 modèles étudiés (« N28 » et « N25 ») sont qualitatives ordinales et difficiles à obtenir de manière automatique par SIG ou télédétection par les gestionnaires de bassin. Par conséquent, un modèle supplémentaire, nommé « Modèle999 », prenant en compte ce critère, a été élaboré et testé (Figure 16). Il prend en compte les variables suivantes :

- « sum_acc » : les précipitations en été, variable issue du RHT et de la base SAFRAN ;
- « P_{forest} » : le % de forêt dans une zone tampon autour des arcs et
- « Parti » : le % de zone artificialisée dans la zone tampon, variables estimées à l'aide de la BD TOPO et d'une zone tampon le long des arcs, dont la largeur est définie en fonction du rang de Strahler de l'arc (Sabastia, 2015) ;
- « tx_{ROE} » : la densité linéaire d'obstacle à l'écoulement, issue de la base ROE et

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

- « Puiss » : la puissance spécifique du cours d'eau, variable issue de la base SYRAH et du RHT.

Le modèle999 (Equation 4) a été calibré avec le jeu de données de la classe de bassin 300-400 km². Il présente des taux de FP relativement faibles (<20%) et une précision élevée (>80%) pour la plupart des seuils de séparation de classe (de 0.3 à 0.5) et pour les différentes classes de taille de bassins de validation (Figure 16). Ce modèle999 s'exprime de la manière suivante :

$$\log\left(\frac{p}{1-p}\right) = -7.561 + 0.022 \text{ sum_acc} - 0.019 \text{ Pforest} + 0.103 \text{ Parti} + 54.8 \text{ tx}_{ROE} + 3.7 E^{-6} \text{ Puiss}$$

Equation 4

La variable puissance spécifique apparaît ici comme pertinente pour ce modèle et présente un lien positif avec la densité de renouée : plus le bassin présente des cours d'eau à forte énergie (débit de crue et pente), plus la présence de renouée est importante.

Chaque modèle est associé à un seuil permettant de séparer les classes « présence » et « absence ». Jusqu'à présent, le seuil utilisé était de 0.5. Des tests de sensibilité ont été menés par Brekenfeld (2016) pour tous les modèles estimés dans cette partie. Ces analyses ont montré que cette valeur de seuil peut fortement influencer sur les indicateurs de qualité des modèles « précision » et « FP ». Ce seuil doit être fixé en fonction des exigences et contraintes des modèles afin de définir si un modèle doit avoir une précision relativement élevée, indépendamment de son FP, ou si le FP doit être très faible, indépendamment de la précision (Figure 16). Dans notre cas, nous cherchons à minimiser le nombre de FP afin de prendre le moins de risque de se tromper en prédisant qu'un bassin n'est pas vulnérable à une invasion de renouée.

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

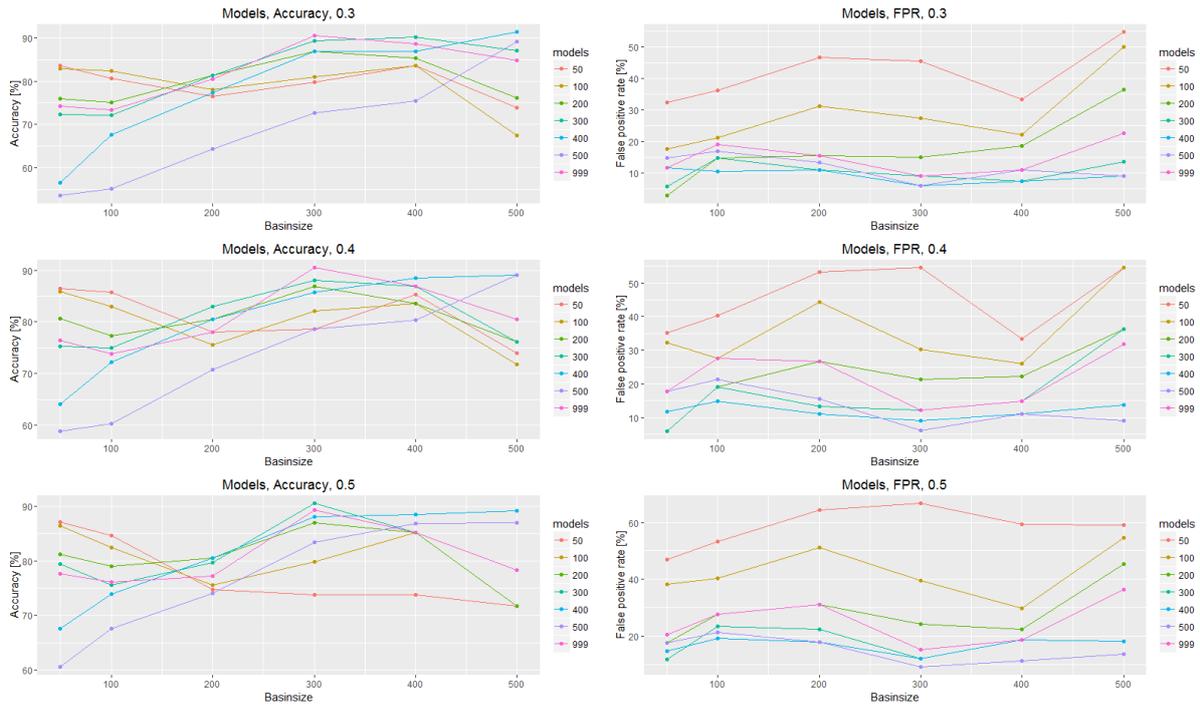


Figure 16: Précisions et taux de FP (en % sur les ordonnées) des 6 modèles (Tableau 7) et du modèle999. Les précisions et taux de FP de ces 7 modèles sont données en fonction de 3 seuils de séparation de classe (0,3, 0,4 et 0,5) et validés avec les différents jeux de données des différentes classes de bassin versant (en km²).

6. Etude de l'invasibilité à l'échelle des tronçons de cours d'eau (notés arcs)

6.1. Objectifs

Nous disposons d'un jeu de données composé d'environ 5 000 arcs de rivière sur l'ensemble du bassin RMC et d'environ 500 arcs sur le bassin de la Saône. Sur ces arcs, nous avons estimé la présence ou l'absence (totale) de renouée observée en 2001 à l'aide des données de Boyer (2001), ainsi que de nombreuses variables prédictives à l'échelle des arcs de cours d'eau et de leur bassin versant respectif (géologie, occupation des sols, climatique, etc.; Sabastia, 2015; Brekenfelf, 2016). Ces arcs ont été géoréférencés au sein du réseau hydrographique théorique (RHT) qui met ces arcs en connexion hydrologique et permet ainsi d'assurer une cohérence amont-aval à l'échelle du territoire français.

Nous avons vu dans les parties précédentes que des variables hydrologiques, climatiques, d'occupation du sol permettent d'expliquer la présence/absence de renouée à l'échelle de bassin versant de 50-600 km². Toutefois, ces modèles ne donnent pas d'information sur la présence/absence de cette plante à l'échelle plus fine, celle du tronçon de cours d'eau et ne permettent pas de mener les analyses sur les rivières de rang important. Il manquait aussi dans l'analyse précédente l'étude des axes fluviaux principaux comme par exemple la Saône, le Rhône, l'Isère ou l'Ain.

L'objectif de cette partie est de définir quelles variables explicatives sont responsables de la présence/absence de renouées à l'échelle de ces arcs du RHT. La difficulté de cette approche réside dans le fait qu'une implantation de renouée à l'amont immédiat d'un site entraîne une probabilité beaucoup plus grande d'en retrouver à l'aval sur ce même cours d'eau. Son installation effective et son développement sur les berges dépendra bien entendu ensuite des facteurs d'invasibilité propres du tronçon de rivière, ainsi que des caractéristiques du bassin versant associé. La prise en compte de cette autocorrélation spatiale amont-aval pour l'analyse à l'échelle du tronçon complexifie la problématique. En effet, le modèle GLM (Modèle Linéaire Généralisé) classique n'est pas adapté pour cette question car son application suppose une indépendance des différents points d'observation.

Plusieurs modèles GLM spatialisés sont présentés dans la littérature scientifique et prennent en compte la proximité des points de données et la covariance spatiale ou autocorrélation spatiale entre points d'observation (ou arcs dans notre cas) proches les uns des autres. Cependant la plupart de ces modèles prennent en compte la distance Euclidienne ($x-y$) séparant les points d'observation (Peterson et al., 2013). Ils sont donc inappropriés pour l'analyse de l'autocorrélation spatiale au sein d'un réseau hydrographique.

6.2. Choix du modèle spatialisé

Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé un modèle récemment développé par ver Hoef et al. (2006) et Peterson et al (2013). Ce modèle prend en compte la distance entre les points d'observation dans un réseau dendritique orienté, en considérant une distance hydrologique entre les points d'observation. ver Hoef et al. (2006) a développé un package SSN (Spatial Stream Network) sous le logiciel libre R. Ce modèle fonctionne sur la base d'un modèle linéaire généralisé GLM, mixte et spatialisé. Il intègre des variables explicatives (i.e. sous l'appellation de « terme fixe ») et une structure de covariance spatiale entre les points d'échantillonnage (i.e. « terme aléatoire »).

Ce modèle linéaire spatialisé peut être écrit sous la forme matricielle/vectorielle suivante (Peterson et al, 2013) :

$$y = X \cdot \beta + z + \varepsilon \quad \text{Equation 5}$$

- avec y , le vecteur de variables aléatoires de réponse (présence/absence dans notre cas) mesurées à plusieurs endroits le long d'un réseau hydrographique ;
- X , la matrice de variables explicatives à l'échelle du tronçon/arc ;
- β , un vecteur de paramètres pour les termes fixes, à savoir les coefficients de régression,
- z , un vecteur de variables aléatoires corrélées spatialement ;
- ε , un vecteur d'erreurs aléatoires indépendantes.

Ce modèle linéaire permet ainsi de décomposer les données en trois composantes: 1) les variables mesurées sur le terrain ou à l'aide d'outil de télédétection (le terme fixe noté $X\beta$) ; 2) les variables non mesurées qui présentent un motif spatial fort (le terme aléatoire z), et 3) des erreurs indépendantes (ε représentant les erreurs de mesure ou de calibration).

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Trois types de covariance spatiale z sont pris en compte dans ce modèle : « tail-up », « tail-down » et « euclidienne » (Figure 17). La covariance de type « tail-up » considère une connexion uniquement si un écoulement connecte les deux points (Fig. 17C). La covariance de type « tail-down » prend en compte des points distants, qu'ils soient ou non connectés par un écoulement. La covariance de type euclidienne prend en compte la distance euclidienne entre différents points. Ces trois types de covariance peuvent être utilisés seuls ou sous une forme combinatoire. Pour chaque type de covariance, quatre à cinq algorithmes différents permettent de calculer les covariances spatiales (exponentielle, linéaire avec seuil, sphérique...).

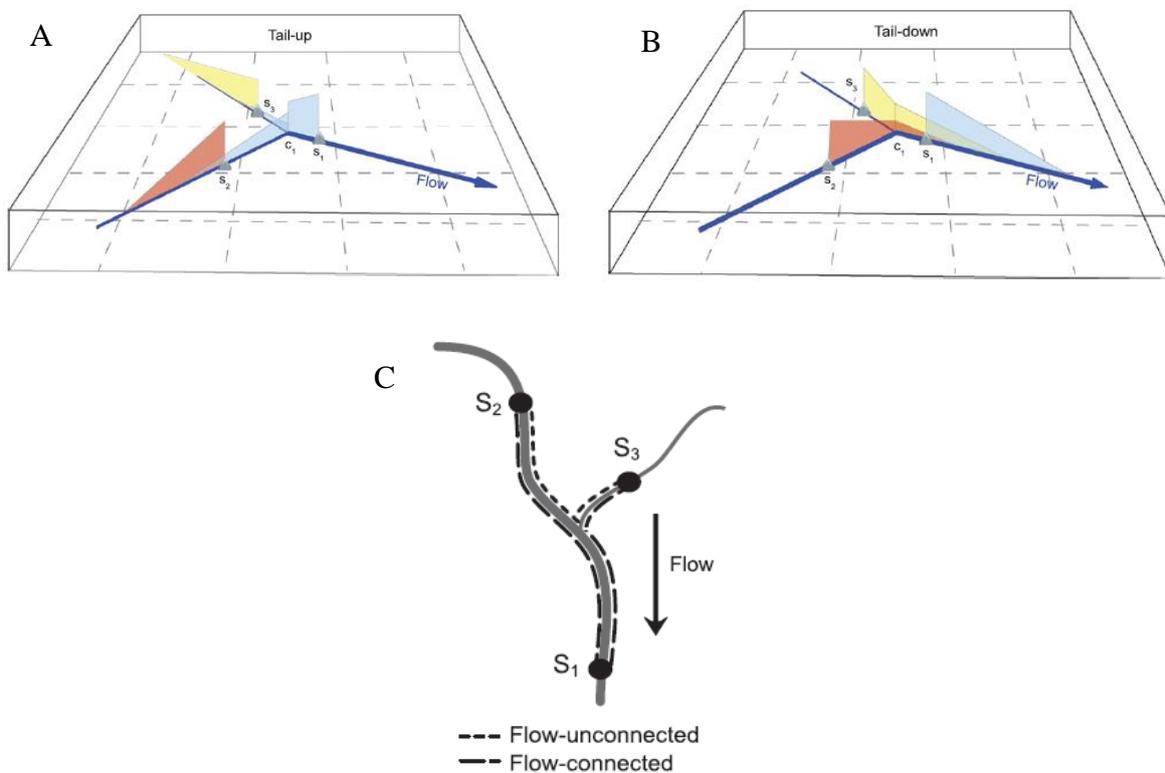


Figure 17 : Illustration de l'auto-covariance spatiale de type « tail-up » (Fig. A), « tail-down » (Fig. B) et la notion de connexion spatiale entre trois points S1, S2 et S3 situés au niveau d'une confluence (Fig. C ; Peterson et al., 2013). Les triangles verticaux symbolisent l'amplitude et la distance de corrélation spatiale avec l'aval (« tail-down ») ou l'amont (« tail-up »).

Une covariance de type « tail-down » correspondrait à un transport de la renouée dans le réseau, par exemple par des castors qui peuvent utiliser la plante comme nourriture ou comme matériel de construction pour leurs barrages et abris et la transporter en amont et/ou aval de sa zone d'implantation (Figure 17A). Une covariance de type euclidienne pourrait correspondre à un

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

transport des akènes par le vent ou un transport de fragments de plante par des activités humaines (e.g. Figure 18B). Ces deux covariances seront négligées en première approche. Dans le cas qui nous intéresse, nous ferons l'hypothèse que la covariance spatiale de type « tail-up » prédomine (Figure 17A), car le mode de propagation prédominant de la renouée s'opère d'amont vers l'aval par l'arrachement et le transfert de propagules pendant les épisodes de crues ou d'akènes qui tombent dans l'eau pour être ensuite transportées par le courant (Fig. C et D). Pour notre étude, nous avons choisi l'algorithme le plus simple de type « linéaire avec seuil » pour représenter cette propagation amont-aval dans le réseau hydrographique.

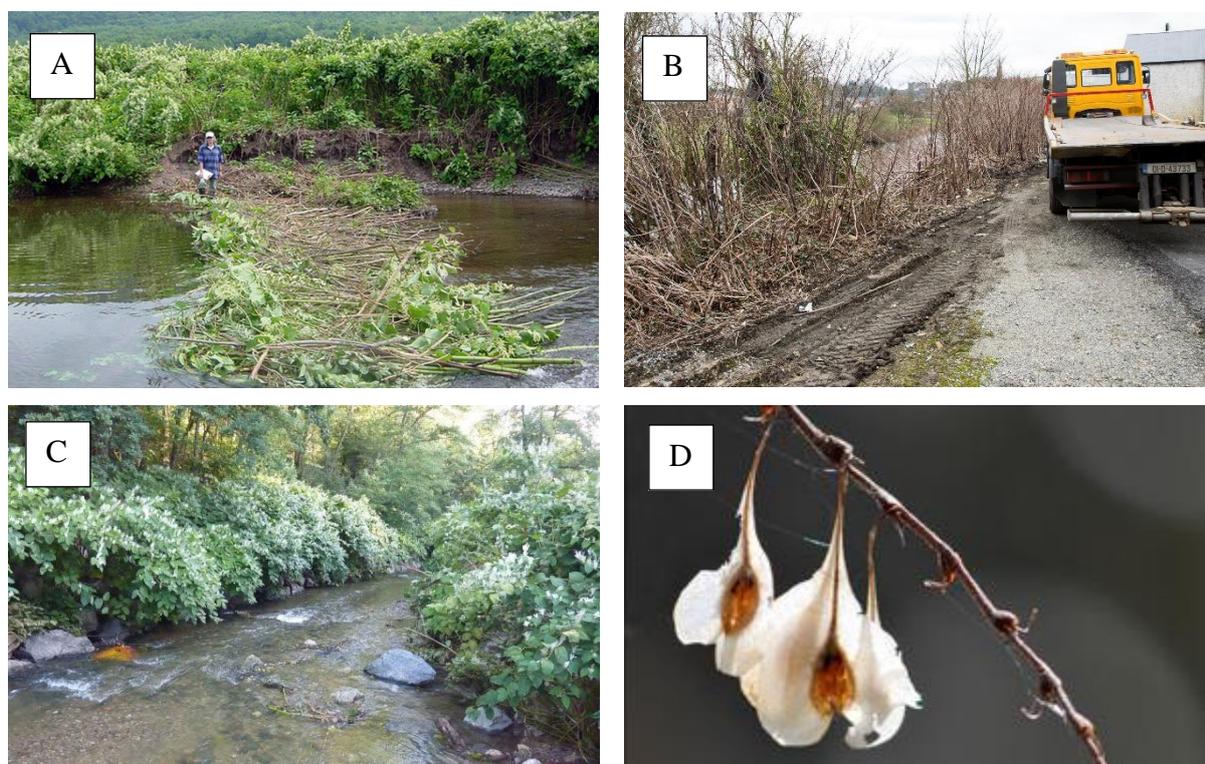


Figure 18 : Barrage de castor constitué de tige de renouée (Fig. A ; source : Mark Folsom, Bugwood.org), transport possible de propagules lors de chantiers à proximité de cours d'eau (Fig. B ; source : ecofactiraland.com). Renouée en fleur le long d'un cours d'eau (Fig. C) et akènes de renouée pouvant tomber dans l'eau puis être transportés par le courant, y compris pour des faibles débits (Fig. D).

6.3. Pré-sélection des variables explicatives utilisées

Pour cette analyse, nous avons considéré séparément le bassin de la Saône et le bassin RMC dans son ensemble car il nous semblait intéressant de savoir si un modèle spécifique

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

pouvait être développé pour le bassin de la Saône afin de prendre en compte ses caractéristiques propres (climatiques, géologiques, d'occupation des sols...).

Environ 60 variables ont été sélectionnées sur le nombre total de variables disponibles à l'échelle des arcs (en utilisant les critères déjà présentés de redondance d'information ou regroupement de variables pour l'étude à l'échelle des bassins versants ; Annexes A et B). Un test de corrélation par paire de variables pour l'ensemble des données du bassin de la Saône a été réalisé sur la base des coefficients de corrélation de Pearson ($<0,5$) et des informations redondantes par des variables similaires. Au final, 24 variables ont été retenues (Tableau 8).

Tableau 8: Les variables explicatives utilisées pour le modèle linéaire généralisé mixte spatialisé du package R SSN.

Abbréviation	Explication
TJUIL_MO	Température moyenne en juillet
PENTE	Pente moyenne
MODULE	Débit moyen inter-annuel
N28	Artificialisation des berges
N25	Erosion des berges
N29	Taille de la végétation rivulaire
P_humide	Pourcentage de zones humides dans la zone de buffer
P_ouvert	Pourcentage de surface ouverte dans le buffer
P_surf_eau	Pourcentage d'eau dans le buffer
P_artifi	Pourcentage de surface artificialisée dans le buffer
P_forets	Pourcentage de forêt dans le buffer
long_arc	Longueur de l'arc
tx_ROE	Nombre d'obstacle à l'écoulement par km
Sum_POPU	Taille de la population vivant à proximité du cours d'eau
Vege_buf	Quantité de végétation dans le buffer
Qspe_crue	Débit spécifique de crue
Etateco	Etat écologique
P_Sedim	Pourcentage de roches sédimentaire dans le buffer
Nb_station_leng	Nombre de station d'épuration par unite de longueur
Phi	Taille granulométrique des sédiments
Spring_acc	Précipitation moyenne au printemps (comme de fevrier, mars et avril)

La mise en application du package SSN sous R et ArcGis est détaillée dans Brekenfeld (2016). Nous ne reviendrons pas ici dans les détails techniques de sa mise en œuvre. A noter toutefois qu'elle a été très complexe compte tenu du nombre de variables et de la taille du réseau étudié, impliquant des temps de calcul très longs pour caler et valider les modèles.

D'un point de vue méthodologique, un sous-échantillon d'arcs a été constitué de manière aléatoire pour l'ajustement de chaque modèle (Fig. 18A). Notre critère de sous-échantillonnage était que les distributions des variables explicatives importantes de ce sous-échantillon soient

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

similaires aux distributions de l'ensemble du jeu de données global. Par « variables importantes », nous entendons celles qui ont été retenues lors de notre analyse à l'échelle du bassin versant.

Pour l'analyse des données sur la Saône, nous avons sélectionné 94 arcs pour calibrer le modèle (appelés aussi arcs d'observation) pour 454 arcs de prédiction (soit environ un cinquième ; Figure 18). La pondération des écoulements pour la constitution de la covariance de type « tail-up » a été estimée sur la base de la surface du bassin versant, prise ici comme proxy du débit. D'autres paramètres, tels que le module ou le débit de crue de période de retour 10 ans auraient pu être utilisés.

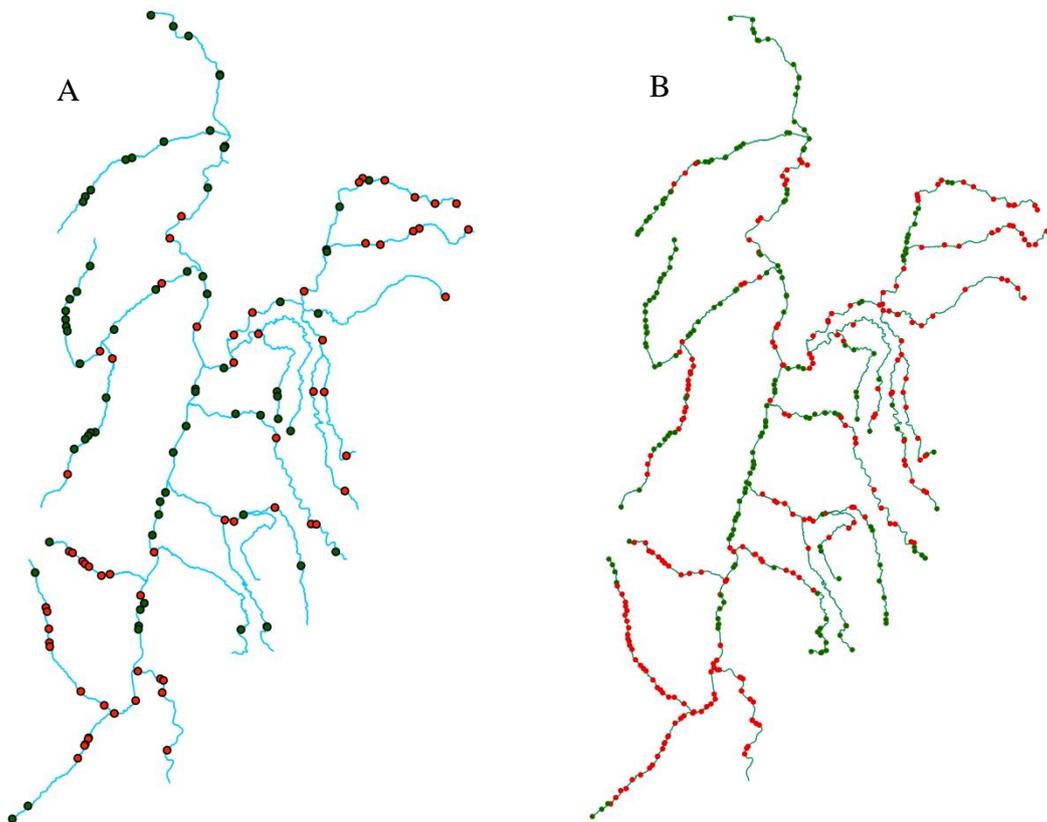


Figure 18 : Etude du bassin de la Saône. Points représentant les arcs utilisés pour l'ajustement du modèle (Fig.A) et la prédiction (Fig.B) ; en rouge avec présence de renouée et en vert, absence de renouée.

Pour sélectionner le modèle le plus pertinent, nous avons utilisé deux critères statistiques:

- L'erreur quadratique moyenne (RMSPE) estimée à l'aide de la méthode « Leave-one-out cross-validation ». Cette méthode consiste à ajuster un modèle, sans utiliser un des

Zone Atelier Bassin du Rhône

points d'observation (noté i). Le modèle ajusté est ensuite utilisé pour prédire la variable de réponse sur ce point i (probabilité de présence/absence). Le résidu, différence entre la valeur observée et la valeur prédite au point i est alors calculé. Cette étape est ensuite appliquée pour tous les points d'observation. On calcule alors la moyenne de tous ces résidus au carré.

- La probabilité seuil : la p-value des variables explicatives après ajustement du modèle.

Les auteurs du package SSN mentionnent que les valeurs aberrantes peuvent avoir un impact négatif sur l'estimation des paramètres du modèle. Ils suggèrent donc de retirer tous les points présentant une valeur résiduelle importante (résidu > 3). Afin de ne pas perdre trop de points d'observation, nous avons enlevé les valeurs aberrantes dont les résidus étaient supérieurs à 3.5 ou 4.5 selon le modèle. Cette étape peut être très problématique pour la calibration du modèle (Brekenfeld, 2016). En effet, la suppression de valeurs aberrantes a un effet important sur l'estimation des paramètres du modèle.

6.4. Application du modèle au bassin de la Saône

Nous avons appliqué ce modèle sur le bassin versant de la Saône. Nous avons réalisé dans un premier temps, une sélection des variables en utilisant le critère de seuil de probabilité des variables explicatives. La combinaison initiale de variables explicatives était alors composée de:

- « TJuil » : température moyenne en juillet sur l'arc,
- « Pente » : pente de l'arc,
- « N28 » : artificialisation des berges à l'arc,
- « N25 » : érosion des berges de l'arc,
- « N29 » : densité de la forêt rivulaire sur l'arc,
- « P_artifi » : %artificialisation du tronçon,
- « P_forest » : %de forêt du tronçon,
- « tx_ROE » : densité linéaire d'obstacle à l'écoulement sur l'arc,
- « Nb_station_length » : Densité linéaire de station d'épuration sur l'arc,
- « Phi » : granulométrie sur l'arc,
- « Spring_acc » : précipitations au printemps sur le bassin versant.

Après retrait des valeurs aberrantes (résidu > 3,5), le modèle ajusté sur les points d'observation était composé de 9 variables explicatives significatives. Nous avons ensuite procédé à un processus itératif afin de ne retenir que les variables les plus pertinentes : i) les paramètres du modèle sont calculés en considérant toutes les observations ; ii) les points d'observation avec un résidu > 3,5 sont retirés ; iii) le modèle est relancé avec ce nouveau jeu de point d'observation ; iv) la variable présentant le pouvoir explicatif le plus important est retirée (p-value ou RMSPE la plus faible) ; v) le modèle est relancé avec les variables explicatives restantes, et ainsi de suite.

Au final, les variables explicatives retirées du modèle sont : « Nb_station_leng », « tx_ROE », « N28 », « Pente » et « P_forets ». 14 à 15 points d'observation ont été identifiées comme étant des valeurs aberrantes au cours du processus itératif de sélection des variables (soit environ 10% des données de calage). Les six variables explicatives restantes étaient hautement significatives ($p < 0.001$), à savoir : « TJuil », « N25 », « N29 », « P_artifi », « Phi », « Spring_acc ». Toutes les variables explicatives, à l'exception de la valeur « phi » sont associées à des paramètres estimés positifs. Ainsi, une augmentation de la température en Juillet (TJuil) associée à des précipitations au printemps plus importantes (spring_acc), une diminution de la densité de forêt rivulaire (N29), une érodibilité des berges plus importante (N25), une augmentation de la surface artificielle dans la zone tampon (P_artifi) entraîneraient une plus grande probabilité de présence de la renouée sur les arcs. Ces résultats sont en accord avec les observations de terrain. Différents modèles ont alors été mis en œuvre avec les variables les plus significatives, du modèle le plus complexe (ModReach1) au plus simple (ModReach6 et 7 ; Tableau 9).

La composante de covariance spatiale est très importante dans tous les cas (>63% ; un maximum de 88% ; Tableaux 9 et 10) montrant l'importance de l'autocorrélation spatiale entre les points d'observation et donc l'importance de prendre en compte les processus de propagation amont-aval de la renouée au sein du réseau hydrographique. La distance de covariance que l'on peut interpréter ici comme la distance moyenne de propagation de la renouée dans le réseau, varie entre 5 et 13 km selon les modèles.

La variance associée aux variables explicatives est beaucoup plus faible (de 1 à 37%). Ce « terme fixe » de variance associée aux variables explicatives augmente naturellement avec le nombre de variables pris en considération dans les modèles.

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

La même méthode a été appliquée en utilisant cette fois-ci le critère de pseudo-vraisemblance (RMSPE). Les variables suivantes ont été retirées une à une du jeu de variables explicatives : « N25 », « tx_ROE », « Nb_station_leng », « pente », « phi » et « Tjuil ». Différents modèles ont été mis en œuvre avec les variables les plus significatives (Tableau 10).

En général, les modèles présentent une précision d'environ 65% ou plus et des taux de FP souvent inférieurs à 20%. Ces modèles montrent un potentiel prédictif fort. Selon le critère de probabilité seuil (Tableau 9), le meilleur modèle en considérant les critères de précision et taux de PF est celui intégrant la variable « P_artifi » seule comme variable explicative. Toutefois ce modèle présente une variance expliquée par les variables prédictives de seulement 1%. L'essentiel de la variance est expliquée par l'autocorrélation spatiale (88%). Le meilleur modèle selon la méthode RMSPE est basé sur les variables explicatives « P_artifi » et « spring_acc » (similaire au modèle « spring_acc » seul ; Tableau 10). La variance expliquée par les variables prédictives reste toutefois faible (6%). La covariance spatiale domine aussi (80%) pour ce modèle.

Tableau 9: Présentation des six modèles sélectionnés à partir du critère de probabilité seuil associé à chaque variable (classés du plus complexe au plus simple, respectivement ModReach1 et ModReach6 et ModReach7). Le (+) derrière le nom d'une variable indique un paramètre de modèle positif, un (-) représente une valeur négative et (ns) non significative. Les modèles en gras sont ceux qui apparaissent comme étant les plus pertinents après la validation diachronique.

Modèle Id	Variables prédictives utilisées	Distance de covariance (km)	Variance expliquée par les variables arc/BV	Covariance spatiale	Précision	Taux de faux positifs FP
ModReach1	TJuil(+), N25(+), N29 (+), P_artifi(+), phi (-), spring_acc (+)	5.2	37	63	67	22
ModReach2	TJuil(ns), N25(+), N29 (ns), P_artifi(ns), spring_acc (ns)	13.2	23	77	68	19
ModReach3	TJuil(ns), N25(+), P_artifi(ns), spring_acc (ns)	13.6	28	72	69	18
ModReach4	N25(+), P_artifi(+), spring_acc (+)	12.5	33	67	65	25
ModReach5	N25(+), P_artifi(+)	11.4	23	77	70	21
ModReach6	N25(+)	10.7	19	81	69	25
ModReach7	P_artifi(ns)	10.7	1	88	71	10

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Tableau 10: Présentation des six modèles sélectionnés à partir du critère de pseudo-vraisemblance des modèles RMSPE. Le (+) derrière le nom d'une variable indique un paramètre de modèle positif, un (-) représente une valeur négative et (ns) une tendance non significative.

Modèle Id	Variables prédictives utilisées	Distance de covariance (km)	Variance expliquée par les variables arc/bassin	Covariance spatiale	Précision	Taux de FP
ModReach8	N28(+), N29(ns), P_artifi(ns), P_forest(ns), spring_acc(+)	12.3	18	82	79	12
ModReach9	N28(+), N29(ns), P_artifi(ns), spring_acc(+)	10.4	18	82	78	13
ModReach10	N28(+), P_artifi(ns), spring_acc(+)	10.4	23	72	76	9
ModReach11	P_artifi(ns), spring_acc(+)	10.3	6	80	75	9
ModReach12	N28(+), spring_acc(+)	9.3	23	69	72	14
ModReach13	Spring_acc(+)	10.1	6	81	75	9
ModReach14	N28(+)	9.8	14	77	76	17

Nous pouvons maintenant analyser la distribution spatiale des erreurs associées aux différents modèles (Figure 19). Ces modèles permettent de représenter avec peu d'erreur la présence/absence de renouée sur l'axe principal de la Saône. Nous pouvons donc penser que les variables caractérisant la pression anthropique aux abords des berges et la précipitation cumulée au printemps permettent d'expliquer en bonne partie l'absence de renouée dans le secteur aval de la Saône. La prédiction de présence de Renouée (alors qu'il n'y en a pas) sur la partie médiane de la Dheune et la partie amont de l'Azergues pourrait être liée à un pourcentage élevé de surface artificielle dans leurs zones tampons respectives (Figure 20). Cela constitue un aspect intéressant du modèle pour organiser une veille à l'échelle des structures gestionnaires, pour prévenir l'implantation et lutter précocement à l'élimination de la renouée.

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

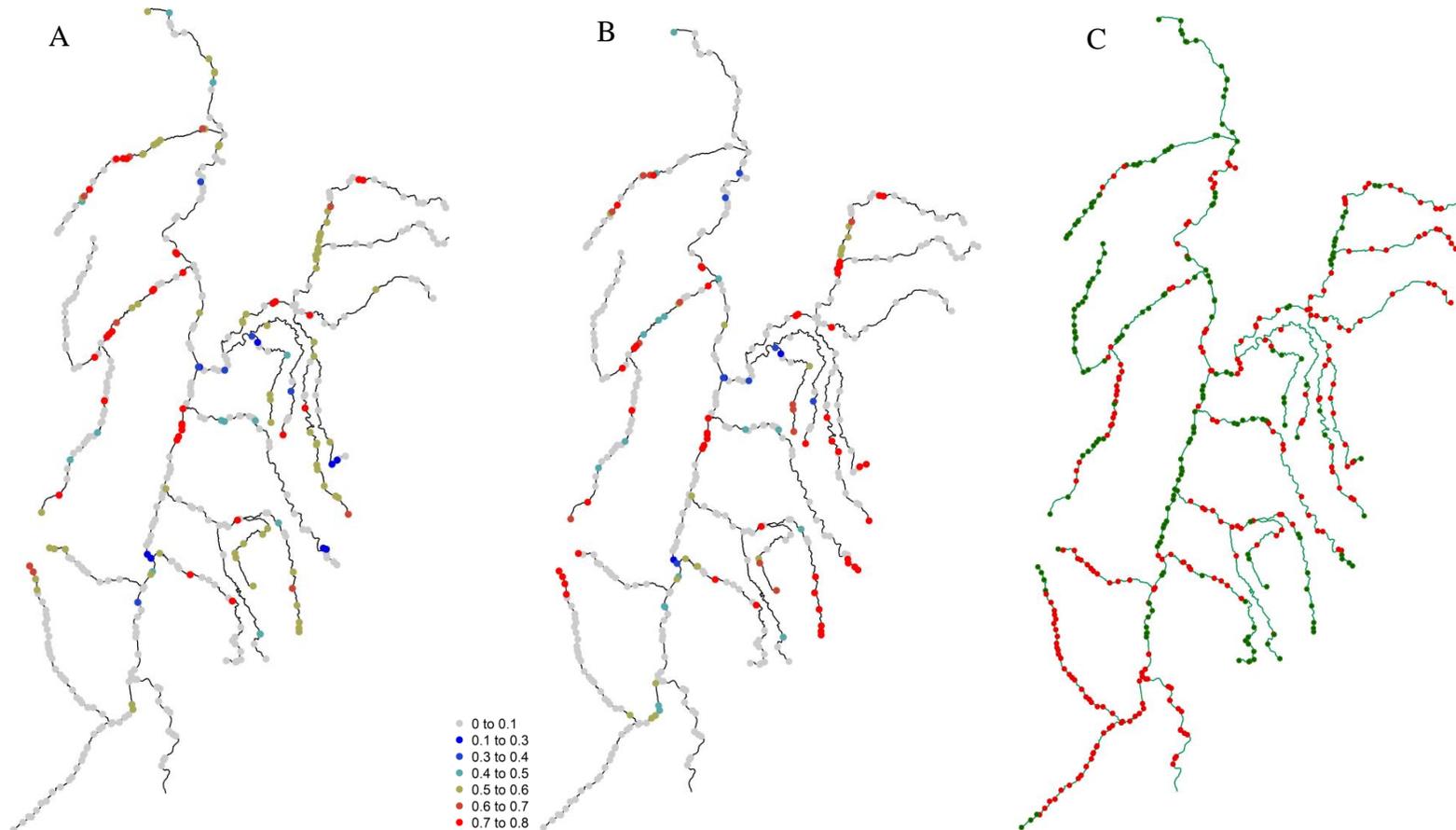


Figure 19: Fausses prédictions pour le bassin de la Saône, sur la base du modèle « P_artif » (Fig. A) et du modèle « P_artif » et « spring_acc » (Fig. B). Les points gris (étiquetés arbitrairement de 0 à 0.1) sont les points correctement prédits par le modèle (probabilité prédite <40% pour les points où la renouée est absente et probabilité >60% pour les points où la renouée est présente). Tous les autres points de couleur indiquent une différence entre les valeurs observées et les valeurs prédites : en rouge, on prédit la présence de renouée alors qu'il n'y en a pas et en bleu, c'est l'inverse. La Fig. C précise les arcs pour lesquels nous trouvons de bonnes et mauvaises prédictions.

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

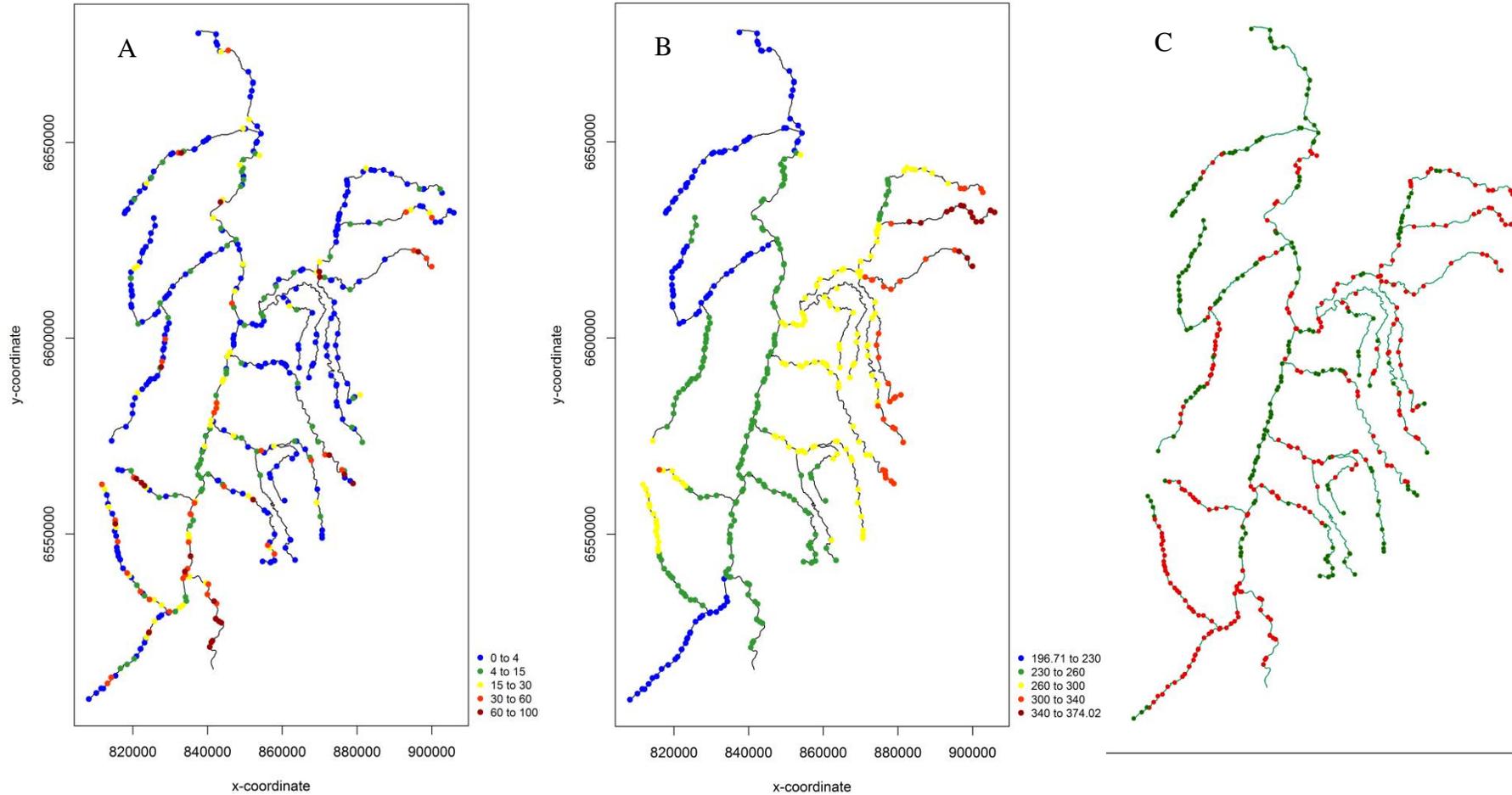


Figure 20: Variables « P_artif » (%artificialisation le long de l'arc dans une zone tampon autour du cours d'eau ; Fig. A) et « spring_acc » (total des précipitations au printemps, en mm ; Fig. B) pour tous les points d'observation sur le bassin de la Saône (Fig C ; en vert « absence » et en rouge « présence » de renouée).

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Sur les secteurs où un modèle ne prédit pas de présence de renouée (Fig. 19A et B) alors qu'elle a été observée (points en bleu Fig. 19C), nous pouvons penser que cela vient du fait que de la renouée a pu être introduite directement sur un site, sans que celui-ci présente un degré d'anthropisation élevé. Le modèle ne peut évidemment pas prendre en compte ces facteurs. A l'inverse, les secteurs où le modèle prédit la présence de la renouée alors qu'elle n'a pas été observée en 2001 (points en rouge, Fig. 19C), pourraient donc être plutôt favorables à l'implantation de la renouée. En effet, le modèle ne prédit l'implantation de la renouée qu'en fonction des variables explicatives, et estime la probabilité de présence à l'aval du site selon le terme de covariance spatiale. On pourrait donc penser que les secteurs identifiés en rouges par le modèle (forte implantation de renouée alors que la renouée n'y était pas présente en 2001) constituent des tronçons aux caractéristiques propices à son implantation. L'intérêt de l'approche ne serait donc plus à ce stade, de prédire exactement les observations de 2001 de présence/absence de renouée à l'aide des différents modèles, mais plutôt d'analyser les résidus des modèles (i.e. différences entre les résultats du modèle et les observations en 2001) afin d'identifier les arcs qui seraient plutôt favorable à l'installation de la renouée indépendamment de sa présence en amont et de sa propagation le long du cours d'eau. Ces cartes de résidus fournissent alors une manière d'approcher la vulnérabilité des différents arcs par la renouée : une vulnérabilité forte et faible, respectivement en rouge et en bleu. Un problème se pose alors quant au choix du modèle le plus réaliste à retenir dans le cas où nous ne baserions plus notre critère de choix du « meilleur modèle » sur les seuls critères de précision et de taux de FP (Tableaux 9 et 10).

Pour choisir le modèle le plus pertinent, nous avons utilisé les informations issues des analyses diachroniques d'évolution de la présence/absence de la renouée sur 10-15 années présentées dans la partie « données utilisées ». Nous comparons ensuite ces tendances observées sur ces quelques cours d'eau aux sorties des modèles présentés dans les Tableaux 9 et 10. Nous ne retiendrons alors que le ou les modèles permettant d'identifier correctement les zones les plus vulnérables, c'est-à-dire celles où une augmentation de la renouée a été observée entre 2001 et 2010/2015.

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

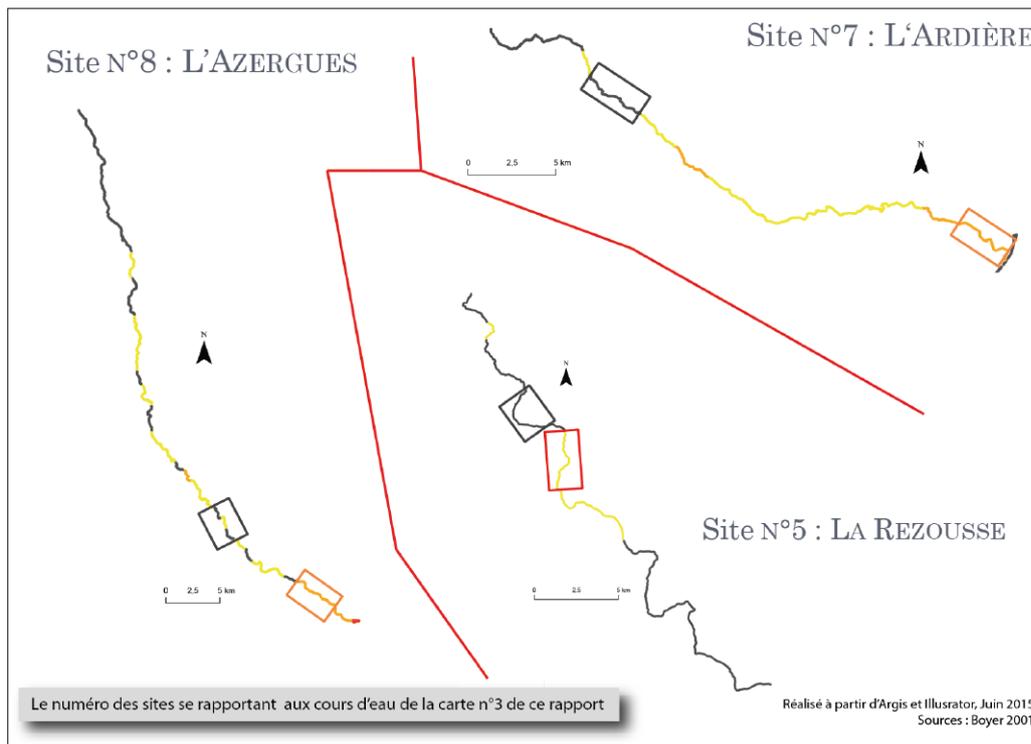
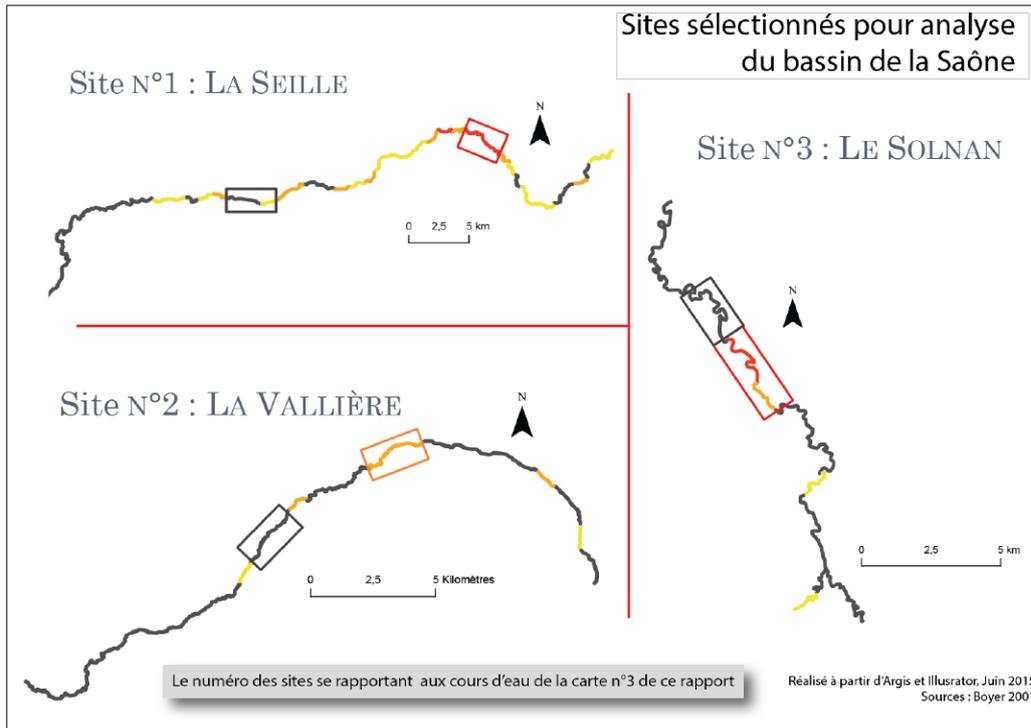


Figure 20 : Evolution des densités de renouée de 2001 à 2015 pour les 36 tronçons sélectionnés du bassin de la Saône

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Densité : 0 = Nulle ; 1 = faible ; 2 = moyenne ; 3 = forte			2001	2015
La Seille	<i>Amont vers aval</i>	Envahi	3	3
			3	3
			3	3
		Non envahi	1	2
			0	1
			0	0
Le Solnan	<i>Amont vers aval</i>	Envahi	2	3
			3	3
			3	3
		Non envahi	0	2
			0	2
			0	2
L'Ardière	<i>Amont vers aval</i>	Non envahi	0	0
			0	1
			0	1
		Envahi	2	2
			2	1
			2	1
L'Azergues	<i>Amont vers aval</i>	Non envahi	0	2
			1	2
			0	1
		Envahi	2	3
			2	3
			2	3
La Ressouze	<i>Amont vers aval</i>	Envahi	1	3
			1	2
			1	0
		Non envahi	0	1
			0	0
			0	0
Vallière	<i>Amont vers aval</i>		2	1
			2	2
		Non envahi	0	1
			0	0
			0	1

Tableau 11 : Evolution de la densité de renouée de 2001 à 2015 pour 6 cours d'eau sur des tronçons considérés comme envahis et d'autres considérés comme non-envahis.

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

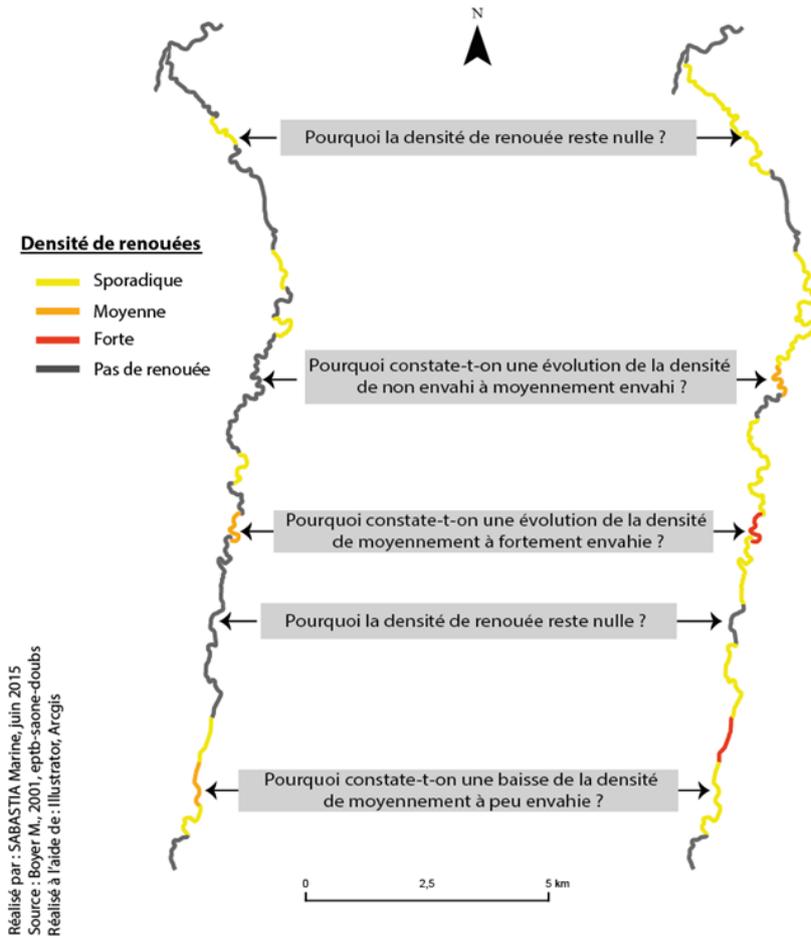


Figure 21 : Evolution des densités de renouées sur la Grosne de 2001 à 2010

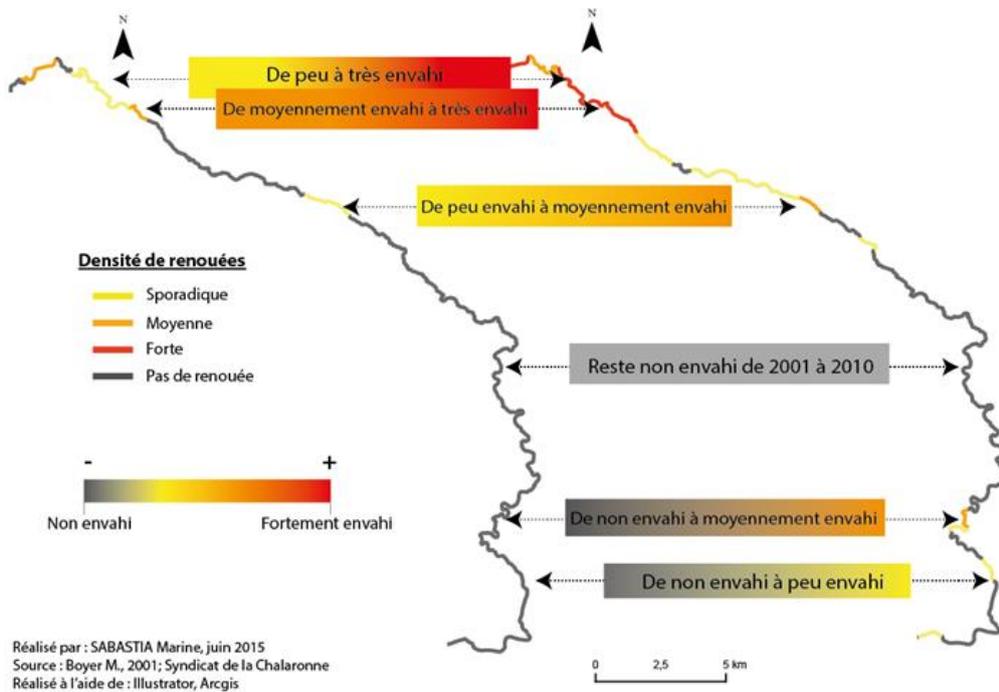


Figure 22 : Evolution des densités de renouée de 2001 à 2010 sur la Chalaronne

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

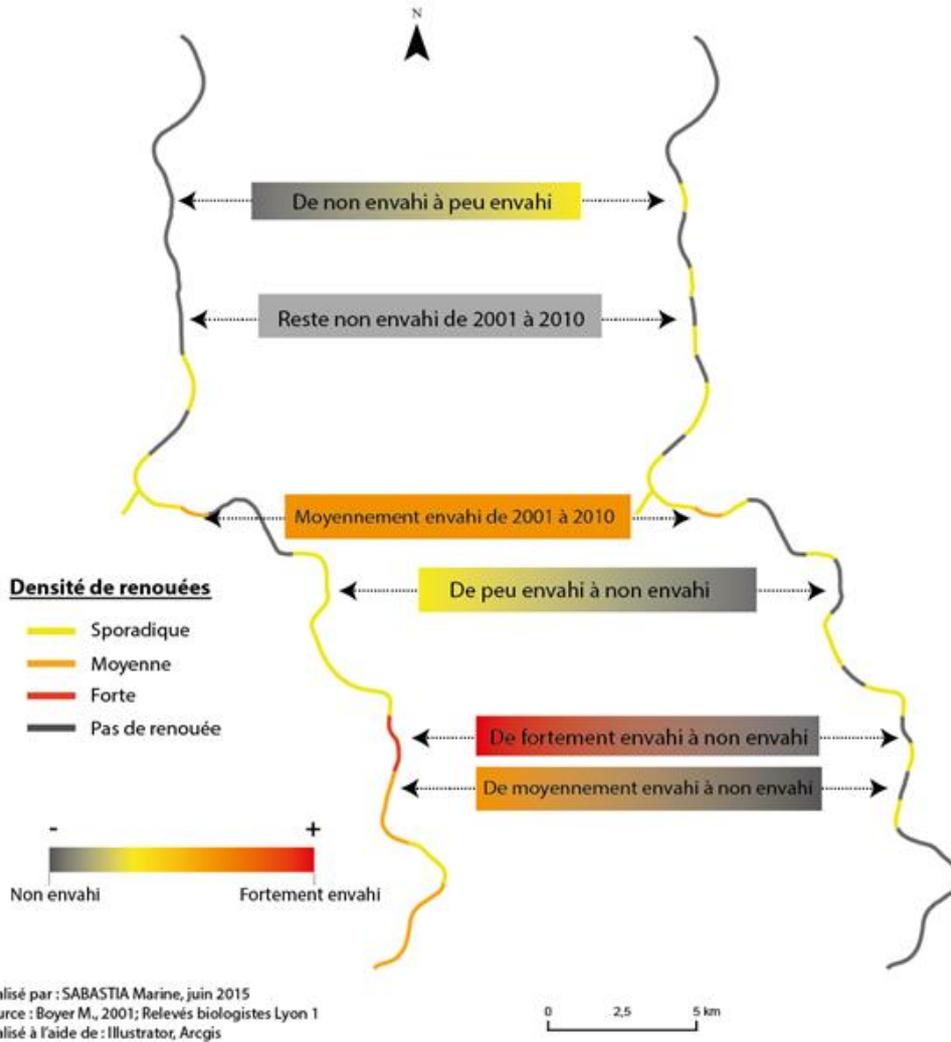


Figure 23 : Evolution des densités de renouée de 2001 à 2013 sur la Saône aval

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Tableau 12 : Comparaison des résultats des différents modèles à l'échelle des arcs (ModReach1 à ModReach13) avec l'approche diachronique menée sur 9 cours d'eau. Un « 1 » signifie que le modèle présente de très bonnes capacités pour prévoir la répartition de la renouée postérieure à 2010/2015 à partir des données de calage de 2001. A l'inverse, un « 0 » signifie que le modèle a failli sur un des secteurs pour prévoir une probabilité de renouée supérieure ou inférieure à 2001. Nous avons ensuite réalisé un total pour calculer un score par modèle (de 0 à 9).

Modèle Id	Variables	Tronçons d'étude									Score total
		La Seille	La Vallière	Le Solhan	La Grosne	La Rezousse	La Chalaronne	L'Ardière	L'Azergue	La Saône	
ModReach1	TJuil(+), N25(+), N29 (+), P_artifi(+), phi (-), spring_acc (+)	1	1	0	1	1	1	0	1	0	6
ModReach2	TJuil(ns), N25(+), N29 (ns), P_artifi(ns), spring_acc (ns)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9
ModReach3	TJuil(ns), N25(+), P_artifi(ns), spring_acc (ns)	1	1	1	1	0	1	1	1	1	8
ModReach4	N25(+), P_artifi(+), spring_acc (+)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9
ModReach5	N25(+), P_artifi(+)	1	1	0	1	0	1	1	1	0	6
ModReach6	N25(+)	1	1	0	1	0	0	1	1	0	6
ModReach7	N28(+), N29(ns), P_artifi(ns), P_forest(ns), spring_acc(+)	1	1	1	1	1	0	1	1	0	8
ModReach8	P_artifi (+)	0	1	0	0	1	0	0	0	0	2
ModReach9	N28(+), N29(ns), P_artifi(ns), spring_acc(+)	1	1	1	0	1	0	1	1	0	6
ModReach10	N28(+), P_artifi(ns), spring_acc(+)	1	1	1	0	1	0	1	1	0	7
ModReach11	P_artifi(ns), spring_acc(+)	1	1	1	1	1	0	1	1	0	8
ModReach12	N28(+), spring_acc(+)	1	1	1	0	1	0	1	1	1	7
ModReach13	Spring_acc(+)	1	1	1	1	1	0	1	1	0	8
ModReach14	N28(+)	1	1	1	0	1	0	1	1	1	7

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Tous les modèles (à l'exception du ModReach7) réussissent à prédire les zones les plus vulnérables ou au contraire les moins propices au développement de la renouée sur 6 sites sur 9. Seul deux modèles (Tableau 12), les modèles 2 et 4, réussissent à prédire les évolutions sur les 9 cours d'eau étudiés (Figures 20 à 23 et Tableau 11). Ils présentent une variance expliquée « fixe » par les variables prédictives beaucoup plus importante que les modèles retenus précédemment (respectivement de 23% et 33%). Le poids des variables explicatives à l'échelle des arcs ou de leur bassin est donc plus important pour ces modèles et la part de la covariance spatiale est de ce fait moins importante (77 et 67%). La précision de ces modèles et le taux de FP sont moins bons que les autres (respectivement 68% et 65% de précision et 19% et 25% pour les FP), mais restent toutefois corrects. Leur capacité à prédire une expansion de renouée ou son déclin sur les 9 cours d'eau est plus importante.

Ces deux modèles présentent des prédictions très similaires sur l'axe Saône qui nous permettent de penser que les conditions actuelles ne sont pas très favorables à son installation. Une nuance est toutefois à apporter sur la partie aval de la Saône, comme le montrent aussi les analyses diachroniques (Figure 23). Les différences entre les deux modèles sont assez minimes (2 endroits, un seul en rouge) comme le montrent les Figures 24.

Nous préférons et retiendrons le modèle ModReach4 (au ModReach2) pour trois raisons : (1) il présente moins de variables explicatives (variables climatique, érosion des berges, artificialisation), il est donc plus simple à utiliser ; (2) toutes les variables présentent un lien significatif avec la présence/absence de renouée ; enfin (3) les tendances des relations (positives) sont en accord avec l'approche au bassin et les hypothèses biologiques.

Nous pouvons donc identifier des secteurs sur le bassin de la Saône et ses affluents où les modèles prédisent une probabilité de présence de la renouée moyenne à forte (observations en vert et rouge sur les Figures 24 et rectangles sur la Figure 25). Cette carte pourrait fournir un outil d'aide aux gestionnaires de ces bassins afin qu'ils focalisent leur attention sur ces secteurs, du moment où ils présentent des enjeux écologiques ou socio-économiques jugés importants.

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

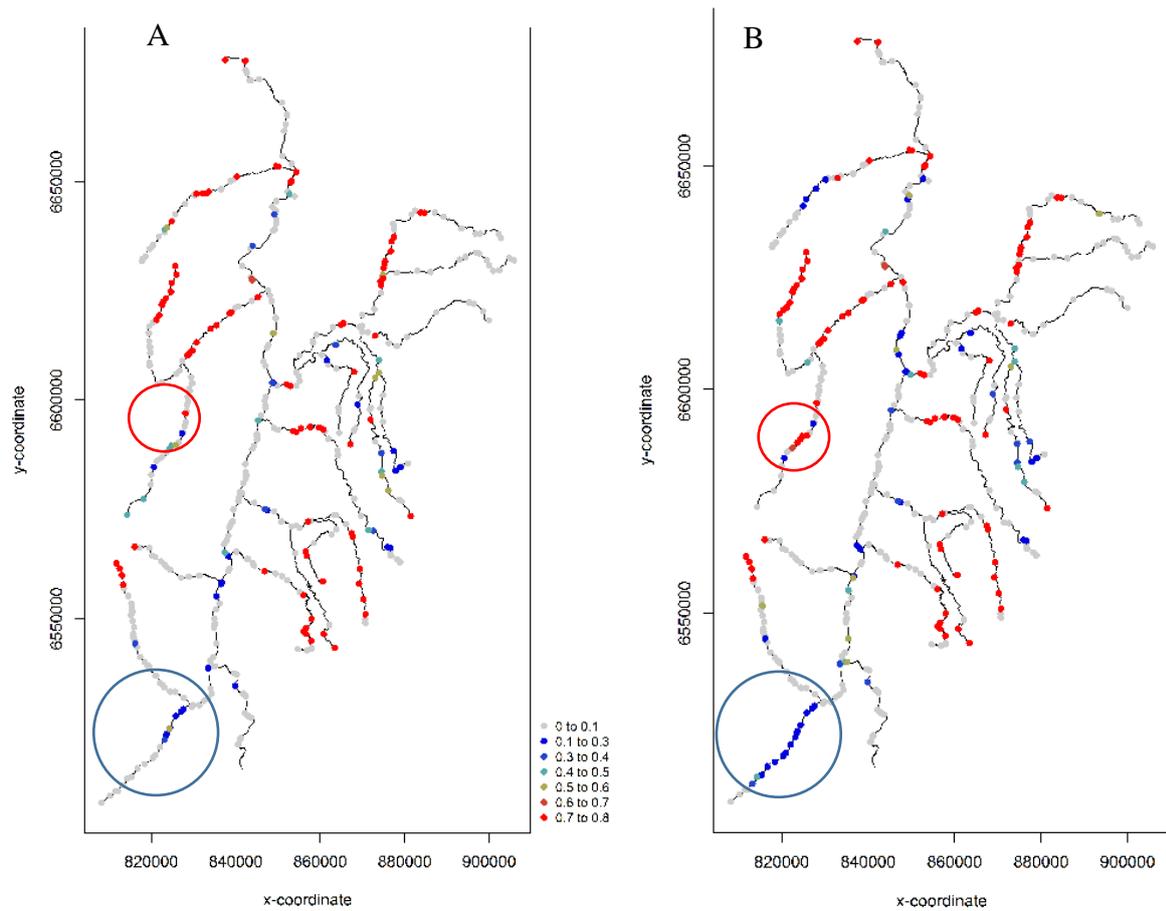


Figure 24 : Différences entre les observations de 2001 et le modèle ModReach2 (Fig. A) et le modèle ModReach4 (Fig. B) identifiés comme les plus pertinents pour la Saône (Tableau 12). Les cercles désignent les principales différences entre ces deux modèles. En gris : les points sont identiques ; les autres couleurs correspondent aux résultats du modèle.

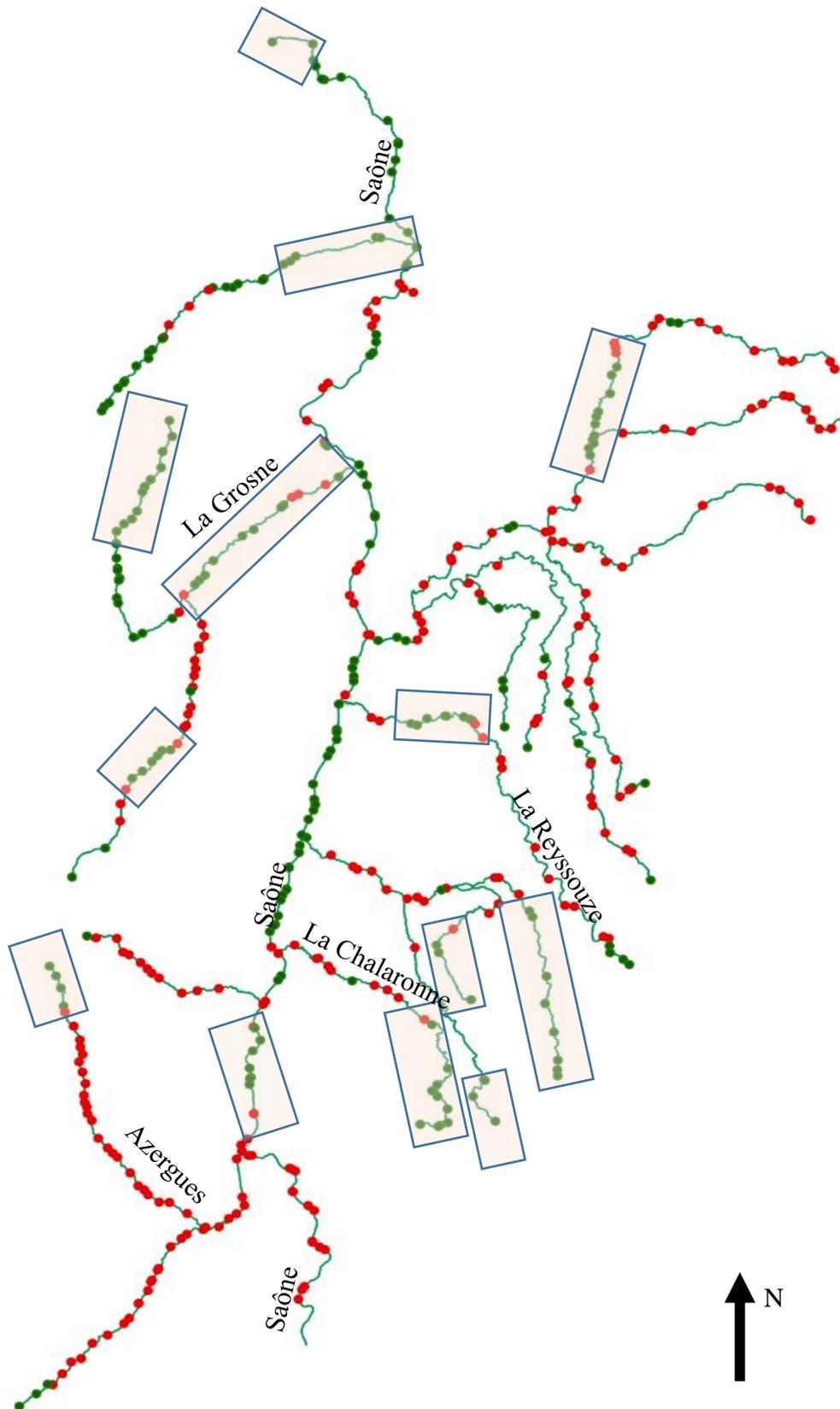


Figure 25 : Identification des principales zones vulnérables à une installation de la renouée selon les modèles ModReach2 et ModReach4 sur la Saône (zones rectangulaires). Les points rouges et verts correspondent respectivement aux tronçons avec et sans renouée en 2001.

7. Analyses menées en mésocosme

7.1. Objectifs

L'invasion est un processus au travers duquel une espèce rare ou absente augmente et domine rapidement dans une communauté (Tilman, 2004). L'établissement d'une telle espèce, sa prise de dominance et l'expansion importante par la colonisation de nouveaux espaces relèvent de trois facteurs: 1) les traits de l'espèce, lui conférant performances et aptitude compétitive, 2) la sensibilité de l'écosystème receveur, définissant son degré d'invasibilité et 3) la relation entre les deux précédents facteurs définissant alors le succès de l'espèce.

Les berges des cours d'eau sont des écosystèmes particulièrement vulnérables aux invasions et représentent des modèles d'étude intéressants car la rapidité des processus d'invasion dans ces écosystèmes permet le suivi de l'établissement de l'espèce jusqu'à sa dominance dans la communauté. Pour une même espèce végétale, sa prolifération le long d'un cours d'eau dépend en grande partie des caractéristiques hydro-géomorphologiques de celui-ci (Bendix et Hupp, 2000). Les perturbations artificielles (aménagement) ou naturelles (crues, érosion de berges/bancs, taux de sédimentation) et leur fréquence/durée impactent cet écosystème et la dynamique végétale du corridor fluvial. Ces facteurs jouent également un rôle important dans la dispersion des propagules. Ainsi, certains cours d'eau peuvent présenter des niveaux contrastés de sensibilité des berges à une espèce invasive végétale se dispersant par le flux d'eau.

Le modèle d'étude est le complexe d'espèces invasives *Fallopia* ou les renouées (*F. japonica*, *F. sachalinensis* et leurs hybrides *F. x bohemica*) qui colonisent activement les zones alluviales des cours d'eau. Dans ces hydrosystèmes, la bonne alimentation en eau et la richesse du sol en éléments minéraux pourraient lui conférer des performances particulièrement élevées, menant à des peuplements monospécifiques. Dans le cas des cours d'eau présentant des crues décapantes, les berges peuvent être rapidement colonisées par les renouées qui concurrencent ainsi les espèces natives. En région Rhône-Alpes, certains cours d'eau sont particulièrement envahis (peuplements monospécifiques sur des linéaires) et représentent des foyers de propagules végétatives (fragments de tiges et de rhizomes) et sexuées (akènes). D'autres, alors même que leurs affluents sont très colonisés, ne présentent pas un degré d'invasion important de par la fréquence de la plante et la taille des peuplements. Il existe donc probablement des

Zone Atelier Bassin du Rhône

filtres environnementaux limitant l'installation et la croissance de l'invasive. La rivière Saône présente des tronçons avec un envahissement faible voire en dépit de la présence d'affluents fortement envahis (ex. Azergues, Brévenne). Cette rivière et son bassin versant peuvent donc constituer un modèle d'étude intéressant pour identifier les facteurs ou filtres environnementaux limitant localement l'installation et la prolifération de *Fallopia*.

L'objectif de cette partie du projet située à l'échelle fine est de tester les capacités d'établissement des propagules sexuées et végétatives de *Fallopia* dans les sédiments prélevés *in situ*. Ces expérimentations ont été réalisées en conditions contrôlées et en mésocosmes. Cette partie du projet doit nous permettre une compréhension des mécanismes biologiques affectant les performances des Renouées.

7.2. Matériels et méthodes

7.2.1. Prélèvements des sédiments et des rhizomes

Des prélèvements de sédiments ont été effectués sur des berges à l'extérieur des virages des cours d'eau (zones à faible courant donc favorables à la sédimentation) pour 8 points de prélèvements (Figure 26 et Tableau 13) répartis dans trois zones différentes. La première zone (zone 1) comprend les berges de Saône situées en amont de la confluence entre l'Azergues et la Saône. La deuxième (zone 2) comprend les berges de l'Azergues en amont de la confluence. Enfin, la troisième (zone 3) implique les berges de la Saône en aval de la confluence des deux cours d'eau.

Les prélèvements ont été réalisés sur une profondeur de 25-30cm et une quantité suffisante de sédiments a été prélevée pour les plantations et l'étude du pH et de la granulométrie.

Au niveau du 5ème point de prélèvement, des rhizomes de l'hybride *Fallopia x bohemica* a été récoltée. Enfin, au niveau de chacune de ces zones, la végétation présente a été succinctement décrite (Tableau 13) sur une surface de l'ordre de quelques mètres autour de chaque lieu de prélèvement afin d'évaluer l'homogénéité de la composition en espèces végétales des zones étudiées.

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

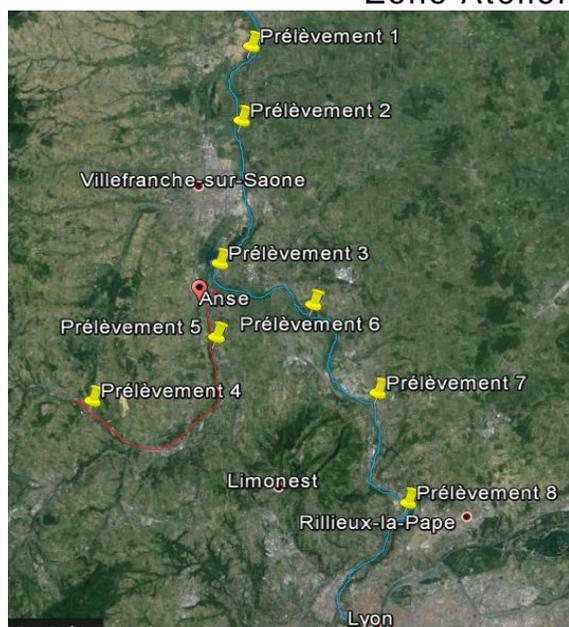


Figure 26 : Localisation des prélèvements

Tableau 13 : Coordonnées GPS des lieux de prélèvements de sédiments

Zones	Prélèvements	Dates et horaires	Coordonnées GPS	Altitudes
Zone 1	1	21/05/2015 10:05	N46 03.434 E4 45.132	44 m
	2	21/05/2015 10:52	N46 01.129 E4 44.712	144 m
	3	21/05/2015 11:35	N45 56.698 E4 43.794	169 m
Zone 2	4	21/05/2015 12:18	N45 52.461 E4 38.625	208 m
	5	21/05/2015 14:50	N45 54.415 E4 43.627	177 m
Zone 3	6	21/05/2015 15:22	N45 55.397 E4 47.548	171 m
	7	21/05/2015 15:52	N45 52.639 E4 50.110	171 m
	8	21/05/2015 16:15	N45 49.228 E4 51.301	161 m

7.2.2. Mise en culture des fragments de rhizomes et des akènes

10 pots (7x7x7cm) ont été remplis pour chaque sédiment afin de réaliser 2 séries différentes de plantations (Figure 27). La première série contenait des pots dans lesquels 5 akènes de *Fallopia x bohemica* ont été placés (Figure 28). La seconde série est constituée de 5 pots, dans lesquels des fragments de rhizomes ont été plantés. Ces rhizomes ont été préalablement découpés au niveau des entrenœuds afin d'obtenir des segments capables de régénérer et de masse identique comprise entre 1,4 et 1,6 gramme. Une standardisation du poids des segments permettait de maintenir une égalité des chances pour la régénération avec une quantité de réserve par segment sensiblement identique.

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Pour chaque sédiment, les 2 séries de 5 pots ont été réalisées, ainsi que 2 séries témoins contenant du terreau standard (Klasmann) soit un total de 90 pots. Les pots ont été disposés en serre, à une température constante (22°C) et un arrosage régulier (1 fois par jour sauf les week end).



Figure 27 : Représentation typique des séries 1 et 2 de chaque sédiment



Figure 28 : Disposition des akènes

7.2.3. Analyse du pH et de la granulométrie des sédiments

Les sédiments ont été analysés de manière à connaître leurs caractéristiques granulométriques. Pour cela, une préparation des sédiments en échantillons analysables par l'appareil de granulométrie laser a été réalisée au préalable. Les sédiments argileux ont donc été passés au tamis 1,6 mm avec ajout d'eau distillée tandis que les sédiments plutôt sablonneux, voire terreux, ont été passés dans une machine à tamis (Retsch, AS 200) à 1,6 mm également. Pour déterminer le pH de chacun des sédiments, environ 5g de chaque sédiment ont été introduits dans des tubes, auxquels ont été ajoutés 25mL d'eau distillé. Les tubes ont alors été mélangés à l'aide d'agitateurs magnétiques pendant 5 minutes, puis laissés au réfrigérateur à

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

12°C pendant 14 heures pour permettre aux solutions d'atteindre leur pH d'équilibre. Une sonde pH métrique (HQ 40d, Hach) a ensuite été insérée et le pH des sols déterminé.

Ces deux opérations ont également été effectuées sur le terreau (témoin).

7.2.4. Analyses statistiques

A partir des données recueillies, des études statistiques ont été réalisées avec le logiciel R.

7.3. Résultats

7.3.1. Régénération des rhizomes

Le nombre de rhizomes régénérés 17 jours après la mise en culture est différent selon le sédiment (modèle linéaire généralisé binomial, $p = 0.017$). Etant donné le faible nombre de répétitions, il n'est pas possible de tester significativement les différences entre les sites mais on peut raisonnablement estimer que le résultat du site 8 est différent de celui du site 4. En effet, aucun fragment de rhizomes n'a régénéré sur les sédiments du site 4 alors que tous les fragments ont régénéré sur les sédiments du site 8.

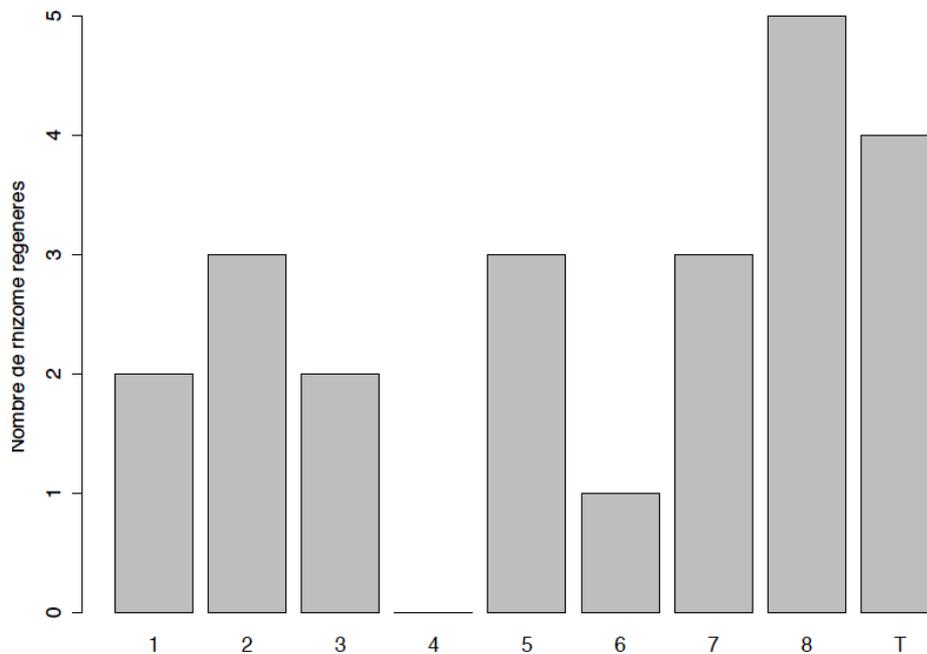


Figure 29: Nombre de rhizomes régénérés par site

7.3.2. Germination des akènes

Le nombre d'akènes germés par pot est différent selon le sédiment (pour les différences entre sites voir la Figure 30, modèle linéaire généralisé binomial, $p < 0,0001$).

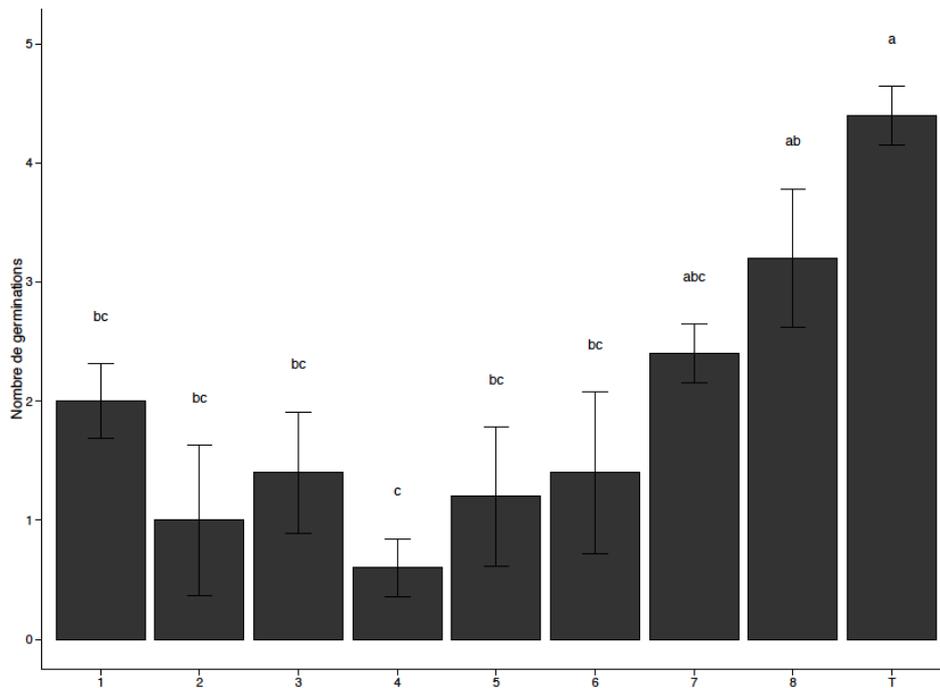


Figure 30 : Nombre de germinations par site

7.3.3. pH et granulométrie des sédiments

Les mesures réalisées montrent un pH basique allant de 7,71 à 8,13 pour tous les sédiments (Tableau 14). Le terreau a un pH acide de 5,71. La granulométrie montre que la zone 1 est surtout argileuse avec peu de minéraux, la zone 2 est plutôt sableuse et la zone 3 plutôt terreuse.

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Tableau 14 : Représentation du pH des sédiments ainsi que leur caractéristiques granulométriques

Prélèvements	pH (12°C)	Structuration	<1,6mm (g)	>1,6mm (g)	Rapport
1	7,87	Argileux	∞	0	x
2	8,13	Argileux	∞	0	x
3	7,79	A-T	77,1	10,1	7,6336633 66
4	7,71	Sableux	153,5	20,1	7,6368159 2
5	7,78	Sableux	142,3	5	28,46
6	7,82	A-T	58,7	0,5	117,4
7	7,8	Terreux	90,9	62,5	1,4544
8	7,99	Terreux	102,8	44,5	2,3101123 6
Témoin (9)	5,71	Terreux	17,4	18,2	0,9560439 56

A-T= Argileux-Terreux

7.3.4. Communauté végétale présente sur les sites de prélèvement

Les espèces végétales présentes sur les sites de prélèvement des sédiments ont été relevées et sont présentées dans le tableau 15.

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Tableau 15 : Relevé succinct des espèces végétales trouvées au niveau des prélèvements

Zones	Prélèvements	Espèces végétales
	1	<i>Salix alba</i> ; <i>Acer campestre</i> ; <i>Corylus cvellana</i> ; <i>Acer negundo</i> ; <i>Fraxinus excelsior</i> ; <i>Urtica dioica</i> ; <i>Carex sp</i> ; <i>Phragmites australis</i>
Zone 1	2	<i>Urtica dioica</i> ; <i>Acer negundo</i> ; <i>Salix alba</i> ; <i>Solidago canadensis</i>
	3	<i>Acer negundo</i> ; <i>Salix alba</i> ; <i>Populus sp</i>
Zone 2	4	<i>Aesculus hippocastanum</i> ; <i>Phalaris arundinacea</i> ; <i>Acer campestre</i> ; <i>Ulmus minor</i> ; <i>Fallopia x bohemica</i> ; <i>Rubus sp</i> (très abondant); <i>Urtica dioica</i>
	5	<i>Fraxinus excelsior</i> ; <i>Urtica dioica</i> ; <i>Ulmus minor</i> ; <i>Salix alba</i> ; <i>Phalaris arundinacea</i> ; <i>Populus sp</i> ; <i>Oenanthe sp</i>
	6	<i>Fraxinus excelsior</i> ; <i>Crataegus monogyna</i> ; <i>Acer negundo</i> ; <i>Phragmites australis</i> ; <i>Alnus glutinosa</i> ; <i>Carpinus betulus</i> ; <i>Ligustrum vulgare</i> ; <i>Oenanthe sp</i> ; <i>Solidago canadensis</i> ; <i>Brassicacées</i> ; <i>Rumex sp</i>
Zone 3	7	<i>Aesculus hippocastanum</i> ; <i>Fallopia x bohemica</i> ; <i>Rubus sp</i> ; <i>Alnus glutinosa</i> ; <i>Urtica dioica</i> ; <i>Elytrigia repens</i> ; <i>Poa sp</i> ; <i>Brassicacé sp</i>
	8	<i>Fallopia x bohemica</i> ; <i>Corylus avellana</i> ; <i>Ulmus minor</i> ; <i>Rubus fruticosus</i> ; <i>Populus sp</i> ; <i>Solidago canadensis</i> ; <i>Poa sp</i> ; <i>Rumex sp</i>

7.4. Discussion

Dans cette étude, l'influence de la nature des sédiments sur les taux de régénération et de germination des plants de *Fallopia* a été évaluée. Nous avons formulé l'hypothèse que la nature des sédiments influençait le développement des propagules sexuées et végétatives de *Fallopia*.

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

En ce qui concerne la régénération des plantules viables issues de fragments de rhizome, les effectifs ne permettent pas de tirer des conclusions statistiquement soutenues mais il apparaît que le nombre de rhizomes régénérés semble différer selon les sites. Pour le site 4, aucun rhizome n'a pu régénérer contrairement au site 8 où tous les rhizomes ont régénéré en une plantule viable. D'une manière surprenante, le site 8 est dans la zone 3 qui correspond à l'aval de la confluence entre l'Azergues et la Saône. Cette zone est actuellement faiblement peuplée en *Fallopia*. En revanche, le site 4 se situe dans la zone 2, en amont de la confluence sur les berges de l'Azergues. Cette zone 2 est fortement envahie par les renouées. Le site 5 qui se trouve également dans cette zone 2 présente une capacité d'installation supérieure à celle du site 4. Il est possible que des paramètres locaux influencent fortement la régénération des fragments de rhizomes.

Les analyses des taux de germination des akènes de *Fallopia* montrent que les taux de germinations dans les sédiments des sites 1, 2, 3, 4, 5 et 6 sont significativement inférieurs à ceux des témoins. En revanche, les taux de germination dans les sédiments des sites 7 et 8 sont similaires aux témoins. Il est également noté un retard de germination pour les akènes cultivés dans les sédiments des sites 1, 2 et 3. Ces résultats semblent être cohérents avec ceux observés concernant la régénération des plantules de renouées issues de fragments de rhizome.

Les résultats obtenus montrent que tous les sédiments récoltés, pour chaque point de prélèvement, ont un pH basique. Seul le sédiment témoin, composé de terreau, est acide. Or, on a pu constater que le terreau témoin est le sédiment le plus favorable à la régénération des plantules issues de rhizome et à la germination des graines, et qu'il possédait les plants les plus hauts et les plus fournis en feuilles. Il semble donc que le pH du sédiment pourrait être un facteur important de l'installation de plantules de renouées que ce soit des propagules végétatives ou sexuées. De plus, le terreau est composé d'une grande quantité de nutriment. La performance de l'espèce envahissante est plus élevée lorsque les plantes grandissent dans un environnement riche en nutriments, par rapport aux espèces de plantes indigènes (Daehler 2003). Les autres sédiments ayant des pH basiques très proches, on ne peut donc pas affirmer que seul un pH basique soit responsable des disparités de régénération et de germination observées entre chaque site.

La granulométrie montre que les sédiments de la zone 1 possèdent une structure argileuse tandis que les sédiments de la zone 2 sont plutôt de type sableux. Enfin, les sédiments de la zone 3 et du témoin sont de nature terreuse. Nos résultats montrent que les sédiments argileux et surtout sableux sont peu favorables au développement des propagules de *Fallopia*. Les sédiments argileux pourraient être trop compacts, ne favorisant pas d'une part la sortie des jeunes tiges

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

issues des rhizomes ou des graines et d'autre part une bonne circulation de l'eau. En ce qui concerne le type sableux, les sites 4 et 5 sont totalement contrastés en terme de résultats. Le site 4 ne semble pas du tout favorable à l'installation des propagules de *Fallopia* alors que le site 5 l'est davantage. Ces deux sites présentent cependant des pH et granulométries très similaires même si il a été remarqué, lors de l'entretien quotidien des plants dans la serre, que les pots contenant les sédiments du site 4 ne permettaient pas une bonne évacuation de l'eau malgré leur nature sableuse. Ce site 4, peut-être par la présence de compétitrices végétales, est particulièrement défavorable à l'installation de *Fallopia* et offre des perspectives intéressantes pour aller plus loin dans l'analyse des filtres défavorables à l'installation des propagules de *Fallopia*.

Nos résultats en mésocosmes ne sont pas complètement en adéquation avec les observations de terrain. En effet, celles-ci indiquent que les berges de l'Azergues en amont de la confluence, sont très favorables au développement des *Fallopia*. Pourtant, les résultats observés ont montré que les sédiments des sites 4 et 5 engendrent les taux de régénération bas, les plants les plus petits et sont peu favorables à la germination des graines. Le site 4 pose un certain nombre de questions car aucun rhizome n'a régénéré et peu d'akènes ont germé.

Néanmoins, pour les sites très peu envahis de la Saône correspondant à la zone 1 (sites 1, 2 et 3), les résultats en mésocosmes sur le développement des akènes montrent que ceux-ci ont une capacité de germination significativement inférieure par rapport au témoin. Mais, les sites 7 et 8 ne montrent pas de différences significatives par rapport au témoin et permettent une germination et une installation des plantules similaires à celle obtenue avec le terreau. Ils correspondent aussi à des sites bien envahis de la Saône. Dans cette zone, il y a aussi le site 6 qui lui, présentent des taux de germination significativement inférieurs au témoin. Des études complémentaires sur les sédiments semblent donc nécessaires afin de déterminer plus finement les caractéristiques physicochimiques et biologiques qui s'exercent à l'échelle locale et influencent la colonisation de *Fallopia* par l'installation des propagules végétatives et sexuées.

8. Discussion générale et pistes de recherche

8.1. Synthèse des différentes approches

A l'échelle de l'hydroécocorégion, la seule variable qui présente une tendance explicative de la présence des Renouées est la densité d'obstacle à l'écoulement (seuls/barrages ; issue de la base ROE ; variable nommée « tx_ROE ») : la densité de renouées à un niveau régional augmenterait avec la densité linéaire d'obstacle à l'écoulement sur le réseau hydrographique (Fig. 10).

A l'échelle des sous bassin versant RMC, et selon leur taille, 25 variables explique potentiellement la présence ou l'absence de renouées (Fig. 15). En revanche, les variables « précipitations en été », « artificialisation des berges » et « densité linéaire d'obstacle à l'écoulement » permettent de discriminer les bassins quelle que soit la classe de taille de bassin considérée (Tableau 5 ; modèle de régression logistique). Le modèle de bassin « modèle999 » (Equation 4) rajoute en outre la valeur explicative « puissance » spécifique du cours d'eau qui permet de relier cette caractéristique du cours d'eau avec sa capacité à éroder les berges et éventuellement arracher des fragments de plantes et les disperser activement.

A l'échelle des tronçons (ou arcs), quel que soit le modèle choisi, les variables caractérisant les facteurs climatiques (température juillet « T_juill » et pluie au printemps « Spring_acc ») et les pressions anthropiques (artificialisation des berges « N28 » et pourcentage d'artificialisation du tronçon « P_artif ») ressortent clairement de l'analyse.

Aux trois échelles analysées, des résultats cohérents sont obtenus. En effet, l'artificialisation des berges est liée à des activités anthropiques propices à l'introduction de propagules sexuées ou végétatives mais également les berges altérées représentent des zones de dépôt favorables à la rétention et à l'installation des propagules dispersées par le cours d'eau, au même titre que les obstacles à l'écoulement. Il ressort également que le facteur climatique joue un rôle important permettant probablement la survie et donc l'installation des jeunes plantules issues des propagules sexuées et végétatives. Enfin, la densité de la végétation rivulaire aurait plutôt tendance à diminuer l'implantation de la renouée sur ces secteurs. Il est à noter aussi qu'aucune tendance n'a été détectée pour les variables caractérisant la géologie ou la lithologie et cela, quelle que soit l'échelle considérée, arc ou bassin.

Zone Atelier Bassin du Rhône

De surcroît, les analyses en mésocosmes portant sur l'effet des sédiments sur la régénération des propagules montrent que, même si il existe une tendance à ce que certains sédiments de la Saône soient moins propices à l'installation des plantules issues d'akènes ou de fragments de rhizomes, il existe un sédiment issu de l'Azergues fortement envahie par les renouées, qui ne permet aucune régénération à partir des rhizomes et une très faible germination des akènes. Ni les caractéristiques granulométriques, ni le pH de ce sédiment ne permet d'expliquer ce résultat. Des hypothèses peuvent être formulées comme la présence d'une forte résistance biotique interspécifique (allélopathie par exemple), une pollution locale ou une microflore du sol défavorable et des pistes de recherche peuvent être proposées.

8.2. Approche au tronçon pour le bassin RMC

Pour analyser la vulnérabilité des cours d'eau du bassin RMC au risque d'invasion par la renouée, la méthode à l'échelle des arcs présentée précédemment pour la Saône a été appliquée au bassin RMC. 239 arcs d'observation sur 4 980 arcs de prédiction ont été sélectionnés (soit environ un vingtième ; Figure 31). Les différents paramètres du modèle ont été conservés (type « tail-up », pondération par la surface des bassins versants).

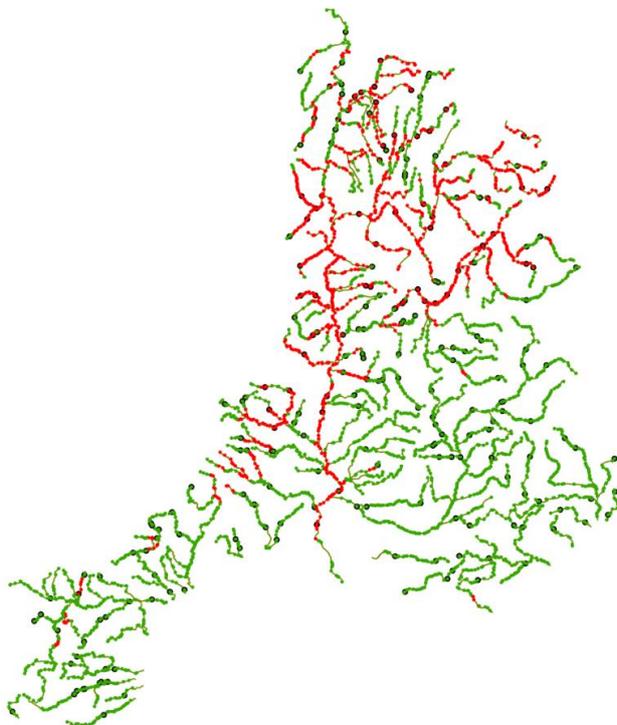


Figure 31: Points du bassin RMC utilisés pour l'ajustement du modèle (cercles noirs) et la prédiction (les autres points). Les points rouges représentent la présence de renouée ; les points verts représentent l'absence de renouée.

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

En utilisant les critères de probabilité seuil (p -value<0.05) et RSMPE pour sélectionner les jeux de variables explicatives pertinentes, nous avons identifié différents modèles candidats potentiellement capables de modéliser l'implantation de la renouée (Tableaux 16 et 17). 5 modèles ont été identifiés à l'aide du critère de probabilité seuil et 7 à partir du critère RMSPE.

Tableau 16: Présentation des cinq modèles sélectionnés à partir du critère de probabilité seuil. Le (+) derrière le nom d'une variable indique un paramètre de modèle positif, un (-) représente une valeur négative et (ns) non significative. TFP:-taux de faux positifs.

Variables prédictives utilisées	Variance expliquée par les variables arc/BV	Covariance spatiale	Précision	Taux de faux positifs
TJuil(+), Module(+), N28(+), N25(+), P_artifi(+), P_forest(-), P_sedim(-), spring_acc(+)	24	28	82	51
TJuil(+), Module(+), N28(+), P_artifi(+), P_forest(-), P_sedim(-), spring_acc(+)	26	34	82	52
Module(+), N28(+), P_artifi(+), P_forest(-), P_sedim(-), spring_acc(+)	25	38	82	52
Module(+), N28(+), P_artifi(+), P_forest(-), spring_acc(+)	27	2	81	55
Module(+), N28(+), P_forest(-), spring_acc(+)	26	11	81	57

Tableau 17: Présentation des six modèles sélectionnés à partir du critère de pseudo-vraisemblance des modèles RMSPE. Le (+) derrière le nom d'une variable indique un paramètre de modèle positif, un (-) représente une valeur négative et (ns) non significative. TFP:-taux de faux positifs.

Variables prédictives utilisées	Variance expliquée par les variables arc/BV	Covariance spatiale	Précision	Taux de faux positifs
TJuil(+), Pente(-), N28(+), P_forest(-), P_sedim(-), spring_acc(+)	20	28	78	59
TJuil(+), Pente(-), N28(+), P_forest(-), spring_acc(+)	19	27	78	60
Pente(-), N28(+), P_forest(-), spring_acc(+)	27	21	79	65
Pente(-), N28(+), P_forest(-)	26	40	78	72
Pente(-), P_forest(-)	5	53	84	41
P_forest(-)	5	34	81	40
Pente(-)	8	38	81	51

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Pour la sélection sur la base des seuils de probabilité, la combinaison initiale de variables explicatives était: TJUIL, Pente, Module, N28, N25, N29, P_artifi, P_forets, tx_ROE, Sum_Popu, vege_buf, Qspe_crue, P_sedim, Nb_station_leng, phi et spring_acc. La procédure de sélection est identique à celle utilisée pour la Saône. Entre 14 et 19 valeurs aberrantes ont été supprimées pour la plupart des modèles. Des variables explicatives ont été supprimées dans l'ordre suivant : tx_ROE, phi, N29, Qspe_crue. Toutes les variables restantes (n = 12) ont été significatives. Pour des contraintes liées au fonctionnement du modèle SSN, seuls les variables (n = 8) qui avaient une valeur de $p < 0,01$ ont été conservées. Pour le choix des variables explicatives, basées sur RMSPE, les variables explicatives suivantes ont été supprimées dans l'ordre suivant: vege_buf, tx_ROE, P_artifi, phi, N25, N29, Module, Nb_station, Sum_Popu et Qspe_crue.

La précision des modèles est bonne à très bonne (généralement autour de 80%). Par contre ils présentent des taux de FP importants (de 40 à 72%), beaucoup plus important que ceux de la Saône. La variance expliquée par les variables prédictives est du même ordre que pour la Saône (entre 5 et 27%), par contre la covariance spatiale est beaucoup moins importante (entre 2 et 53%). Les variables identifiées comme explicatives reflètent les conditions des arcs tant d'un point de vue climatique (TJuil(+), spring_acc(+)), hydrologique (Module(+)), géomorphologique (N25(+), pente (-)) ou d'occupation des sols (N28(+), P_artifi(+), P_forest(-)). Les variables vont dans le sens des observations sur le terrain et hypothèses biologiques à l'exception de la pente qui pour cette analyse présente une tendance négative. A noter qu'une variable géologique (P_sedim(-)) apparaît à cette échelle de travail. Il semble toutefois délicat à ce stade d'interpréter ces résultats plus finement.

Sans donnée de validation disponible, la question reste toutefois ouverte pour identifier parmi ces modèles, lequel ou lesquels seraient les plus pertinents pour fournir une carte d'invasibilité robuste et réaliste à l'échelle RMC. Nous pouvons uniquement à ce stade proposer une synthèse des différents modèles (Figure 32). Nous avons cherché à identifier les secteurs de cours d'eau pour lesquels les modèles convergent vers une même estimation de la vulnérabilité (rectangles foncés). Cette approche nous permet de mettre en évidence que les secteurs vulnérables sont localisés dans des bassins versants où il y a déjà de la renouée. Les secteurs très vulnérables sont la Saône aval, l'Ain amont, l'Arc, l'aval de l'Isère, la Drôme médiane, l'Ardèche amont et la basse Ardèche et le bas Rhône.

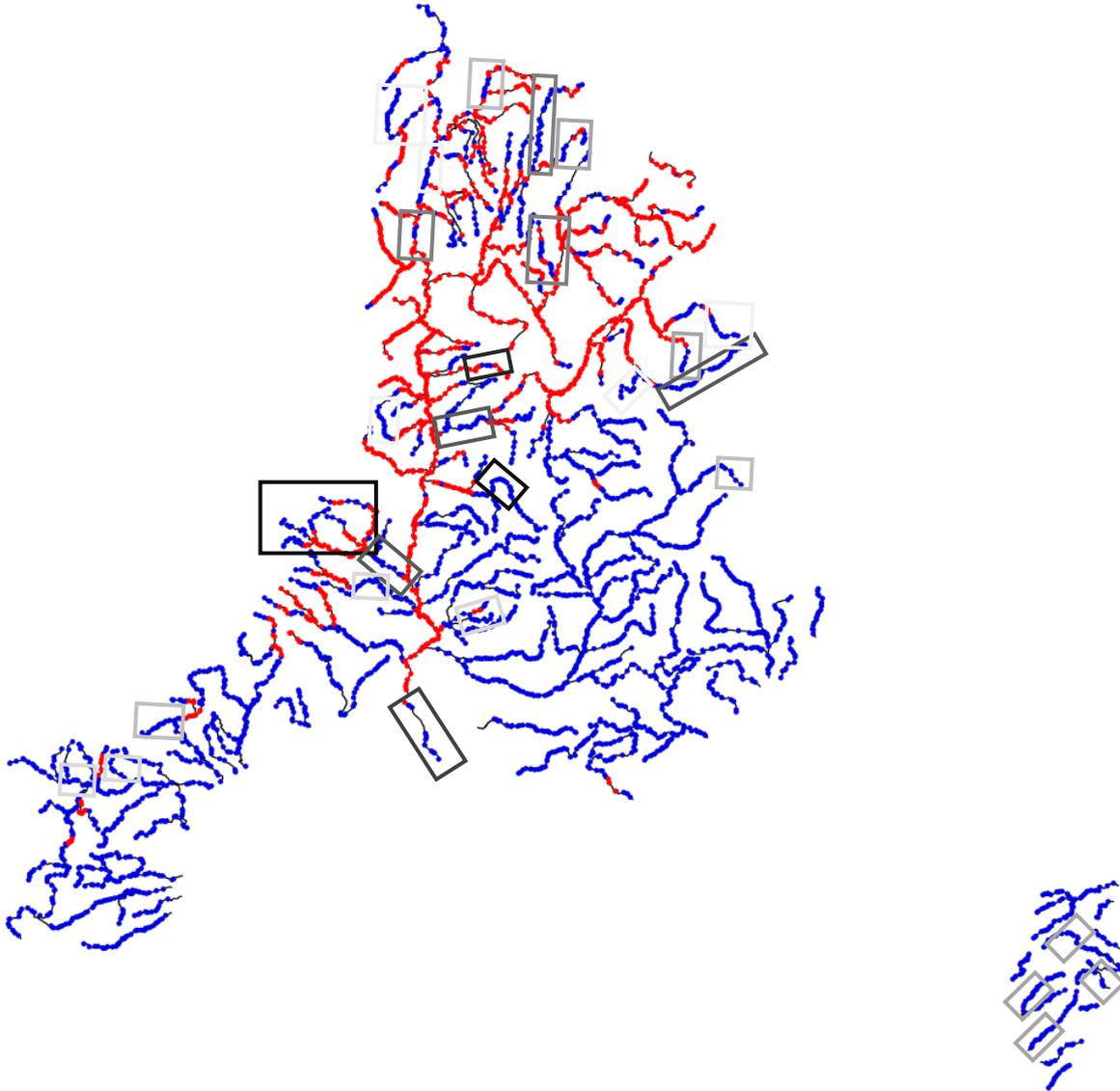


Figure 32: Observations de la renouée dans le bassin RMC en 2001 (en rouge : présence ; en bleu : absence). Les rectangles indiquent les cours d'eau pour lesquels les modèles prédisent de la renouée alors qu'il n'y en a pas. Plus le rectangle est foncé, plus les modèles convergent vers une vulnérabilité importante pour ces zones (ex. Ardèche, Bas-Rhône, Haute-Isère). Des rectangles clairs indiquent qu'un seul ou deux modèles prédisent une vulnérabilité plus importante (ex. Corse).

Cette analyse n'est toutefois pas suffisante pour proposer de manière rigoureuse une carte de la vulnérabilité des cours d'eau RMC à l'invasion de la renouée. Il faudrait, comme pour l'étude diachronique de la Saône, réaliser des inventaires sur une sélection de rivières et comparer ces observations avec les données de 2001 ou réaliser une enquête ciblée auprès d'un échantillon de gestionnaires (ARPE, SMAGE des Gardons, PNR du Luberon ...) sur la présence

ou l'absence de renouée dans des arcs identifiés. Nous pourrions alors en tirer des informations pour la sélection du modèle le plus approprié. Une autre approche consisterait à utiliser des outils de télédétection de la renouée afin de remédier au problème de couverture spatiale des observations, de problème de la multiplicité des opérateurs et des protocoles d'observation, dans un souci d'harmonisation tant spatiale que temporelle des inventaires de densité de renouée. C'est la piste que nous proposons d'explorer dans la partie suivante.

8.3. *Utilisation de la télédétection pour cartographier la renouée et analyser l'évolution de sa présence*

La réalisation de cartographies exhaustives des secteurs impactés par la renouée du Japon nécessite la mise en place d'outils adaptés. Ceux-ci doivent répondre à la fois aux contraintes liées à la variabilité des échelles des espaces impactés (du tronçon au bassin versant), à leur mobilité et à leur stade de colonisation. Les images satellites et photographies aériennes sont des couches d'information spatiales adaptées à l'étude des milieux, notamment pour caractériser la végétation rivulaire et les espèces invasives telles que la renouée. De précédents travaux ont démontré qu'il était possible d'identifier des taches de renouée par différents procédés de traitement d'images et par la combinaison de différents vecteurs (aériens et satellitaires) (Tsai *et al.*, 2006 ; Murray *et al.*, 2010 ; Jones *et al.*, 2011 ; Rachex 2014 ; Stromboni 2015). Dorigo *et al.* (2012) ont proposé une méthode de télédétection de la renouée en comparant des images aériennes (orthophoto à 50 cm de résolution) prises à différentes périodes de l'année (durant la période végétative en été et durant la période de repos en hiver). L'argument avancé par les auteurs est de minimiser à la fois la confusion qu'il peut y avoir l'été entre la surface foliaire de la renouée et celle des espèces végétales environnantes tout en mettant en valeur le signal particulier que les tiges de renouée présentent en période hivernale (Fig. 33). Une autre approche mise au point par Jones *et al.* (2011) basée sur un traitement par classification orientée objet (reconnaissance des formes et des textures) a été menée à partir d'images à haute résolution spatiale (image aérienne à 40 cm de résolution) contenant une bande spectrale du proche infrarouge (gamme de longueur d'onde dont le pourcentage de réflexion est fort sur surface végétale).

Rachex (2014) quant à lui a testé différentes images i) aériennes telles que les orthophotos IGN et infrarouge IGN d'une résolution de 50 cm ii) satellitaires telles que les images Pléiade offrant

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

une résolution de 50 cm en mode panchromatique et 2 m de résolution en mode multispectrale avec une bande dans l'infrarouge. L'auteur met en avant la faiblesse actuelle des résolutions satellitaires malgré des gammes de longueurs d'ondes spectrales plus variées et des fréquences de passage plus importantes que les images aériennes. Différentes techniques de classification (pixel à pixel, orientée objet) ont été appliquées et couplées à des calculs d'indices (NDWI, ACP, BTBR, GLCM etc.). Les résultats de cette étude ont démontré des taux de détection importants (de 75 à 92%) sur les secteurs étudiés. Les résultats obtenus ont permis de réaliser une cartographie précise de la présence de renouée sur plusieurs tronçons de l'Azergues (Figures 34 et 35).

Les travaux menés par Stromboni (2015) complètent les études des précédents auteurs en y ajoutant l'imagerie drone (1cm de résolution) combinée à des orthophotos IRC IGN et en intégrant une approche 3D (création de modèle numérique de surface).



Figure 33 : exemple de tache de renouée en janvier sur l'Azergues (Rachex, 2015)

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

La majorité des études réalisées et notamment celles menées récemment (Rachex 2014 ; Stromboni, 2015) convergent vers des préconisations similaires pour étudier et tenter d'inventorier la renouée par imagerie. Ces préconisations se traduisent par la prise en compte de plusieurs paramètres clefs i) bénéficier d'images à haute (décimétrique) ou très haute résolution spatiale (centimétrique), ii) avoir à disposition différentes bandes spectrales dont une intégrant l'infrarouge, iii) utiliser des images multi-dates acquises à différentes périodes de l'année.

Malgré les résultats encourageants obtenus à partir des différents travaux de recherche cités précédemment, des difficultés demeurent pour généraliser les méthodes développées à des territoires plus larges tels que les bassins versants. Ces difficultés de détection de la renouée par imagerie résident à la fois dans la taille des taches (très variables) et dans la confusion des signatures spectrales de la renouée avec la végétation environnante. Le développement de nouveaux capteurs hyperspectraux (sensibles à des gammes de longueurs d'onde très étroites) et leur miniaturisation (permettant de les utiliser sur des vecteurs légers tels que les ULM et les drones) devraient pouvoir améliorer les résultats, les suivis et ainsi aborder des échelles de travail plus larges.

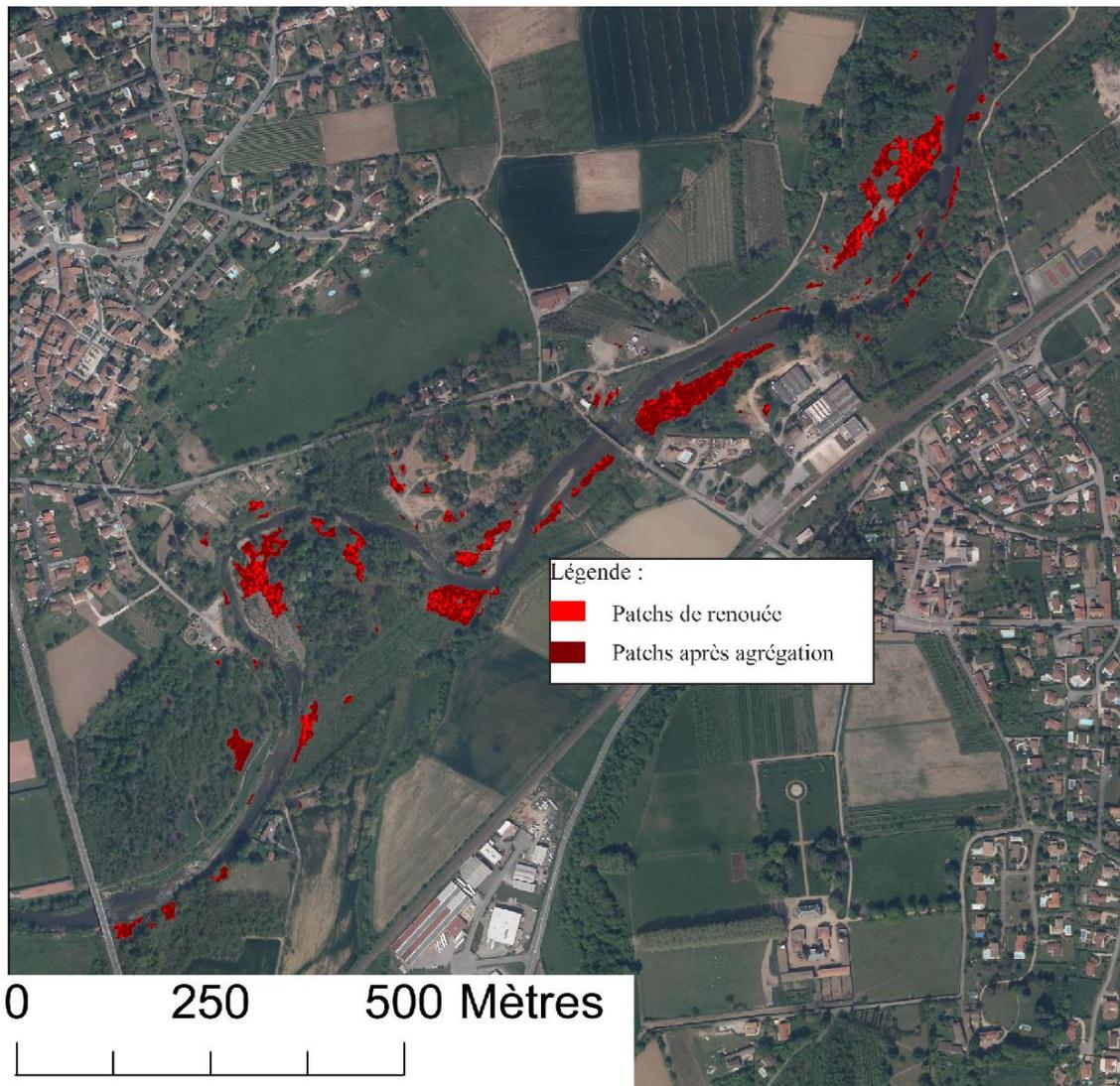


Figure 34 : Cartographie des taches de renouée détectées sur un tronçon test sur l'Azergues, affluent de la Saône (Rachex, 2015)

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

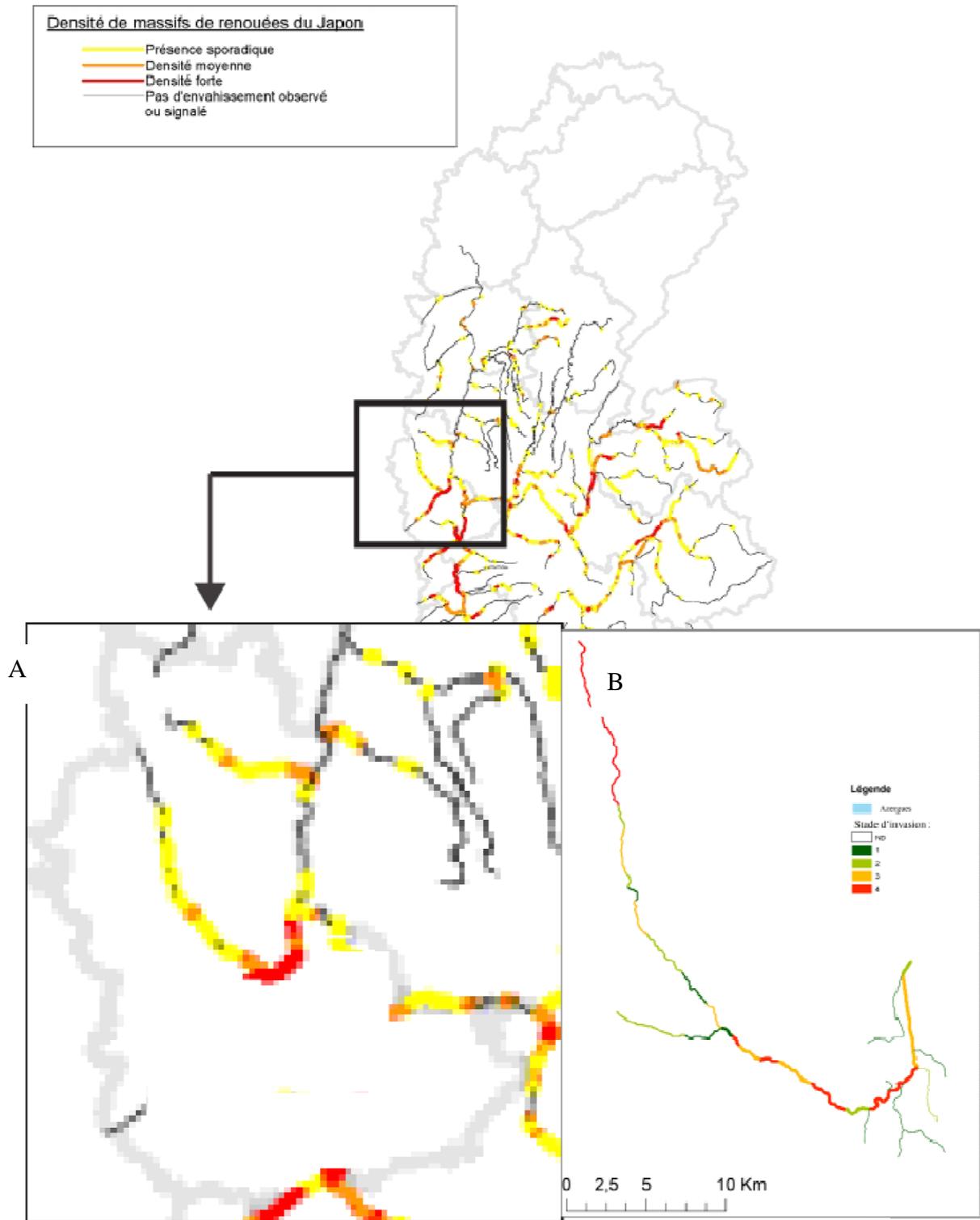


Figure 35 : Comparaison des stades invasifs sur l'Azergues par observation terrain (Fig. A ; Boyer, 2001) et la méthode de télédétection (Fig. B, Rachex, 2014).

9. Conclusion et perspectives générales

Les objectifs de ce projet sont 1) d'identifier des facteurs physiographiques et anthropiques pouvant expliquer la présence/absence de renouée, i.e. variables explicatives estimées à partir de bases de données SIG collectées auprès des gestionnaires et organismes publics, puis 2) de tester des modèles pour cartographier le degré d'invasibilité des bassins versants et cours d'eau par la renouée.

Ces modèles devront être validés sur d'autres territoires avant de fournir aux gestionnaires des outils d'aide pour caractériser le degré d'invasibilité de leur bassin versant par les renouées.

La spécificité de ce projet réside dans la mise en place d'une méthode d'analyse multi-échelles pour la recherche de variables explicatives de la présence/absence des renouées pour des cours d'eau présentant des états d'invasion contrastés : de la très large échelle des hydroécotones, à l'échelle des bassins versants (tailles de 50-600 km²), puis à l'échelle du tronçon de cours d'eau, pour descendre enfin à une échelle très locale grâce à des analyses en mésocosmes. Cette méthodologie ainsi développée pourrait aussi très bien s'appliquer pour d'autres plantes ou animaux (invasifs, comme non-invasifs) qui se développent le long des cours d'eau et pour lesquelles nous disposerions d'observations in situ.

Ces analyses multi-scalaires se sont révélées très complémentaires. Le projet a permis de proposer des variables explicatives qui semblent déterminantes pour le succès de la colonisation des cours d'eau par les renouées. Nous avons donc construit des modèles permettant de prédire, en fonction des paramètres physiographiques et anthropiques des cours d'eau, l'évolution de la présence des renouées à l'échelle de bassin et du tronçon de cours d'eau. Ces modèles ont permis de proposer une première caractérisation de la vulnérabilité de bassins ou de tronçons à l'invasion de la renouée. Ainsi, dans le cas d'une forte vulnérabilité prédite par les modèles, les gestionnaires pourront accroître leur surveillance et prévoir des dispositifs à mettre en place pour limiter très tôt la colonisation de leur territoire par la renouée.

Les analyses menées aux échelles des hydroécotones, des bassins et des tronçons permettent de dégager des variables explicatives communes significativement liées à l'absence/présence de renouées sur les différents cours d'eau du bassin Rhône Méditerranée et Corse.

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

A l'échelle des hydroécorégions (HER1 et HER2), la seule variable qui présente un lien avec la présence de renouées est la densité linéaire d'obstacle à l'écoulement (nombre d'ouvrages transversaux rapporté à la longueur du réseau hydrographique) : la densité de renouées à un niveau régional augmente avec la densité d'obstacle à l'écoulement sur le réseau hydrographique.

A l'échelle des sous bassins versant RMC (tailles de 50 à 600 km²) et selon la taille du bassin retenue, un total de 25 variables peuvent potentiellement expliquer la présence ou l'absence de renouées. Il est important de signaler à ce stade que toutes les variables représentant les mêmes caractéristiques (ex. la pression anthropique) présentent des tendances identiques, montrant alors une cohérence de notre analyse à l'échelle des bassins. D'autre part, les variables retenues présentent une même tendance avec la probabilité de présence/absence de renouée, quelle que soit la classe de taille de bassin étudiée (50-100 km²; 100-200 km², etc...). Un modèle de sous bassin final a alors été retenu en fonction de variables explicatives choisies selon des critères statistiques (variance expliquée, non redondance des variables), biologiques (pertinence biologique des variables retenues), et opérationnels (facilité et moindre coût pour mesurer les variables explicatives sur un bassin versant). Ce modèle prend en compte des variables climatiques, de pression anthropique, hydromorphologiques et de densité de ripisylve :

- « summer_acc » ou précipitations moyennes en été, issue du RHT et de la base SAFRAN;
- « Pforest » ou pourcentage de surface occupée par de la forêt dans une zone tampon autour des arcs ;
- « Partifi » ou pourcentage de surface artificialisée dans la zone tampon autour des arcs ; ces deux dernières variables sont estimées à l'aide de la BD TOPO, d'une zone tampon le long des arcs, dont la largeur est définie en fonction du rang de Strahler de l'arc (Sabastia, 2015) ;
- « txROE » ou densité linéaire d'obstacle à l'écoulement, issue de la base ROE ;
- « Puiss_spé » ou puissance spécifique en crue, variable issue de la base SYRAH et du RHT.

Toutes ces variables montrent une tendance positive avec la probabilité de présence de la renouée. Seule la variable Pforest montre une tendance négative, tendance confirmée par les observations de terrain (compétition interspécifique). Il est important de noter que ce modèle est beaucoup plus adapté aux échelles de bassin de 300-600 km² (en termes de précision et de faux positifs) qu'aux plus petites échelles (50-300 km²).

Deux étapes essentielles seront nécessaires avant que ces modèles ne soient utilisés comme outils d'aide à la décision par les gestionnaires : 1) les variables explicatives précédemment identifiées devront faire l'objet d'études complémentaires (ex. échantillonnages ciblés sur des sites avec seuils/obstacles...) afin de confirmer les liens mis en évidence dans cette analyse ; 2) une étape importante de validation de ces modèles dans d'autres contextes (climatique, géologique, anthropique...) en France ou à l'étranger permettra de tester leur robustesse.

A l'échelle des tronçons de cours d'eau, un modèle prenant en compte les variables explicatives et la covariance spatiale a été construit sur le bassin de la Saône puis validé à l'aide d'une analyse diachronique (données de 2001 et 2010-2015). Les variables explicatives caractérisant les facteurs climatiques (température en juillet et précipitations au printemps), les pressions anthropiques (artificialisation des berges et pourcentage d'artificialisation du tronçon) et la densité de la forêt alluviale ressortent clairement de l'analyse. Nous avons donc pu dresser une carte d'invasibilité à l'échelle du bassin de la Saône aval. Cette carte met en évidence une plus grande sensibilité 1) des secteurs de tête de sous-bassins versants, 2) des secteurs situés en aval des zones d'implantation de la renouée et 3) sur la partie aval de l'axe principal de la Saône. Sur la Saône amont, le modèle ne prédit pas d'implantation massive de renouée ; ce résultat semble en cohérence avec les observations de terrain de 2010-2015.

Le modèle ainsi développé sur la Saône devra être testé sur d'autres régions (France et étranger) afin de tester sa robustesse.

Ce modèle au tronçon a été appliqué au bassin RMC, mais n'a toutefois pas été validé par des observations diachroniques, limitant ainsi la pertinence des résultats obtenus. Des observations complémentaires sur des sous-bassins versants ciblés (eg. Ardèche, Drôme, Rhône aval...) ou l'utilisation de la télédétection pour cartographier les patches de renouées, à l'image de ce qui a été testé sur l'Azergues dans ce projet, permettraient de choisir le modèle le plus pertinent parmi les modèles présentés.

Aux trois échelles analysées, des résultats cohérents ont été obtenus. L'artificialisation des berges ou la présence de seuils et autres obstacles à l'écoulement sont liés à des activités anthropiques propices à l'introduction de propagules sexuées ou végétatives, mais elles représentent également des zones de dépôt favorables à la rétention et à l'installation des propagules dispersées par le cours d'eau. Il ressort également que le facteur climatique joue un rôle important en favorisant probablement la survie et donc l'installation des jeunes plantules

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

issues des propagules sexuées et végétatives. Enfin la densité de végétation rivulaire vient limiter le développement de la renouée sur les berges. Aucune variable caractérisant la lithologie ou la géologie n'est ressortie de ces analyses (bassin et tronçon sur la Saône). Les analyses en mésocosmes portant sur l'effet des sédiments sur la régénération des propagules montrent que, même si il existe une tendance à ce que certains sédiments de la Saône soient moins propices à l'installation des plantules issues d'akènes ou de fragments de rhizomes, il existe un sédiment issu de l'Azergues fortement envahie par les renouées, qui ne permet aucune régénération à partir des rhizomes et une très faible germination des akènes. Ni les caractéristiques granulométriques, ni le pH de ce sédiment ne permettent d'expliquer ce résultat. Des hypothèses peuvent être formulées comme la présence d'une forte résistance biotique interspécifique (allélopathie par exemple), une pollution locale ou une microflore du sol défavorable et des pistes de recherche peuvent être proposées.

Bibliographie

- Aguilera A.G. et al. 2010, Impacts of the invasive plant *Fallopia japonica* (Houtt.) on plant communities and ecosystem processes, *Biological Invasions* 12: 1243-1252
- Alpert P., Bone E. & Holzapfel C., 2000, Invasiveness, invasibility and the role of environmental stress in the spread of non-native plants, *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* 3: 52-66
- Barney J.N., 2006, North American history of two invasive plant species: phytogeographic distribution, dispersal vectors, and multiple introductions, *Biological Invasions* 8: 703-717
- Barney J.N. et al., 2006, The biology of Invasive Alien Plants in Canada. 5 *Polygonum cuspidatum* Sieb & Zucc [=Fallopia japonica (Houtt.) Ronse Decr.], *Canadian journal of plant science*. 86 (3). 887-905
- Bardon, C., Piola, F., Bellvert, F., El Zahar Haichar, F., Comte, G., Meiffren, G., Pommier, T., Puijalon, S., Tsafack, N., Poly, F. 2014. Evidence for biological denitrification inhibition (BDI) by plant secondary metabolites. *New Phytologist* 204: 620–630.
- Barral, V. 1994, *Biologie et biogéographie de Polygonum cuspidatum*. Mémoire de maîtrise, Grenoble, 26 p.
- Bímová K., Mandák B., Kašparová I., 2004, How does Reynoutria invasion fit the various theories of invasibility ?, *Journal of vegetation Science* 15: 495-504
- Bímová K., Mandák B., Pyšek P., 2003, Experimental study of vegetative regeneration in four invasive Reynoutria taxa (Polygonaceae), *Plant ecology*, 166. 1-11
- Boyer M., 2001, Cartographie de la renouée du Japon sur le réseau hydrographique du bassin Rhône Méditerranée, Tome 1 & 2 et annexes, Etude destinée à l'Agence de l'eau RMC
- Boyer M., 2005, Réflexions sur les stratégies de lutte contre l'invasion des cours d'eau par les renouées du Japon, Document de synthèse de la 5ème journée d'échanges techniques entre les gestionnaires d'espaces naturels de Rhône-Alpes « Stratégie d'intervention et moyen de lutte contre les espèces invasives de zones humides », CREN : 51-59
- Brekenfeld N., 2016, Facteurs d'invasibilité de la renouée sur le bassin RMC et modélisation de sa propagation, Rapport intermédiaire ZABR-AE, 77p.
- Brock J.H., Wade M., 1992, Regeneration of Japanese knotweed (*Fallopia japonica*) from rhizome and stems: observation from greenhouse trials, Paris, Association Nationale de Protection des Plantes, 85-94. Colloque international sur la biologie des mauvaises herbes à Dijon

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

- CPIE Val d'Authie, 2001, Etude bibliographique sur la Renouée du Japon : Ecologie, biologie et modalités de gestion, 103 p.
- Da Lage A., Métaillé G., 2015, Dictionnaire de biogéographie végétale : nouvelle édition encyclopédique et critique, Paris, CNRS Editions, 962 p.
- Dassonville N. et al., 2008, Impact of alien invasive plants on soil nutrients are correlated with initial site conditions in NW, Europe: *Oecologia*, v. 157, p. 131-140
- Davis M.A., Grime J.P., Thompson K., 2000, Fluctuating resources in plant communities: a general theory of invasibility, *Journal of Ecology* 88: 528-534
- Fan P, Hostettmann K, Lou H. 2010. Allelochemicals of the invasive neophyte *Polygonum cuspidatum* Sieb. & Zucc. (Polygonaceae). *Chemoecology* 20: 223–227.
- Fropier C, Marchand J, Martin B, 2014. Cartographie automatique de la renouée asiatique (*Fallopia* sp.) par imagerie à très haute résolution sur le bassin versant de la Saône, 82 p, Projet Tuteuré Master Cogeval'eau Université Lyon2.
- Fuch C., 1957, Sur le développement des structures de l'appareil souterrain du *Polygonum cuspidatum* Sieb & Zucc., *Bulletin de la Société Botanique de France*, 104 (3-4), 141-147.
- Gerber E. et al., 2008, Exotic invasive knotweed (*Fallopia* spp.) negatively affect native plant and invertebrate assemblages in European riparian, *Biological Conservation* 141: 646-654
- Hoef, J.M.V., Peterson, E. & Theobald, Spatial statistical models that use flow and stream distance. *Environ Ecol Stat* (2006) 13: 449. doi:10.1007/s10651-006-0022-8
- Jones, D., Pike, S., Thomas, M., Murphy, D., 2011. Object-based image analysis for detection of Japanese knotweed taxa (*Polygonaceae*) in Wales (UK). *Remote Sensing* 3, 319–342.
- Kappes H., Lay R., Topp W., 2007, Changes in different trophic levels of litter-dwelling macrofauna associated with giant knotweed invasion, *Ecosystems* 10: 734-744
- Larrère C, Larrère R., 2015, Penser et agir avec la nature, Paris, Ed. La découverte, 392 p.
- Le Guen et al., 2010, Les renouées asiatiques invasives en Côtes d'Armor. Synthèse bibliographique, expérimentations et orientations d'actions, AGROCAMPUS OUEST-INRA Rennes & Conseil Général des Côtes d'Armor Saint Briec, 62 p.
- Leopold L. B., Wolman M. G., 1957, Rivers channel patterns: braided, meandering and straight, Washington, Rap. Tech., US Geological Survey, US Government printing office, 49 p.
- Locandro R.R., 1973, Reproductive ecology of *Polygonum cuspidatum*, Thèse de doctorat, New Brunswick: Rutgers University
- Marouf A., Reynaud J., 2007, La botanique de A à Z – 1662 définitions, Paris, Ed Dunot, 352 p.

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

- Maskell L. et al., 2006, Interactions between non-native plant species and the floristic composition of common habitats, *Journal of Ecology* (Oxford). Vol. 94 (6). : p. 1052-1060
- Maurel L. et al., 2010, Does the invasive species *Reynoutria japonica* have an impact on soil and flora in urban wastelands?, *Biological Invasions* 12: 1709-1719
- Murrell C, Gerber E, Krebs C, et al. 2011. Invasive knotweed affects native plants through allelopathy. *Am. J. Bot.* 98:38–43.
- Murray. H., Lucieer. A., Williams. R., 2010. Texture-based classification of sub-Antarctic vegetation communities on Heard Island. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 12, 138-149
- Pashley C., Bailey J.P., Ferris C., 2003. Further evidence of the role of *Dolgellau*. Wales. In the production and dispersal of Japanese Knotweeds s.l.. *Plants Invasions: Ecological Threats and Management Solutions*, Backhuys Publishers. Leiden, The Netherlands: p. 197-211
- Pella et al., 2012, Le réseau hydrographique théorique (RHT) français et ses attributs environnementaux, *Géomorphologie* 2012/3 n°3, Ed. Groupe français de géomorphologie 126 p.
- Peterson, E, Ver Hoef, J, Isaak, Dan J.; Falke, Jeffrey A.; Fortin, Marie-Josée; Jordan, Chris E.; McNyset, Kristina; Monestiez, Pascal; Ruesch, Aaron S.; Sengupta, Aritra; Som, Nicholas; Steel, E. Ashley; Theobald, David M.; Torgersen, Christian E.; and Wenger, Seth J., "Modelling Dendritic Ecological Networks in Space: An Integrated Network Perspective" (2013). Publications, Agencies and Staff of the U.S. Department of Commerce. Paper 504.
- Piola, F., Bellvert, F., Meiffren, G., Rouifed, S., Walker, V., Comte, G., Bertrand, C. 2013. Invasive *Fallopia x bohemica* interspecific hybrids display different patterns in secondary metabolites. *Ecoscience* 20(3): 230-239.
- Pyšek P, Prach K, 1993, Plant invasions and the role of riparian habitats—a comparison of 4 species alien to Central Europe. *J Biogeogr* 20: 413–420
- Rachex D., 2014, Caractérisation large échelle, automatisée, du stade invasif des renouées asiatiques (*Fallopia*.sp.) sur le bassin versant de l'Azergues, Rapport de stage de master 1 INS, Université Lyon2, 128 p.
- Ramade F., 1999, Dictionnaire de l'écologie, Paris, Albin Michel, 1399 p.
- Rouifed S., 2011, Bases scientifiques pour un contrôle des renouées asiatiques : performances du complexe hybride *Fallopia* en réponse aux contraintes environnementales, Thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon 1, 148p

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

- Rouifed, S., Puijalon, S., Viricel, M. R., Piola, F. 2011. Achene buoyancy and germinability of the terrestrial invasive *Fallopia x bohemica* in aquatic environment: a new vector of dispersion ? *Ecoscience* 18(1): 79-84.
- Sabastia M., 2015, Mise en évidence de filtres environnementaux participants à l'implantation et à la prolifération de la Renouée du Japon le long des berges des cours d'eau, Master INS, Université de Lyon, 148p.
- Schnitzler A., Muller S., 1998, Ecologie et biogéographie de plants hautement invasives en Europe : Les renouées géantes du Japon (*Fallopia japonica* et *F. sachalinensis*), *Revue d'écologie (Terre et Vie)* n°53 (1) : 3-38
- Shaw R., Gerber E., Grassman A., 2006, Manque de connaissances – quelles sont les informations manquantes ? Comment disperser l'information ? tiré de : Spiegelberger Th., Gerber E & Schaffiner U. (eds), 2006, Synthèse Cabi Bioscience pp. 18-19
- Sukopp H., Sukopp U., 1988, *Reynoutria japonica* Houtt. in Japan and in Europa, *Veroff. Geobot Inst. ETH.* 98: 354-372.
- Tsai F., Chou M-J., 2006, Texture augmented analysis of high resolution satellite imagery in detecting invasive plant species. *Journal of the Chinese institute of Engineers, Transactions of the Chinese institute of Engineers. Series A/Chung-kuokungCh'engHsugK'an* 29 (4), 581-592
- Tiébré M.S., Saad L. & Mahy G., 2008, Landscape dynamics and habitat selection by the alien invasive *Fallopia* (Plygonaceae) in Belgium, *Biodiversity and Conservation* n°17 (10): 2357-2370
- Wajnberg E., 2011, Introduction au modèle linéaire generalize, Cours université Sophia-Antipolis, 9 p.
- Wasson, J.G., Chandesris, A., Pella, H. and 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. Ministère de l'Écologie et du Développement durable, Cemagref BEA/LHQ. 190 p.
- Wasson J. G. et al., 2006, Appui scientifique à la mise en œuvre de la Directive Européenne Cadre sur l'Eau. Typologie des cours d'eau de France métropolitaine, rapport CEMAGREF, 62 p.

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Annexes

Annexe A : Synthèse des variables explicatives à l'échelle du bassin versant ; « B » pour variable « bassin » ; « A » pour variable « arc » ; « BB » pour variable « buffer bassin » et enfin « BA » pour les variables « buffer arc » ; « QL » pour variable qualitative ordinale et « QT » pour variable quantitative.

Variables	Type	Description
TJAN_MOY_1	B-QT	Température moyenne en janvier pour le bassin
TJUIL_MO_1	B-QT	Température moyenne en juillet pour le bassin
ALTITUDE_1	B-QT	Altitude moyenne de bassin
STRAHLER	A-QL	Ordre de Strahler de l'arc
SURF_BV_1	B-QT	Cumul des superficies des bassins versants unitaires amont ou Surface de bassin
PENTE_1	B-QT	Pente moyenne pondérée
MINQMX_1_sp	B-QT	Débit moyen mensuel minimum spécifique
MODULE1_sp	B-QT	Débit moyen mensuel spécifique
N28_bis_1	B-QL	Artificialisation des berges de l'arc (Boyer) ; moyenne pondérée par la longueur des arcs
N25_bis_1	B-QL	Erosion des berges (Boyer)
N29_bis_1	B-QL	Largeur de la ripisylve (Boyer)
N24_bis_1	B-QL	Dynamique du cours d'eau (Boyer)
N30_bis_1	B-QL	Continuité de la ripisylve (Boyer)
N26_bis_1	B-QL	Tracé en plan du lit mineur (Boyer)
N27_bis_1	B-QL	Lit rectifié ou recalibré (Boyer)
ROE_1	B-QT	Nombre d'obstacles à l'écoulement par arc, moyenne pondérée pour le bassin
ROE_autr_1	B-QT	Nombre d'obstacles à l'écoulement autres qu'un barrage, une digue ou un enrochement, moyenne pondérée pour le bassin
ROE_enro_1	B-QT	Nombre d'enrochement par arc, moyenne pondérée pour le bassin
ROE_digu_1	B-QT	Nombre de digues par arc, moyenne pondérée pour le bassin
ROE_barr_1	B-QT	Nombre de barrages par arc, moyenne pondérée pour le bassin
tx_ROE	B-QT	Taux d'obstacles à l'écoulement par arc, moyenne pondérée pour le bassin
P_agrico_1	BB-QT	% de zone agricole, dans le buffer, moyenne pondérée pour le bassin
P_humide_1	BB-QT	% de zone humides, dans le buffer, moyenne pondérée pour le bassin
P_ouvert_1	BB-QT	% d'espaces ouverts, dans le buffer, moyenne pondérée pour le bassin
P_surf_eau	BB-QT	% de surface en eau, dans le buffer, moyenne pondérée pour le bassin
P_artifi_1	BB-QT	% de surface artificialisées, dans le buffer, moyenne pondérée pour le bassin
P_forets_1	BB-QT	% de forêts et milieux semi-naturels par arc, dans le buffer, moyenne pondérée pour le bassin
AREA	BB-QT	Surface de la zone buffer dans le bassin
long_arc	B-QT	Longueur de drainage dans le bassin
Sum_POPU_1	BB-QT	Population des communes touchant les arcs pour le bassin
P_veg_ri_1	BB-QT	% de végétation dans le buffer ripisylve, moyenne pondérée pour le bassin
pression_a	B-QT	Pression anthropique
Qspe_crue	B-QT	Débit spécifique en crue (arc aval)
puiss_spé	B-QT	Puissance spécifique (arc aval)
Etateco_bassin	B-QL	Etat écologique des masses d'eau
Etatchim_bassin	B-QL	Etat chimique des masses d'eau

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

P_SEDIM	BB-QT	% de roches sédimentaires, dans le buffer (moyenne de bassin)	
P_VOLCA	BB-QT	% de roches volcaniques, dans le buffer (moyenne de bassin)	
P_METHA	BB-QT	% de roches métamorphiques, dans le buffer (moyenne de bassin)	
Nb_station_length	B-QT	Nombre de stations d'épuration /unité de longueur sur le BV	
q01_rht	B-QT	Débit spécifique dépassé 1% du temps	
q02_rht	B-QT	Débit spécifique dépassé 2% du temps	
q05_rht	B-QT	Débit spécifique dépassé 5% du temps	
q10_rht	B-QT	Débit spécifique dépassé 10% du temps	
q20_rht	B-QT	Débit spécifique dépassé 20% du temps	
q30_rht	B-QT	Débit spécifique dépassé 30% du temps	
q40_rht	B-QT	Débit spécifique dépassé 40% du temps	
q50_rht	B-QT	Débit spécifique dépassé 50% du temps	
q60_rht	B-QT	Débit spécifique dépassé 60% du temps	
q70_rht	B-QT	Débit spécifique dépassé 70% du temps	
q80_rht	B-QT	Débit spécifique dépassé 80% du temps	
q90_rht	B-QT	Débit spécifique dépassé 90% du temps	
q95_rht	B-QT	Débit spécifique dépassé 95% du temps	
q98_rht	B-QT	Débit spécifique dépassé 98% du temps	
q99_rht	B-QT	Débit spécifique dépassé 99% du temps	
qmna5_rht	B-QT	Débit mensuel minimal annuel de période de retour 5 ans	
qixa_10	B-QT	Débit de point de crue décennal	
dec_acc	B-QT	Précipitation en décembre	Précipitations en hiver
janv_acc	B-QT	Précipitation en janvier	
fev_acc	B-QT	Précipitation en février	Précipitations au printemps
mars_acc	B-QT	Précipitation en mars	
avril_acc	B-QT	Précipitation en avril	Précipitations en été
mai_acc	B-QT	Précipitation en mai	
juin_acc	B-QT	Précipitation en juin	Précipitation en automne
juil_acc	B-QT	Précipitation en juillet	
aout_acc	B-QT	Précipitation en aout	Précipitation en automne
sept_acc	B-QT	Précipitation en septembre	
oct_acc	B-QT	Précipitation en octobre	
nov_acc	B-QT	Précipitation en novembre	
Roches_meubles	B-QT	Roches meubles et peu consolidées, bassin	
calcaires craies	B-QT	calcaires massifs et craies, bassin	
marnes	B-QT	Marnes, bassin	
Roches hétérogènes	B-QT	Roches hétérogènes carbonatées, bassin	
Roches perméable	B-QT	Roches résistantes à faible charge ionique peu perméables, bassin	
Roches imperméables	B-QT	Roches résistantes à faible charge ionique imperméables, bassin	
surf_artifi	B-QT	% surface artificielle dans le bassin	
surf_agric	B-QT	% surface agricole dans le bassin	
surf_forest_natural	B-QT	% surfaces de forêt and semi-naturelle dans le bassin	
surf_ouvert	B-QT	%surfaces ouvertes dans le bassin	
surf_humid	B-QT	% zones humides et lacs dans le bassin	
Presence_Perc	B-QL	% de longueur de rivière où la renouée est présente dans le bassin	
Presence	B-QL	Présence ou absence de renouée dans le bassin	

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Annexe B : Variables explicatives utilisées pour l'analyse à l'échelle du tronçon (ou arc) ; « B » pour variable « bassin » ; « A » pour variable « arc » ; « BB » pour variable « buffer bassin » et enfin « BA » pour les variables « buffer arc », « QL » pour variable qualitative ordinale et « QT » pour variable quantitative.

Variables	Type de variable	Descriptif
TJUIL_MO	A-QT	Température moyennes en juillet (arc)
PENTE	A-QT	Pente moyenne de l'arc
MODULE	B-QT	Module ou débit moyen interannuel (arc, mais reflète l'hydrologie du bassin)
N28	A-QL	Artificialisation des berges du cours d'eau (arc)
N25	A-QL	Erosion des berges (arc)
N29	A-QL	Taille de la végétation rivulaire (arc)
P_humide	BA-QT	% zone humide dans le buffer (arc)
P_ouvert	BA-QT	% zone surface ouvertes dans le buffer (arc)
P_surf_eau	BA-QT	% zone surface en eau dans le buffer (arc)
P_artifi	BA-QT	% zone artificielles dans le buffer (arc)
P_forets	BA-QT	% Forêt dans le buffer (arc)
long_arc	A-QT	Longueur de l'arc
tx_ROE	A-QT	Densité linéaire d'obstacle sur l'arc (base ROE)
Sum_POPU	BA-QT	Taille de la population dans les communes qui touchent le buffer
Vege_buf	BA-QT	Quantité de végétation dans le buffer (arc)
Qspe_crue	B-QT	Débit spécifique en crue (bassin)
Etateco	A-QT	Etat écologique (arc)
P_Sedim	BA-QT	% roche sédimentaire dans la zone de buffer (arc)
Nb_station_leng	A-QT	Nombre de STEP / unité de longueur
Phi	A-QT	Granulométrie (arc, RHT)
Upnext_R	A-QL	Présence ou absence de renouée sur le tronçon directement au-dessus
Distance	A-QL	Distance où se trouve de la renouée en amont
Spring_acc	A-QT	Précipitations moyennes au printemps (somme de février, mars et avril)
Puiss Spé	B-QT	Puissance spécifique du cours d'eau