

2 Modélisation éco-hydrodynamique des habitats riverains

La disponibilité d'habitats pour les espèces de plantes riveraines dépend des caractéristiques climatiques et des propriétés pédologiques ainsi que des conditions hydro-morphologiques locales des cours d'eau. Un modèle écologique à large échelle a été associé à un modèle hydrodynamique à deux dimensions avec comme résultat escompté de prédire la présence d'habitats appropriés pour le tamarin d'Allemagne (*Myricaria germanica*), une espèce typique des bancs de gravier riverains. Le présent chapitre inclut une description de la modélisation et son application pratique le long de la Moesa, dans le canton des Grisons.

Erik van Rooijen, Davide Vanzo, David Vetsch, Annunziato Siviglia et Sabine Fink

2.1 Modélisation des habitats dans les milieux fluviaux

Les milieux fluviaux regroupent une multitude de topographies différentes, qui abritent divers habitats pour des espèces terrestres, aquatiques et amphibiens. Un habitat est le résultat de facteurs physiques et biotiques spécifiques et constitue un emplacement approprié qui favorise l'implantation, la survie et la reproduction d'une espèce (fig. 7).

L'identification et la quantification des habitats sont primordiales pour la gestion des milieux fluviaux. La quantité et la variété des habitats sont liées à la biodiversité et à la résilience écologique d'un environnement donné (voir le chap. 5 ; Rachely *et al.* 2023). L'analyse des habitats ouvre des possibilités pratiques pour les gestionnaires de cours d'eau, par exemple pour évaluer, sur des plantes ou des animaux cibles, les conséquences des changements des conditions environnementales comme le régime hydrologique (p. ex. les crues naturelles) ou les variables climatiques (p. ex. l'augmentation des

Figure 7

Le milieu fluvial hautement dynamique le long de la Moesa à proximité de Cabbio (GR) abrite des individus adultes du tamarin d'Allemagne (*Myricaria germanica*) (a) dans des zones partiellement humides (plante à fleurs au premier plan), qui survivent également au cours des périodes sèches. Les plants adultes survivent sur des bancs de gravier (b) et les jeunes individus s'implantent dans des sols humides et sableux (c).



températures). À titre d'exemples de résultats que peuvent donner des analyses des habitats des cours d'eau, on citera notamment l'identification et la quantification de zones appropriées pour l'implantation de graines ou pour le frai de poissons. De tels résultats fournissent un soutien quantitatif à la prise de décision en matière de gestion des cours d'eau, notamment pour sélectionner les meilleurs emplacements pour la conservation des espèces, où l'on pourra semer artificiellement des graines d'espèces de plantes menacées, ou pour concevoir des solutions pour relâcher plus efficacement les poissons d'élevage.

Les modèles environnementaux (voir le chap. 1 ; Fink et Scheidegger 2023) sont des représentations informatives et simplifiées de composants du monde réel. Ils permettent de mieux comprendre les éléments fondamentaux de processus complexes et peuvent être appliqués à différentes échelles spatiales, du niveau local au niveau global. Les modèles d'habitats ont été appliqués dans de nombreux contextes, par exemple pour évaluer la répartition des espèces de papillons (Maggini 2011) et la vulnérabilité des espèces d'oiseaux (Maggini *et al.* 2014) en Suisse. Dans le contexte fluvial, les modèles sont souvent utilisés pour quantifier les habitats de poissons (p. ex. MesoHABSIM ; Parasiewicz 2011), mais aussi la succession végétale dans les milieux fluviaux (CASiMiR vegetation ; Ecohydraulic Engineering GmbH 2019).

Le présent chapitre propose une modélisation de l'habitat du tamarin d'Allemagne (*Myricaria germanica*), une espèce d'arbrisseau sur liste rouge (fig. 7). Cette plante typique pionnière vit sur des bancs de gravier dans la zone fluviale dynamique et possède des exigences spécifiques en matière d'habitat en fonction des étapes de son cycle de vie. Le climat, la géologie, la topographie et l'hydraulique sont autant d'aspects importants pour les arbrisseaux adultes. Par exemple, il est nécessaire que les sédiments se renouvellent fréquemment afin que d'autres espèces pionnières telles que le saule (*Salix* spp.) ne viennent pas leur faire concurrence. Les adultes fleurissent après deux ans pour autant que la température à la fin du printemps et en été soit suffisamment élevée. Des épisodes de crue isolés peuvent emporter ou enterrer de jeunes spécimens. C'est pourquoi les conditions environnementales doivent être favorables sur plusieurs années pour que les plantes puissent entièrement s'implanter.

Les graines du tamarin d'Allemagne prennent de 24 à 48 heures pour germer sur un sol sablonneux mouillé, soit dans des zones qui ont été inondées récemment. Il existe deux exigences pour qu'un habitat soit favorable à l'implantation de jeunes plants : (i) la présence de plantes adultes durant la période de dispersion des graines (de mai à septembre) afin de garantir la production des graines et (ii) une fréquence élevée d'inondations dans les zones environnantes qui soutiennent la germination des graines.

2.2 Mise en relation des modèles écologiques et hydrodynamiques

Nous avons associé deux modèles afin de prédire quels habitats sont appropriés pour des espèces riveraines dans la zone fluviale dynamique : (i) un modèle écologique statistique de la répartition du tamarin d'Allemagne et

Encadré 4 : Modèles hydrodynamiques

Les modèles hydrodynamiques résolvent un ensemble d'équations décrivant la dynamique des fluides afin de simuler l'écoulement dans les cours d'eau. De plus, les modèles hydromorphodynamiques permettent de simuler l'érosion et le dépôt de sédiments le long des cours d'eau. Ces simulations fournissent comme résultats une répartition spatiale de la profondeur de l'écoulement et de sa vitesse et, dans le cas des modèles hydromorphodynamiques, du niveau du lit. Les modèles hydrodynamiques nécessitent un ensemble de données d'entrée. Dans la présente étude, nous avons utilisé un modèle numérique de terrain (MNT), une série de données hydrologiques (soit des valeurs de débit) ainsi qu'une estimation de la rugosité du lit du cours d'eau. Pour les simulations morphodynamiques, des données détaillées sur les caractéristiques des sédiments sont nécessaires. En Suisse, des données de mesure des débits sont disponibles pour de nombreux sites, tandis que le reste des données d'entrée doivent souvent être récoltées de façon *ad hoc* pour chaque site étudié. Pour réaliser les simulations hydrodynamiques de la présente étude, nous avons utilisé BASEMENT (Vanzo *et al.* 2021), un logiciel gratuit qui permet de simuler plusieurs processus fluviaux.

(ii) un modèle hydrodynamique déterministe à deux dimensions pour simuler les conditions locales d'écoulement (voir l'encadré 4). Le modèle écologique prédit l'habitat du tamarin d'Allemagne sur la base d'indicateurs à large échelle (c.-à-d. régionaux) climatiques, géologiques et topographiques (voir chap. 1 ; Fink et Scheidegger 2023). Le résultat principal consiste en une carte spatialement explicite qui indique la probabilité que l'espèce cible puisse s'établir et rester dans différentes zones. Pour augmenter l'exactitude de la prédiction des habitats pour le tamarin d'Allemagne, qui dépend largement des conditions hydrodynamiques locales, à l'échelle locale (tronçon de cours d'eau), le modèle écologique a été mis en relation avec un modèle hydrodynamique déterministe à deux dimensions (voir l'encadré 4). La figure 8 présente le flux de travail qui en résulte, avec les étapes principales et les variables d'entrée requises.

2.2.1 Modélisation écologique

Le modèle écologique statistique des habitats pour les plantes adultes a généré une matrice d'adéquation des habitats à large échelle sur la base des données prédictives climatiques, géologiques et topographiques. Cette matrice a permis d'identifier des zones potentiellement adéquates à une échelle matricielle de 1×1 km. Le modèle a utilisé un jeu de données à long terme couvrant toute la Suisse et a généré une carte d'adéquation des habitats à long terme qui prédit la présence du tamarin d'Allemagne (voir chap. 1 ; Fink et Scheidegger 2023).

2.2.2 Modélisation hydrodynamique

Nous avons constitué et calibré un modèle hydrodynamique bidimensionnel du site étudié (voir la section 2.3) en nous servant du logiciel gratuit BASEMENT (www.basement.ethz.ch ; Vanzo *et al.* 2021). En utilisant les résultats des simulations de BASEMENT, nous avons généré des cartes de fréquence des inondations. Nous avons ensuite estimé quelles zones sont susceptibles d'être concernées par l'érosion ou le dépôt de sédiments dans différentes conditions d'écoulement. L'encadré 4 renseigne plus en détail sur la modélisation hydrodynamique.

2.2.3 Mise en relation des modèles

Nous avons associé les modèles écologiques et hydrodynamiques pour réaliser une prédiction à petite échelle des emplacements adéquats où les jeunes plants de tamarin

d'Allemagne peuvent s'implanter (étant donné que cette étape de leur cycle de vie est celle où ceux-ci sont le plus vulnérables, et une implantation réussie garantit que les plantes se maintiendront au niveau local). Pour prédire la dispersion des graines et leur implantation, nous avons utilisé : (i) la matrice pour les habitats des individus adultes tirée du modèle écologique, (ii) les cartes d'inondation et (iii) les cartes d'érosion et de sédimentation du modèle hydrodynamique (fig. 8). En multipliant les probabilités pour ces trois cartes à une petite échelle spatiale (grille raster 1×1 m avec des tuiles de la grande matrice ; voir la fig. 8 pour les détails), nous avons généré des cartes de probabilité qui indiquaient les emplacements où le tamarin d'Allemagne est susceptible de s'installer sous forme de jeunes plants.

2.3 Étude de cas : la Moesa

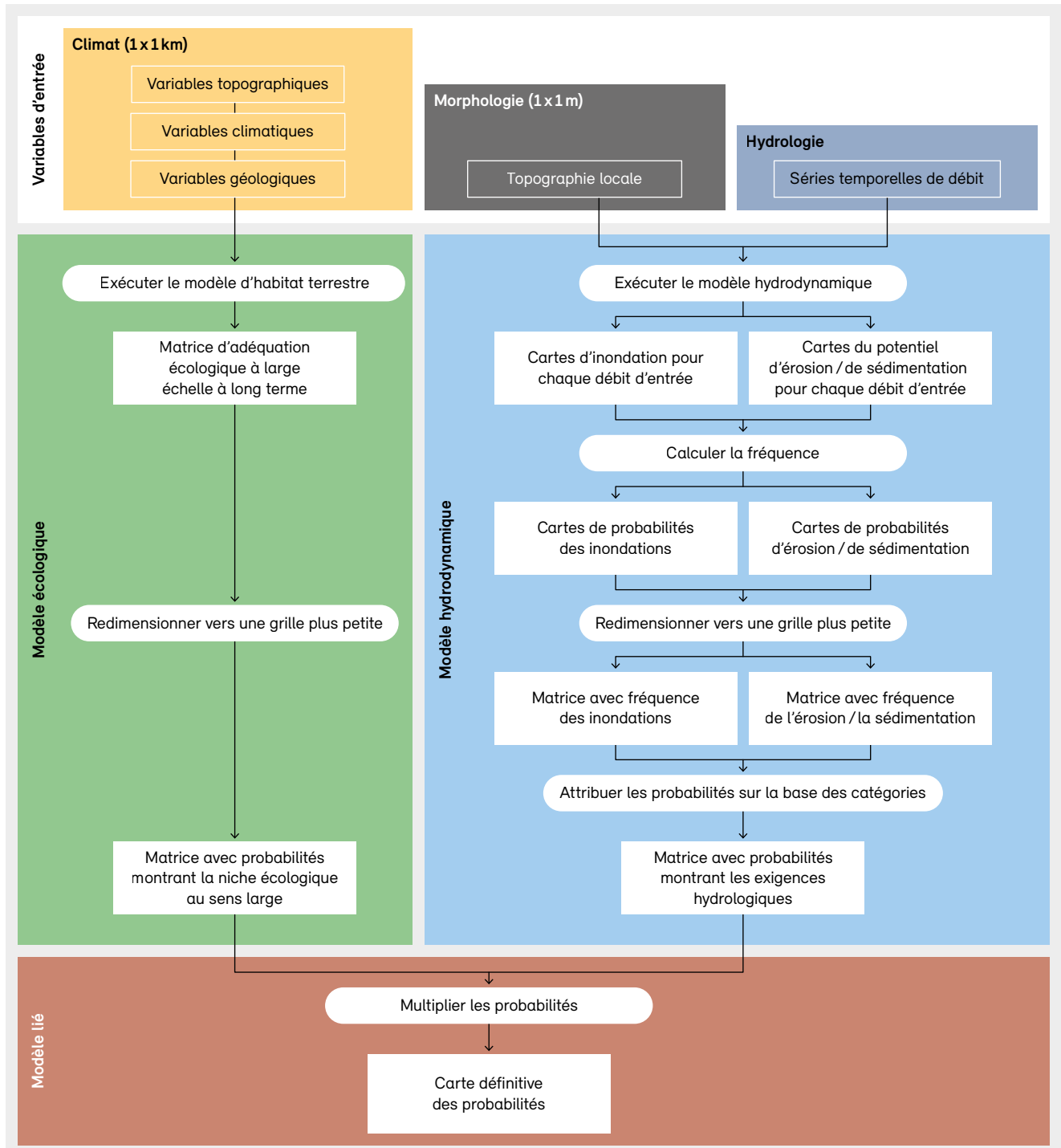
2.3.1 Description du site et récolte de données

Nous avons testé le modèle lié sur une petite zone alluviale de la Moesa (GR, fig. 9). Le tronçon de cours d'eau est situé à proximité du village de Cabbio, dans une zone où le cours d'eau n'a jamais été canalisé, mais où il est confiné par des digues de protection contre les crues. La zone alluviale mesure environ 800 m de long et la largeur totale équivaut à 100 à 200 m.

Nous avons effectué un suivi du site depuis le début du mois de mai jusqu'à fin septembre 2020. Au début de la période d'étude, peu de plants de tamarin d'Allemagne adultes étaient présents. Au cours de la période d'étude, deux crues, survenues le 7 juin et le 29 août respectivement, ont modifié la topographie du cours d'eau. Nous avons analysé le site avec un drone, puis numérisé la topographie en utilisant des techniques dites de *Structure-from-Motion* (SfM, structure acquise à partir d'un mouvement, Agisoft 2020). La topographie des zones submergées a été mesurée avec des appareils GPS portables. La présence du tamarin d'Allemagne a été enregistrée toutes les deux semaines, couvrant la phase reproductive de la plante à partir des premières fleurs jusqu'à la phase tardive de dispersion des graines. Les positions exactes des plants ont été mesurées avec des appareils GPS portables.

Figure 8

Flux de travail mettant en relation les modèles écologique et hydrodynamique. Les résultats des modèles écologique et hydrodynamique sont combinés pour obtenir une carte de probabilité qui prédit plus exactement les habitats des jeunes plants. Les grands blocs de différentes couleurs représentent les sous-sections de cette méthodologie. Les rectangles de petite taille représentent les jeux de données et les ovales, les actions.



Le modèle écologique était fondé sur des données géologiques et climatologiques pour la période de 1960 à 2016, la disponibilité des habitats étant modélisée sur la base de relevés des espèces du Centre national de données et d'informations sur la flore de Suisse Info Flora (Fink *et al.* 2017 ; voir également le chap. 1 ; Fink et Scheidegger 2023). Les données hydrologiques ont été obtenues auprès de l'office de la nature et de l'environnement du canton des Grisons.

2.3.2 Évaluation des résultats de la modélisation

Pour les individus adultes, le degré de détail du modèle écologique à large échelle pris isolément était insuffisant, car il n'indiquait pas pourquoi certains plants n'avaient pas survécu durant la période d'étude de 2020. La répartition des arbrisseaux sur le site suggère que les processus d'érosion jouent un rôle important pour déterminer la survie des plants adultes, mais ces facteurs n'ont pas été implémentés dans le modèle écologique. C'est pourquoi nous avons vérifié si les informations complémentaires issues du modèle hydrodynamique nous permettaient de prédire la survie du tamarin d'Allemagne.

Le modèle hydrodynamique s'est servi de données sur le débit datant de la période d'étude et d'informations à haute résolution sur la topographie du cours d'eau afin d'évaluer l'éventuelle érosion de graviers à une échelle spatiale restreinte. L'érosion continue de graviers début mai a entraîné une perte de plants adultes dans les zones pour lesquelles le modèle hydrodynamique avait en effet prédit qu'elles seraient sujettes à une érosion de graviers et à une sédimentation. Grâce à la mise en relation du modèle écologique et du modèle hydrodynamique, les changements d'habitats prédits ont correctement reflété l'évolution des individus adultes.

Le modèle lié a été utilisé principalement pour prédire les emplacements où il est possible pour les jeunes plants du tamarin d'Allemagne de s'implanter. Bien que le modèle écologique ait joué un rôle important pour prédire les habitats des individus adultes, ce sont les zones d'inondation, d'érosion et de sédimentation sur les périodes de deux semaines durant la phase de floraison qui ont été utilisées pour prédire où il est probable que la germination se produise. Les informations mises en lien entre les modèles écologique et hydrodynamique ont permis d'identifier des formes générales d'habitats

Figure 9

Image aérienne du site d'étude le long de la Moesa à proximité de Cabbio (GR). La zone alluviale est confinée par deux remblayages latéraux. La flèche blanche représente la direction de l'écoulement (du nord au sud) et le rectangle blanc, la section du site correspondant aux résultats modélisés tels que présentés à la figure 10.

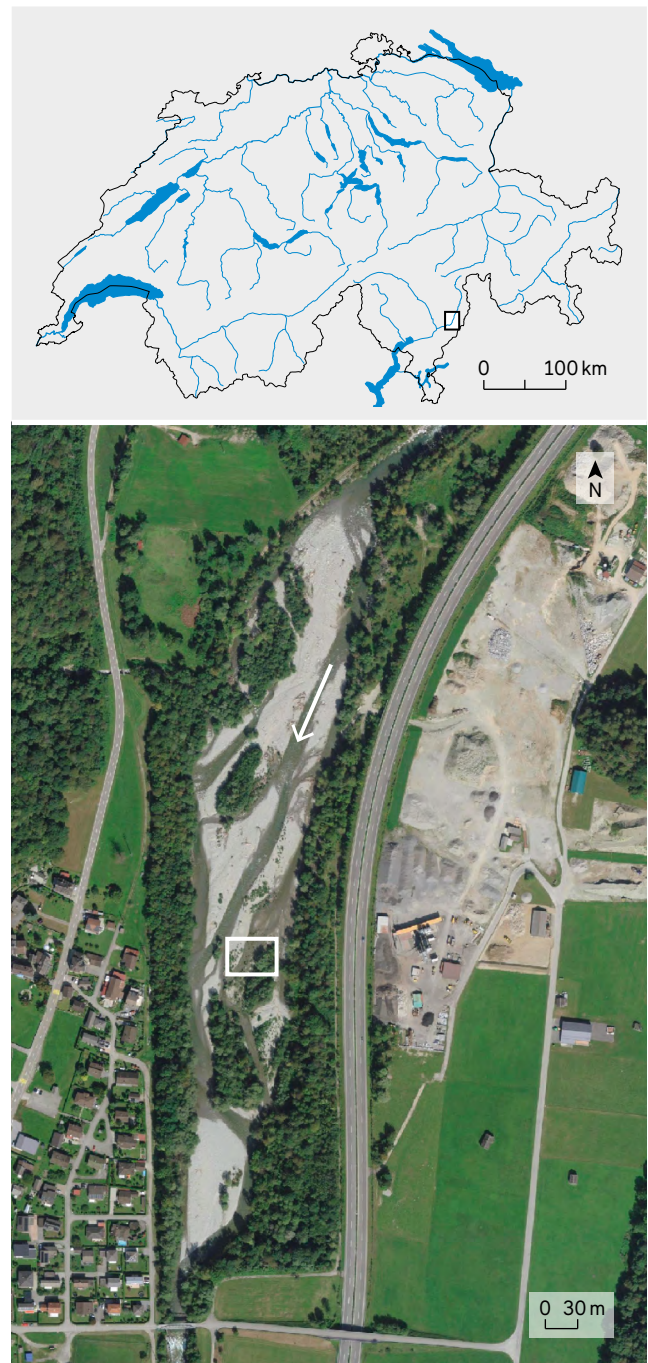


Photo : Swisstopo

adéquats pour les jeunes plants à une échelle spatiale restreinte, sachant qu'on a pu observer de jeunes individus implantés dans certaines régions prédites par le modèle lié (fig. 10).

2.3.3 Avantages du modèle lié

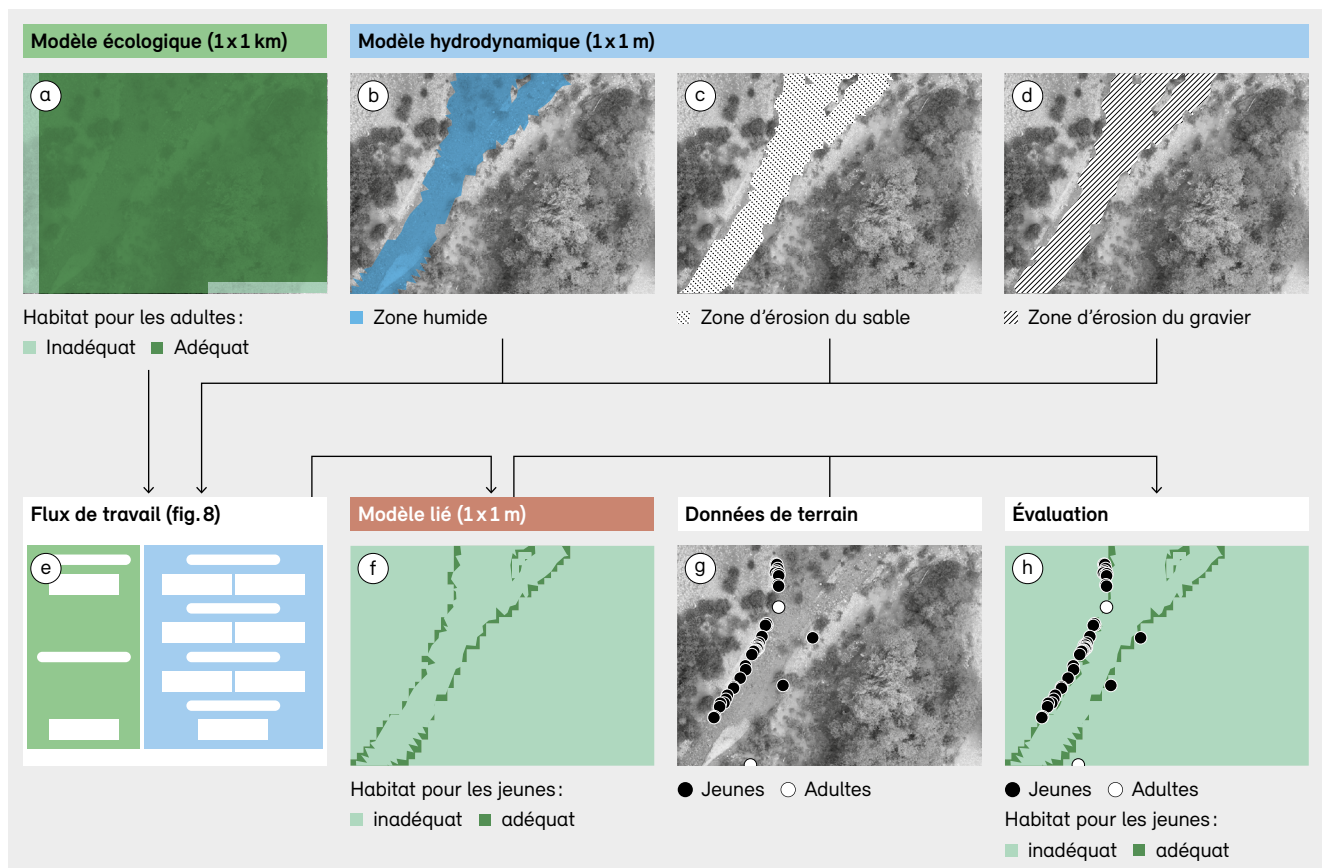
L'avantage principal du modèle lié est qu'il permet d'identifier des zones potentiellement adéquates pour la germination des graines à une petite échelle spatiale. De telles zones sont très importantes pour la recolonisation par le tamarin d'Allemagne et sa survie. L'exactitude plus élevée du modèle lié permet de prioriser les emplacements

le long de la zone alluviale pour la promotion des espèces locales ou pour des actions de gestion ciblée telles que l'élimination de plantes rivales (ou envahissantes).

L'utilisation d'outils compatibles avec un haut degré de détail (p. ex. des outils 2D de modélisation des cours d'eau) et la disponibilité croissante de jeux de données à haute résolution obtenus par détection à distance représentent une tendance en augmentation dans la pratique comme dans la recherche. Le modèle lié proposé correspond à cette tendance, car il exploite les avantages en combinant des outils de modélisation avec différentes échelles spatiales et temporelles.

Figure 10

Évaluation du modèle lié avec des données collectées sur le terrain concernant des individus adultes du tamarin d'Allemagne et des jeunes plants dans un tronçon de la zone alluviale située à proximité de Cabblo, aux Grisons (image aérienne de l'hiver 2020). Les jeunes plants étaient présents dans les zones identifiées comme adéquates par le modèle écologique (zone vert foncé sur l'image a), à proximité des lignes d'inondation modélisées (zone bleue sur l'image b) et à l'extérieur des zones d'érosion et de sédimentation modélisées (image c : sable ; image d : gravier). En appliquant le flux de travail mettant en relation les deux modèles (e), la matrice de probabilité combinée (f) cible les emplacements adéquats pour l'implantation de jeunes plants (zones vert foncé sur les images f et h) et concorde avec les données de terrain (g), comme le montre l'évaluation (h).



2.3.4 Limites du modèle lié

Bien que le modèle lié soit utile pour identifier des habitats d'individus adultes et de jeunes plants pour les espèces cibles, il est plus complexe du point de vue de la modélisation. Cela s'explique par la différence en matière d'échelle spatiale (grande pour le modèle écologique et petite pour le modèle hydrodynamique) et donc par le besoin de réajustement (redimensionnement, voir fig. 8). Par ailleurs, le modèle lié ne tient pas compte de tous les processus environnementaux auxquels les espèces sont exposées. Le modèle peut être affiné plus avant : il pourrait par exemple prendre en compte les interactions entre la dynamique sédimentaire et les plants (p. ex. Caponi et Siviglia 2018). En outre, le flux de travail proposé (fig. 8) nécessite l'utilisation d'une série d'outils (p. ex. BASEMENT) et certaines connaissances de programmation pour traiter les données (p. ex. dans R ou dans Python) étant donné que les données ne sont pas traitées dans un outil unique. Toutefois, le flux de travail peut être entièrement reproduit à l'aide de logiciels gratuits.

2.3.5 Possibilités d'extension à d'autres études de cas et à d'autres espèces

Le modèle lié peut être adapté à d'autres sites fluviaux et à d'autres espèces. Il faut souligner qu'il n'existe aucune limite concernant le type ou la taille des tronçons de cours d'eau du moment que l'approche de modélisation 2D est valable. L'utilisation de BASEMENT permet de reproduire tous les types de conditions d'écoulement (c.-à-d. à la fois sous-critiques et supercritiques), ce qui ouvre la voie à l'étude à la fois des tronçons de plaine et des tronçons alpins.

Les deux modèles, écologique et hydrodynamique, sont indispensables pour utiliser le modèle lié sur d'autres sites fluviaux. Le modèle écologique est appliqué à l'échelle nationale et les informations disponibles pour le tamarin d'Allemagne peuvent être reprises pour d'autres sites en Suisse (Fink *et al.* 2017). La charge de travail nécessaire pour le modèle hydrodynamique dépend de la disponibilité d'un modèle numérique de terrain (MNT) de haute qualité. Le générer à partir de zéro peut nécessiter un temps conséquent. Considérant cette charge de travail, nous recommandons d'employer cette approche dans des tronçons spécifiques d'intérêt (de l'ordre de quelques kilomètres), mais pas à l'échelle nationale.

Étant donné que le tamarin d'Allemagne est une espèce indicatrice de la végétation pionnière dans les zones de zones alluviales (Delarze et Gonseth 2015), le résultat présenté ici peut également être employé pour déduire des habitats pour les espèces dont les niches sont similaires (p. ex. le saule *Salix daphnoides*) ou des espèces non végétales présentes dans le même habitat (p. ex. le papillon de nuit *Istrianis myricariella*). La méthodologie pourrait également être adaptée pour modéliser d'autres types d'espèces mobiles telles que les poissons, des araignées ou des coléoptères riverains (encadré 5, voir également le chap. 3 ; Kowarik et Robinson 2023). Dans ce dernier cas, le modèle écologique devrait être adapté pour refléter les espèces cibles et le modèle hydrodynamique devrait quantifier les paramètres hydrauliques importants pour ces espèces.

2.4 Utilisation en pratique

Le modèle lié est un outil pratique pour évaluer le potentiel de conservation des espèces cibles au niveau local via une régénération naturelle et une croissance locale. Espèce figurant sur la liste rouge, le tamarin d'Allemagne a tendance à être battu par la concurrence que représentent les saules, qui croissent plus rapidement, ce qui crée un environnement trop ombragé pour cette espèce se développant plus lentement. Pour le tamarin d'Allemagne, la régénération le long des lignes d'inondation où la compétition est faible est primordiale ; elle aide l'espèce à survivre malgré la coprésence de néophytes tel l'arbre aux papillons (*Buddleja davidii*), une plante envahissante (Mörz 2017). La carte de probabilité des habitats de jeunes plants facilite la recherche concernant le potentiel de régénération sur des sites concernés par l'énergie hydroélectrique. De plus, elle peut être utilisée pour valider les revitalisations réussies par l'intermédiaire d'une comparaison du potentiel d'habitat prédit des zones renaturées avec des observations des jeunes plants s'étant effectivement établis.

Dans le contexte des changements climatiques, il faut s'attendre à une augmentation de la fréquence des crues, qui devraient également se produire à d'autres périodes que celles que nous connaissons. Il est essentiel pour les

gestionnaires de cours d'eau de disposer de prédictions d'un plus grand niveau d'exactitude et d'une meilleure compréhension des processus en jeu pour aborder l'évolution environnementale à venir. Le modèle lié permet de prédire de futures conditions d'habitat tout en prenant en considération les changements des températures, des précipitations et des débits, ce qui accroît la compréhension du destin d'une espèce spécifique dans notre monde changeant.

Encadré 5 : En pratique – perspective d'application pour la modélisation des habitats

Mauro Carolli, chercheur chez SINTEF (Norvège)

La modélisation des habitats peut considérablement aider les praticiens et les décideurs dans la gestion des systèmes fluviaux. Nous avons employé cette modélisation pour quantifier les flux environnementaux à l'aval des captages d'eau destinés aux activités humaines (p. ex. la production hydroélectrique). Les flux minimaux sont généralement définis uniquement sur la base des relations hydrologiques au sein du bassin versant, alors que la modélisation des habitats permet de prendre en compte des aspects écologiques également. En 2015, les directives européennes suggéraient d'implémenter des méthodes de modélisation des habitats pour définir des flux écologiques pour la directive cadre sur l'eau.

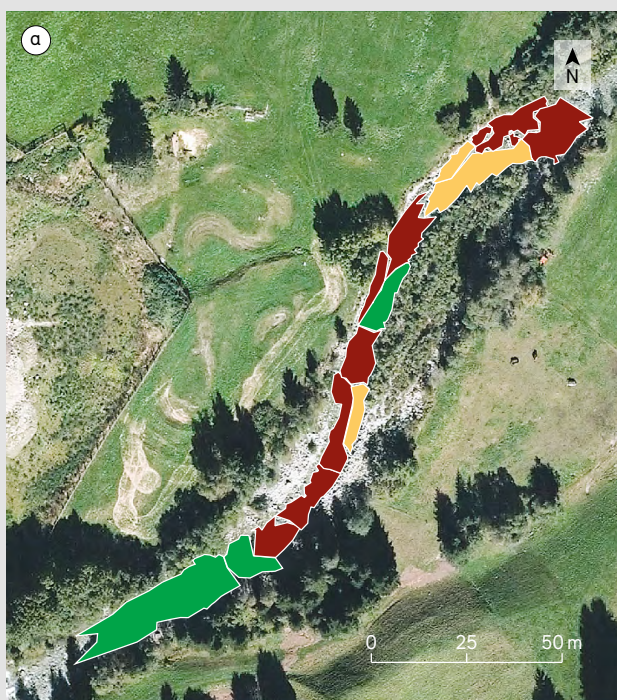
Dans le cadre d'études pilotes dans les Alpes italiennes, nous avons employé la méthode MesoHABSIM (Parasiewicz 2011) pour définir des flux environnementaux à partir d'une perspective plus écologique qu'à l'habitude, en accord avec les directives européennes. Nous avons cartographié l'habitat pour différents débits afin de construire une courbe habitat-débit et d'évaluer la qualité de l'habitat pour les deux espèces locales principales, à savoir la truite atlantique (*Salmo trutta*, fig. 11) et la truite marbrée (*Salmo trutta marmoratus*). Nous avons simulé différentes quantités de prélèvements d'eau pour des activités humaines et avons transformé les séries de données de débit d'eau en des séries d'habitats, que nous avons ensuite utilisées pour identifier les seuils d'écoulement écologique en dessous desquels

la qualité des habitats décroît rapidement. La qualité de l'habitat est évaluée sur le terrain à l'échelle du tronçon (10 à 1000 m), mais la modélisation hydrodynamique peut aider à élargir les évaluations des habitats à une échelle spatiale plus grande si pertinent (sous-bassin versant voire bassin versant). Il est également possible de calculer la transformation des séries de données de débit d'eau en des séries d'habitats à différentes échelles de temps, selon la résolution des données d'entrée. Cette approche nous aide à évaluer les effets écologiques des phénomènes qui pourraient affecter la communauté du cours d'eau, à des fréquences variant de plusieurs fois par jour (p. ex. éclusées) à des intervalles hebdomadaires ou mensuels (p. ex. sécheresses extrêmes).

Le concept de modélisation des habitats établit un lien direct entre l'hydrologie, la gestion des eaux et les communautés biotiques fluviales. En outre, il est possible d'élargir ce concept afin de quantifier d'autres services écosystémiques lorsqu'on peut établir une relation entre le débit (ou d'autres variables hydrauliques) et l'utilisation de l'eau. À titre d'exemple, on pourra citer la quantification de l'adéquation du cours d'eau pour la navigation de plaisance (rafting, kayak) à l'aval d'usines hydroélectriques dans différentes conditions d'écoulement. De manière générale, le concept de modélisation des habitats constitue un outil précieux pour la gestion des cours d'eau et renferme un potentiel énorme pour analyser d'éventuelles opportunités et synergies entre les différentes utilisations du cours d'eau et des communautés biotiques.

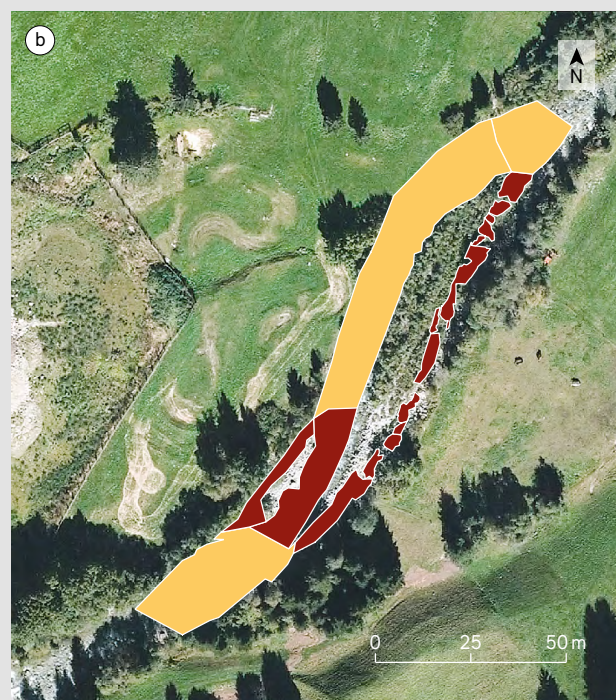
Figure 11

Adéquation des habitats pour les truites atlantiques (*Salmo trutta*) adultes à des débits (Q) de (a) $1,15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ et (b) $3,95 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.
Ruisseau Vermigliana, Vermiglio (Italie).



Truite atlantique adulte, $Q = 1,15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$

■ Optimal ■ Adéquat ■ Inadéquat



Truite atlantique adulte, $Q = 3,95 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$

■ Optimal ■ Adéquat ■ Inadéquat

Source : avec l'aimable autorisation de professeur G. Zolezzi (DICAM, Université de Trente, Italie)