



HAL
open science

Analyse critique et réflexion quant à l'application et l'adaptation des modèles du Riverscapes Consortium sur le territoire et le contexte français: l'exemple du bassin versant de la Drôme

Clément George

► To cite this version:

Clément George. Analyse critique et réflexion quant à l'application et l'adaptation des modèles du Riverscapes Consortium sur le territoire et le contexte français: l'exemple du bassin versant de la Drôme. Milieux et Changements globaux. 2024. dumas-04888116

HAL Id: dumas-04888116

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04888116v1>

Submitted on 15 Jan 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Master Sciences de l'Eau

Domaine : STS -SHS

Master 1 – 2023/2024

Rapport de stage Master 1

Analyse critique et réflexion quant à l'application et l'adaptation des modèles du Riverscapes Consortium sur le territoire et le contexte français : l'exemple du bassin versant de la Drôme

Par Clément GEORGE

Organisme d'accueil : Utah State University / Riverscapes Consortium

Soutenance le 4 Septembre 2024



Tuteur professionnel : Joseph WHEATON, Ecogeomorphology and Topographic Analysis Laboratory, Utah State University

Tuteur universitaire : Hervé PIEGAY, Laboratoire Environnement, Ville, Société, Ecole Normale Supérieure de Lyon

Examineur : Oldrich NAVRATIL, Laboratoire Environnement, Ville, Société, Université Lumière Lyon 2

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier chaleureusement mon maître de stage, Joseph Wheaton, pour son soutien et ses conseils. Il a tout fait pour me soutenir dans mon travail. Merci aussi de m'avoir fait découvrir le grand air américain et m'avoir fait décoller de mon ordinateur.

Merci également à Hervé Piégay, mon tuteur universitaire, pour ses conseils concernant la rédaction du présent document et sa réactivité.

Un merci aussi à Jordan Gilbert, qui a toujours été là au quotidien pour me sortir de mes impasses.

Un merci également à toute l'équipe du laboratoire EVS de l'ENS Lyon, qui a su m'accueillir pendant ma courte période chez eux.

Un grand merci à l'équipe pédagogique du Master Sciences de l'Eau, sans qui je n'aurais jamais pu profiter de cette expérience. Et bien entendu, merci à la promotion de M1 2023-2024.

Et puis bien sûr, comment ne pas remercier mes parents et mes amis, qui bien qu'ils aient été loin de moi pendant toute cette période, sont souvent parvenus à me le faire oublier.

Sommaire

1. Introduction.....	4
1.1 Etat d'altération des hydrosystèmes, de la nécessité d'actions	4
1.2 Quelles sont les réponses apportées à ces altérations ?.....	5
1.3 Qu'est-ce qu'un <i>Riverscape</i> , ou corridor fluvial	8
1.4 L'émergence et développement de la géomatique	9
1.5 Limites actuelles de la géomatique et du partage de données	13
1.6 Notions et concepts essentiels pour la suite du rapport.....	14
2. Objectifs et cadre du stage.....	17
2.1Présentation et contexte de l'étude	17
2.2 Fonctionnement général des outils du Riverscapes Consortium.....	18
2.3 Données utilisées aux Etats-Unis	21
2.4 Les modèles.....	26
3. Analyse critique et réflexion quant à l'application des outils du Riverscape Consortium sur le contexte français.....	34
3.1 Généralités.....	34
3.2 Outil par outil.....	35
3.3 Comparaison avec des modèles existants, différences architecturales et de construction.....	38
4. Etude de cas et application sur le bassin versant de la Drôme.....	39
4.1 Site et contexte	39
4.2 Constitution de la base de donnée utilisée.....	40
4.3 Protocole suivi pour adapter les modèles	47
4.4 Résultats	53
5. Limites, recommandations et discussions.....	54
5.1 Limites générales des modèles	54
5.2 Limites de l'adaptation des modèles au contexte français	56
5.3 Prospectives du projet	56
5.4 Réflexions quant à l'enrichissement des modèles (ROE, Carhab, Syrah-ce).....	58
5.5 Prospectives de recherche et recommandations.....	60
Conclusion	61
Bibliographie	63
Table des illustrations	69
Sommaire.....	70
Annexes	73

1. Introduction

1.1 Etat d'altération des hydrosystèmes, de la nécessité d'actions

Depuis au moins plusieurs millénaires, et plus particulièrement depuis la révolution industrielle, l'être humain n'a cessé de modifier son environnement à son avantage. En 2002, J. Crutzen propose la notion d'anthropocène, pour décrire la nouvelle période géologique dans laquelle nous vivons, et où l'Homme est devenu la principale force géophysique, modifiant fondamentalement les paysages et la surface terrestre (Crutzen 2002). L'Homme modifie en profondeur les processus et fonctionnements des écosystèmes, qui s'adaptent en réponse à ces nouvelles conditions (Piégay et al. 2020). Si les impacts des humains sur leur environnement ont été importants au moins depuis le Néolithique avec les grands défrichements pour l'agriculture et le pastoralisme, une accélération de la modification des conditions géophysiques par l'homme sur Terre a été observée depuis le 20^e siècle, mise en lumière par le concept de *Great Acceleration* des changements de paysage, développé par Steffen en 2007 (Piégay et al. 2020; Bravard et Petts 1996).

Les hydrosystèmes fluviaux (concept systémique interdisciplinaire incluant les chenaux des cours d'eau, leur lit mineur et majeur, les aquifères, les milieux aquatiques et riverains qu'ils contiennent) n'y font pas exception (Petts et Amoros 1996). Le bon fonctionnement des cours d'eau a été altéré depuis des millénaires, ces impacts revêtant diverses formes et opérant à de nombreuses échelles. Dès le néolithique par exemple, les grands défrichements ont considérablement augmenté la charge sédimentaire de nombreux cours d'eau, entraînant des changements géomorphologiques importants (Bravard et Petts 1996). Les perturbations actuelles des hydrosystèmes peuvent être directes, avec des aménagements ponctuels formant des obstacles à l'écoulement (barrages, seuils, etc.), ou linéaires, impactant notamment la connectivité latérale (endiguement, enrochement des berges, rectification du tracé en long, etc.) (Van Looy et al. 2014). La régulation des débits (diminution des crues, notamment des crues morphogènes essentielles à la bonne santé des hydrosystèmes) et la diversion des flux (pour la production hydroélectrique, l'irrigation, l'industrie, etc.) jouent également un rôle important dans l'altération du fonctionnement des corridors fluviaux, en impactant les flux sédimentaires, biologiques, physiques, etc. à l'œuvre au sein de ces systèmes complexes (Wheaton et al. 2019; Bravard et Petts 1996).

Ces impacts sont aussi souvent indirects. Le mode d'occupation du sol au sein du bassin versant peut avoir de lourds impacts sur le fonctionnement de l'hydrosystème, comme la suppression des ripisylves (Van Looy et al. 2014), l'urbanisation et l'étalement urbain (déconnectant complètement les cours d'eau de leur corridors, aggravant le ruissellement urbain et donc les crues, polluant les eaux de ruissellement,...), l'intensification de l'agriculture (pollution aux intrants, eutrophisation, endiguement,...),... (Wheaton et al. 2019; Bravard et Petts 1996). Plus globalement, les impacts anthropiques, et tout particulièrement les changements d'occupation du sol induits par l'action de l'Homme au sein des bassins versants, sont responsables de profonds changements dans la dynamique fluviale des cours d'eau (Bravard et Petts 1996). En effet, les cours d'eau évoluent constamment et changent de forme et de position à différentes échelles temporelles et spatiales, d'un jour à l'autre, d'un siècle à l'autre, et des petits cours d'eau de tête de bassin versant aux grandes rivières de plaine (Malavoi et Bravard 2011; Petts et Amoros 1996). Cette dynamique s'explique par un équilibre entre des variables de contrôle (la charge solide et liquide, elle-même sous l'influence d'autres variables de contrôle comme le climat, la géologie, l'occupation du sol, etc.) et des variables de réponse (la largeur, la sinuosité, le style fluvial, etc.) qui sont les moyens pour le cours d'eau de s'ajuster aux changements des variables de contrôle, notamment via des processus d'érosion-dépôt (Malavoi et Bravard 2011; Schumm 1977). En modifiant certaines variables de contrôle comme la végétation, par exemple, l'humain peut modifier la charge solide et liquide subies par les cours d'eau et donc engendrer des modifications dans leurs variables de réponse. Ces modifications entraînent des changements géomorphologiques, qui impactent à leur tour l'ensemble du système. En effet, la géomorphologie fluviale est à la base du fonctionnement biologique des hydrosystèmes, puisqu'elle permet, grâce aux différentes granulométries, profondeurs, vitesses de courant, formes de dépôts, bois mort, échanges hyporhéiques, connexions latérales et longitudinales,... la formation d'une grande diversité d'habitats à diverses échelles spatiotemporelles, et donc une grande diversité de communautés écologiques (Malavoi et Bravard 2011;

Classic et al. 2024; Carbonneau et al. 2012). La figure 1 résume les principales pressions s'exerçant sur les hydrosystèmes à l'échelle globale.

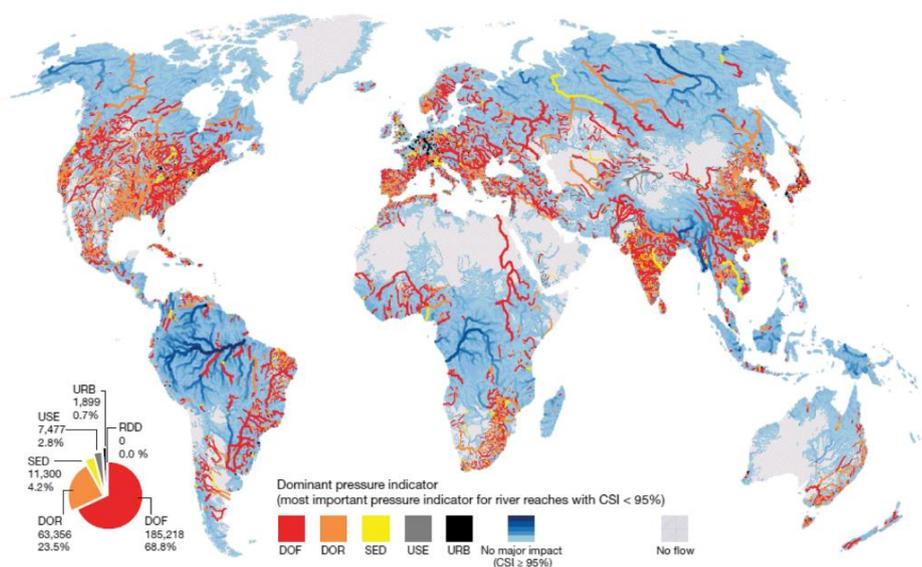


Figure 1 : Indicateur de pression dominant pour les tronçons de cours d'eau à l'échelle globale, inférieurs à un seuil donné de l'indice d'état de connectivité CSI de 95 %. Les indicateurs de pression comprennent le DOF (degré de fragmentation), le DOR (degré de régulation), le SED (piégeage des sédiments), l'USE (consommation d'eau) et l'URB (zones urbaines). L'encart montre le nombre et la proportion de tronçons de rivière par indicateur de pression dominant à l'échelle mondiale (Piégay et al. 2020).

En Europe (mais aussi en Amérique du Nord, où il a été estimé qu'environ 79 % du linéaire des corridors fluviaux a été impacté par les activités humaines (Wheaton et al. 2019), la suppression du bois mort, l'extermination des espèces ingénieuses, les rectifications et endiguements, le drainage des zones humides, la construction d'obstacles à l'écoulement, et l'incision (causée par des déficits sédimentaires, l'enrichissement des versants, des prélèvements de matériaux dans les lits mineurs, etc.) ont considérablement simplifié les hydrosystèmes, détruisant de nombreux habitats et faisant chuter considérablement la biodiversité inféodée aux milieux humides et en eau (Bravard et Petts 1996). Cette dégradation et l'incision généralisée, commune à de nombreux cours d'eau européens, a souvent permis à l'homme et à ses activités de s'installer dans le lit majeur déconnecté, généralement avec la construction d'infrastructures pour gérer les crues (García et al. 2021), mais dans le même temps, elle les expose à de forts aléas, entraînant des risques.

1.2 Quelles sont les réponses apportées à ces altérations ?

Ainsi, le maintien d'un corridor fluvial en bon état est nécessaire à la préservation du fonctionnement des écosystèmes fluviaux et de leur biodiversité, en permettant le maintien d'une dynamique et d'une connexion entre les divers habitats des cours d'eau et des espaces ripariens (Van Looy et al. 2014). Les paysages fluviaux en bon état de fonctionnement permettent le transport et la transformation de l'énergie au sein des systèmes, l'approvisionnement en eau, soutiennent la biodiversité, servent de corridors écologiques, favorisent l'agriculture, les loisirs, le tourisme, etc. (Classic et al. 2024) et sont donc essentiels pour l'environnement de manière générale, y compris pour nos sociétés humaines.

Il est donc plus que nécessaire de pouvoir pallier à ces nombreuses altérations. Depuis maintenant plus d'un siècle, scientifiques et gestionnaires tentent de conserver les hydrosystèmes les plus épargnés par les impacts anthropiques, et de restaurer ceux qui le sont le plus. Les scientifiques travaillant dans les sciences de l'eau sont ainsi depuis longue date impliqués dans la compréhension de ces hydrosystèmes afin d'aider les gestionnaires à prendre des décisions quant à leurs actions de gestion.

En raison de l'état d'altération que connaissent les écosystèmes terrestres à l'heure actuelle, caractériser et analyser les trajectoires d'évolution des environnements terrestres est devenu essentiel afin de pouvoir anticiper leurs évolutions futures, tout en quantifiant les impacts humains (Piégay et al. 2020).

Il est aujourd'hui possible de théoriser les changements de conditions des environnements terrestres à très large échelle spatiale et temporelle, via le prisme de l'anthropocène et des changements globaux tels que le changement climatique. Cependant, en réalité, ces changements sont extrêmement diversifiés et multiscalaires, certains ayant lieu très localement, et toutes les sociétés ne suivant pas les mêmes trajectoires (Piégay et al. 2020).

1.2.1 Des approches trop longtemps centrées sur les petites ou grandes échelles spatiotemporelles, et pas assez sur les échelles intermédiaires

Les hydrosystèmes sont des systèmes complexes dont les formes et fonctions varient longitudinalement, latéralement et verticalement, suivant de grands gradients hydrologiques, géomorphologiques et biologiques. Les flux et processus physiques, chimiques, et biologiques se manifestent à des échelles spatio-temporelles variées, allant du microhabitat à l'échelle régionale, et du quotidien au millénaire. Aux échelles les plus larges, la géologie, la topographie et le climat dictent largement la morphologie et l'agencement des cours d'eau, constituant les principales variables de contrôle des flux et processus impactant les écosystèmes sur le long terme (Beechie et al. 2010). À l'échelle des paysages et des bassins versants, des processus tels que l'érosion, le transport sédimentaire, et les flux d'énergie et de nutriments influencent la forme et les conditions des cours d'eau, et par conséquent, les habitats physiques. Ces processus, bien que modulés par des événements tels que les crues ou les glissements de terrain, demeurent relativement constants sur le long terme (Beechie et al. 2010; Malavoi et Bravard 2011). À l'échelle des tronçons, ces processus sont transformés et génèrent des dynamiques locales, comme la formation d'habitats dépendant de la dynamique fluviale, l'érosion des berges, et l'apport en bois mort. Ces processus influencent les formes et conditions du cours d'eau, ainsi que les habitats locaux (Beechie et al. 2010). Par exemple, le bois mort peut créer des bancs et des îles végétalisées en augmentant la rugosité du lit, ce qui ralentit l'écoulement et favorise le dépôt de sédiments (Beechie et al. 2010). Ces processus locaux impactent également le régime thermique, les échanges hyporhéiques, et les cycles des nutriments (Beechie et al. 2010).

En résumé, les écosystèmes des cours d'eau et des milieux humides, soumis à cet ensemble de processus, varient spatialement et temporellement en fonction de ces derniers (Beechie et al. 2010). Les hydrosystèmes sont ainsi fortement hiérarchisés, avec des processus à larges échelles tels que la géologie et le climat qui dictent des dynamiques plus fines. Cependant, ces systèmes sont également linéaires, un changement à un point pouvant avoir des répercussions sur l'ensemble du système, dans toutes les directions (Fausch et al. 2002). Ces caractéristiques soulignent ainsi l'importance d'outils permettant la caractérisation des objets géographiques, et donc les emprises spatiales pertinentes pour les opérations de gestion, ainsi que la priorisation de la conservation et de la restauration, et ce, à de larges échelles (Glassic et al. 2024).

Cependant, et durant plus d'un siècle, les sciences de l'eau ont adopté deux grands types d'approche de leur sujet d'étude et plus précisément des ajustements et réponses des cours d'eau et des habitats. La première est une approche à des échelles spatiales et temporelles très fines, qui consiste à échantillonner et à analyser principalement via des méthodes ponctuelles à l'échelle des tronçons ou des transects, sur quelques années au maximum (Carbonneau et al. 2012; Fausch et al. 2002). Les résultats de ces approches ont parfois été extrapolés et interpolés entre sites à des échelles autrement plus larges, menant à un déficit de connaissances concernant les processus s'opérant à des échelles moyennes et intermédiaires, et à une vision en quelque sorte erronée des hydrosystèmes fluviaux (Fausch et al. 2002). La deuxième est une approche autrement plus large, basée sur les grandes tendances et permettant la formulation de grands concepts et gradients évoluant de façon relativement prévisible dans l'espace, et de manière plus ou moins continue (Carbonneau et al. 2012; Fausch et al. 2002). L'hétérogénéité des hydrosystèmes a ainsi été longtemps perçue comme un « bruit », les paramètres physiques, chimiques et biologiques étant considérés comme répondant à des gradients continus des sources aux exutoires (Fausch et al. 2002).

1.2.2 De nouvelles approches et échelles

Néanmoins, cette vision des hydrosystèmes via les grands concepts de continuité et de gradients (cf. The River Continuum Concept (Vannote et al. 1980)) a été partiellement remise en question, ou plutôt enrichie, par un certain nombre d'auteurs et de nouveaux concepts (Flood Pulse Concept (Junk, Bayley, et Sparks 1989), Serial discontinuity concept (Stanford et Ward 1983)...) depuis les années 1980 et 1990 et tout particulièrement

depuis les années 2000, notamment en hydrobiologie. Ces auteurs affirment dès lors que discontinuités, complexité, hétérogénéité et variations sont des caractères essentiels des hydrosystèmes, ces variations et leurs processus associés s'opérant des micro-habitats jusqu'aux grands bassins versants (Carbonneau et al. 2012; Fausch et al. 2002).

A partir des années 2000, de nombreuses disciplines adoptent ce point de vue, et l'hydrobiologie donne naissance à l'écologie des paysages fluviaux, ou *riverscapes ecology* en anglais (Dunham et al. 2018; Fausch et al. 2002). Ces disciplines s'appuient sur un nouveau cadre conceptuel, qui décrit les corridors fluviaux comme des ensembles d'unités fonctionnelles et de « patchworks » (c'est-à-dire d'espaces présentant des attributs biologiques et physiques relativement uniformes) en connexion les uns avec les autres, spatiotemporellement discontinus et variables bien que répondant également partiellement aux grands gradients. Ce concept est repris par la restauration basée sur la nature, ou *process-based restoration* (Carbonneau et al. 2012; Fausch et al. 2002). Ces disciplines définissent ainsi les corridors fluviaux comme « *an ecological perspective that portrays rivers as a combination of broad scale trends in energy, matter, and habitat structure as well as local discontinuous zones and patches. The large and local extent variations affect the movement and dynamics of biological populations* » (Carbonneau et al. 2012).

Ainsi, plutôt que d'être des approches intermédiaires entre les grands gradients et les formes et processus locaux, elles s'appuient surtout sur une vision multiscalaire des hydrosystèmes reconnaissant la hiérarchisation et l'emboîtement des échelles, processus, drivers,... L'importance de certains processus physiques et écologiques ne peut être révélée qu'en prenant en compte différentes échelles spatiotemporelles, et les interactions entre ces échelles (Fausch et al. 2002). De la même manière, l'extrapolation des résultats d'études de terrain menées sur des tronçons espacés au sein d'un espace donné et à de courtes échelles temporelles peut ignorer des habitats ((une retenue de barrage de castors, un tronçon avec des échanges hyporhéiques importants,...) ou des événements (feux de forêt, glissement de terrain,...) rares et ponctuels à l'échelle des corridors fluviaux mais jouant un rôle essentiel et extrêmement important dans les dynamiques des écosystèmes (Fausch et al. 2002). De plus, les hydrosystèmes étant des systèmes extrêmement complexes, les dégradations dans leurs processus et flux peuvent se propager dans toutes les directions du système, et compromettre des écosystèmes parfois très éloignés du point de dégradation. Ce phénomène peut facilement être ignoré si une étude multiscalaire n'est pas menée sur l'ensemble du système (Fausch et al. 2002).

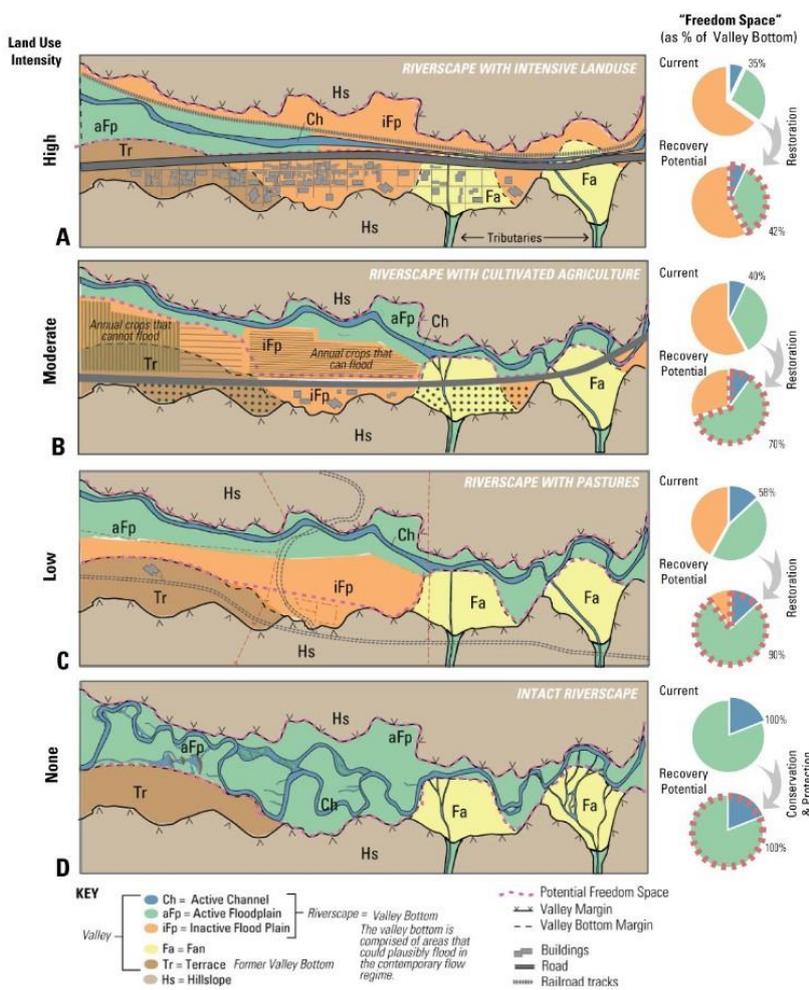
Cette nouvelle approche apparaît, tout du moins en partie, en réaction à l'inefficacité des travaux des hydroécologistes, durant les dernières décennies du 20^e siècle, à expliquer et mettre un terme à la diminution drastique des populations de poissons d'eau douce en Amérique du Nord (Fausch et al. 2002). En effet, ces travaux et études étaient souvent menés sur des tronçons de quelques centaines de mètres tout au plus et largement espacés sur les sites d'études, sur quelques années maximum, et n'étaient donc pas d'une grande utilité pour les gestionnaires souhaitant adresser les menaces et impacts anthropiques à grandes échelles (spatiales et temporelles), directs ou indirects (Fausch et al. 2002). De plus, une meilleure compréhension des hydrosystèmes liée à ce type d'approche permet de mieux discerner et comprendre l'origine anthropique ou naturelle des forces à l'œuvre au sein des systèmes, donc de mieux anticiper les changements passés et futurs, et de mieux planifier la gestion (Piégay et al. 2020). En effet, celle-ci était essentiellement basée sur l'ingénierie durant le 20^e siècle, avec comme exemple typique la restauration conçue par les ingénieurs qui tendait à créer des habitats « *ex-nihilo* » statiques, dans un système par essence dynamique, jugés comme désirables, sans prendre en compte les facteurs à l'œuvre au sein des hydrosystèmes et le contexte local (T. J. Beechie et al. 2010). Un exemple typique est le reméandrage « forcé » de rivières, ayant adopté un style rectiligne en réponse à des variables de contrôle externes, retrouvant ce même style fluvial dès la première crue morphogène suivant les travaux de « restauration » (T. J. Beechie et al. 2010).

Ces notions de complexité et d'hétérogénéité spatiale, de processus écologiques, de flux,... inhérentes au concept de « *riverscapes* » sont en grande partie issues de l'écologie des paysages, domaine apparu quelques années plus tôt, puis ayant infusé en hydrobiologie, puis dans les autres sciences de l'eau (Fausch et al. 2002).

Avant de continuer d'avantage, rappelons la notion de « *Riverscapes* », qu'il est essentiel de comprendre pour la suite de ce mémoire.

1.3 Qu'est-ce qu'un *Riverscape*, ou corridor fluvial

Le « *Riverscape* », notion similaire au corridor fluvial en français, est défini comme l'espace situé sur, autour et le long d'un cours d'eau, des sources jusqu'à l'exutoire. Un *Riverscape* comprend donc les chenaux des cours d'eau, mais aussi tout l'espace qui pourrait plausiblement être inondé par une rivière dans son régime hydrologique naturel contemporain, et qui est façonné par elle, que cette plaine d'inondation soit encore régulièrement inondée ou non (principalement en raison de causes anthropiques), et donc active ou non (Wheaton et al. 2019). En revanche, elle ne comprend pas les cônes de déjection, ni les terrasses alluviales, ni les versants (Glassic et al. 2024). La plaine alluviale (ou simplement *valley* en anglais) comprend quant à elle les cônes de déjection et les terrasses, ces dernières faisant par ailleurs partie de l'ancien lit majeur. En d'autres termes, un *riverscape* ou corridor fluvial correspond grossièrement à ce que l'on appelle le *valley bottom* en anglais (notion équivalente au lit majeur ou plaine alluviale des géomorphologues français, que nous appellerons *fond de vallée* dans le reste de ce rapport) et tout l'espace compris au sein de ses limites (Wheaton 2024).



La figure 2 ci-contre représente et identifie les objets géographiques composant un corridor fluvial, en fonction de différentes intensités d'occupation du sol, et caractérise l'espace de liberté potentiel. Le fond de vallée est une surface relativement plate, sujette à l'influence et au remaniement par les processus fluviaux contemporains. Il représente donc l'emprise maximale qu'un projet de restauration au sein du corridor fluvial peut adopter (Wheaton et al. 2019).

Figure 2 : Emprise spatiale et caractérisation de corridors fluviaux en fonction de différentes intensités d'occupation du sol, et l'espace de liberté potentiellement atteignable via la restauration ou la conservation, (Wheaton 2024).

L'espace de liberté potentiel correspond également à tout ou partie du corridor fluvial, mais il peut être restreint par un très fort taux d'anthropisation par exemple. Il s'agit d'un concept qui répond aux pressions subies par les corridors fluviaux (principalement l'urbanisation et l'agriculture, qui entraînent l'endiguement et la rectification, entre autres), et qui affirme la nécessité de leur redonner de l'espace latéral afin de rétablir les fonctionnalités écologiques, hydrologiques et géomorphologiques essentielles. Cela permettrait notamment de favoriser la mitigation des crues et la translation latérale. Il s'agit un concept de plus en plus utilisé dans la gestion des hydrosystèmes (Biron et al. 2014).

Le terme de *riverscapes*, contraction de *rivers* et *landscapes*, apparaît pour la première fois dans les années 60, dans un article de Leopold et Marchand de 1968 décrivant et quantifiant la nature esthétique et les processus physiques et biologiques à larges échelles des rivières (Leopold et O'Brien Marchand 1968). Cette première apparition du terme rappelle donc la notion de paysage si intrinsèquement liée à la géographie française, et pourrait être traduite en « paysage fluvial ». Cependant son sens a rapidement évolué pour adopter sa signification actuelle.

Les *riverscapes* ou corridors fluviaux sont créés et maintenus par divers processus physiques et biologiques variant à diverses échelles spatiales et temporelles, créant ainsi des formes géomorphologiques et des communautés écologiques particulières, dépendantes des conditions locales (climat, géomorphologie,...)(Wheaton et al. 2019). Cette notion est donc intrinsèquement liée aux nouvelles approches multiscalaires décrites plus haut dans cette introduction(Glassic et al. 2024; Wheaton et al. 2019).

1.4 L'émergence et développement de la géomatique

1.4.1 Rôle de la géomatique dans le développement des nouvelles approches des corridors fluviaux

Cependant, ce type d'approche a longtemps été difficilement applicable. En effet, comment analyser et caractériser les systèmes socio-écologiques complexes que sont les corridors fluviaux, ainsi que leur hétérogénéité, si les seules méthodes disponibles sont des méthodes de terrain de type inventaires, granulométrie,... ? La géomatique a permis le développement de ces approches. Ce secteur ayant connu un développement très rapide dans les sciences de l'eau depuis la fin du 20^e siècle, il a progressivement permis la démocratisation de données géospatiales disposant d'une résolution spatiale très fine, disponibles et utilisables à des échelles spatiales diversifiées (larges comme fines), de manière continue à travers des ensembles de corridors fluviaux(Glassic et al. 2024; Fausch et al. 2002; Piégay et al. 2020).

Ainsi un nombre grandissant d'études scientifiques mesurent et échantillonnent de manière continue des variables sur des ensembles de bassins versants ou de réseaux de corridors fluviaux, notamment grâce au développement de la télédétection(Carbonneau et al. 2012). Ce type de données permet également de mener des études multiscalaires, permettant une compréhension plus holistique des hydrosystèmes. Torgersen et al. en 1999 ont par exemple acquis des données géospatiales continues et à haute résolution sur un ensemble de bassins versants, puis les ont complétées par de nombreux échantillonnages et études de terrain à l'échelle des tronçons et des habitats. Cette étude a permis de mettre en évidence des relations entre la répartition des saumons Chinook dans l'Oregon, et les patterns de températures et de fréquences de mouilles au sein des corridors fluviaux (Torgersen et al. 1999). Un autre exemple de ce type d'études pionnières dans leur domaine est celui de Baxter et Hauer en 2000, qui ont démontré que dans des affluents de la rivière Montana, l'Ombre à tête plate (*Salvelinus confluentus*) construit ses nids dans des segments à faible pente et contraints de vallées alluviales, espacés généralement de 5 à 10 kilomètres. Leur étude multiscalaire a démontré qu'à des échelles intermédiaires, ces sites de nidification présentent des remontées d'eau souterraine permettant la création de refuges thermiques favorables à l'incubation des œufs pendant l'hiver, mais qu'à des échelles plus fines au sein de ces habitats, les ombles préféraient les zones avec des infiltrations en direction de l'aquifère, peut-être pour favoriser l'oxygénation correcte des œufs. Une étude traditionnelle échantillonnant des tronçons aléatoires au sein du bassin versant, ou seulement les tronçons où les ombles nidifient, n'aurait certainement pas pu mettre en évidence les processus géomorphologiques multiscalaires dictant la répartition spatiale des sites de nidification des ombles(Baxter et Hauer 2000).

Ces nouvelles méthodes permettent également d'adopter une échelle adaptée aux objectifs de l'étude. Dans l'idéal, il est recommandé de conserver une certaine flexibilité et de recueillir des informations à diverses échelles, afin d'identifier celles qui sont le plus pertinentes pour répondre aux objectifs de la dite étude. Par exemple, en ce qui concerne une étude sur la dispersion d'une espèce de poisson, il peut être plus pertinent de recueillir des informations moins précises mais continues sur la granulométrie des habitats à de larges échelles spatiales et temporelles, que des informations extrêmement détaillées, mais ponctuelles, sur de petits tronçons répartis au sein d'un bassin versant(Fausch et al. 2002).

Ainsi la caractérisation des objets géographiques des corridors fluviaux et l'identification des processus à l'œuvre en leur sein peuvent se faire à plusieurs échelles spatiales, toutes pertinentes en fonction de l'objectif recherché. Cette caractérisation peut se faire à l'échelle des tronçons, c'est-à-dire sur quelques kilomètres de cours d'eau et de corridor considérés comme « homogènes » d'un point de vue géomorphologique, écologique,...(Van Looy et al. 2014). Mais elle peut aussi s'effectuer à l'échelle d'un réseau hydrographique dans son ensemble(Van Looy et al. 2014).

1.4.3 La caractérisation

Un des principaux enjeux liés à la préservation du bon fonctionnement des corridors fluviaux, notamment par le maintien ou l'amélioration des différentes connectivités et continuums, est la caractérisation des objets géographiques et des unités géomorphologiques qui les composent, et ce sur de grands espaces. Divers éléments du paysage (ponctuels, linéaires, surfaciques) sont ainsi mesurés et délimités. Cette caractérisation et délimitation des formes au sein des corridors fluviaux est devenue un aspect central de leur gestion, ces unités dictant les formes, fonctions et fonctionnements, ainsi que l'évolution des corridors fluviaux(Gilbert, Macfarlane, et Wheaton 2016). Elle est également essentielle pour analyser et évaluer les habitats potentiels en hydrobiologie(Thoms, Scown, et Flotemersch 2018). Comme nous l'évoquerons en fin d'introduction, la caractérisation du fond de vallée est également essentielle, puisque jouant un rôle géomorphologique, écologique et hydrologique capital au sein des corridors fluviaux(Gilbert, Macfarlane, et Wheaton 2016). Cette caractérisation des corridors fluviaux peut se faire à diverses échelles, ce que nous aborderons plus tard.

La caractérisation des corridors fluviaux peut se faire sur le terrain, via des études de terrain « classiques », ce sont les approches *bottom-up* (Thoms, Scown, et Flotemersch 2018). Cependant ces méthodes sont de plus en plus complétées, voire remplacées par des approches *top-down*, grâce à des données géospatiales disponibles ou acquises(Thoms, Scown, et Flotemersch 2018) et l'évaluation de leur état. A partir de données disponibles de manière homogène sur un espace donné, cet état est estimé et quantifié en fonction des diverses pressions susceptibles de perturber ou d'altérer les divers processus à l'œuvre au sein des corridors fluviaux(Van Looy et al. 2014)

1.4.5 Sectorisation, agrégation et discrétisation

La caractérisation à grande échelle des corridors fluviaux passe souvent par un certain degré de désagrégation et d'agrégation spatiale. Segmenter et discrétiser longitudinalement les corridors fluviaux en objets géographiques permet de produire des unités d'échantillonnage au sein desquelles leur hétérogénéité caractéristique est réduite, ce qui permet d'extraire des métriques et des statistiques intéressantes pour chaque tronçon et de caractériser de manière continue l'hydrosystème et donc, in fine, de permettre la priorisation des actions de gestion(Glassic et al. 2024; Alber et Piégay 2011). La sectorisation d'un corridor fluvial peut prendre plusieurs formes. Les UGO (*Unitary Geographical Objects*) sont par exemple des unités spatiales composées d'éléments biophysiques, comme le fond de vallée, les chenaux,... auxquels sont attachés des LRA (*Linear Referencing Axis*). Les *Discrete Geographical Objects* quant à eux sont une désagrégation spatiale des UGO en unités spatiales haute résolution. Ils permettent de caractériser les UGO, et d'effectuer l'échantillonnage d'attributs de manière continue le long des réseaux hydrographiques, lesquels sont joints directement au DGO concerné. Généralement, cette désagrégation est effectuée en utilisant la polygonisation de Thiessen. Les DGO peuvent également être agrégés en *Aggregated Geographical Objects*, afin de mener des analyses spécifiques nécessitant une échelle plus large(Alber et Piégay 2011).

1.4.6 Modélisation et son importance dans les sciences de l'eau

L'un des revers du développement des données géospatiales à fine résolution à des échelles spatiales très larges est la difficulté de les gérer, de les analyser, et d'en tirer des résultats sans connaissances poussées en géomatique et en traitement de données(Piégay et al. 2020). L'utilisation de modèles, notamment hydrologiques est relativement ancienne, remontant aux années 1960(Fatichi et al. 2016). Cependant, et depuis quelques décennies, la modélisation prend de plus en plus d'importance au sein de la communauté des sciences de l'eau et l'automatisation des géotraitements est également de plus en plus courante. Cela est notamment dû à un environnement favorable, un grand nombre de langages de code et de logiciels open

source étant facilement disponibles. Ainsi, ce type de modèles permettant d'analyser les données se répand dans la plupart des disciplines comme l'hydrologie, la géomorphologie fluviale, l'écologie,... Des environnements de modèles sont aussi créés, notamment sous la forme de *ToolBox*, des ensembles de modèles disponibles dans divers logiciels SIG. L'intelligence artificielle commence également à être utilisée, notamment pour les tâches particulièrement répétitives et chronophages, comme la classification par exemple (Piégay et al. 2020).

1.4.7 Le transfert à la gestion

De manière similaire à la recherche, la surveillance et la gestion des hydrosystèmes ont longtemps été axées sur les chenaux des cours d'eau, via des études de terrain classiques à petites échelles spatiotemporelles (Carbonneau et al. 2012).

Cependant, l'approche de l'écologie des paysages fluviaux et l'échelle des corridors fluviaux est de plus en plus adoptée par les gestionnaires afin de prioriser la gestion et la restauration. Ce développement est largement aidé par la démocratisation de données géographiques publiques et gratuites à haute résolution disponibles à plus ou moins larges échelles. Le MNT RGE Alti 1m en est un très bon exemple. Les techniques d'acquisition LiDAR, la télédétection, la bathymétrie, les images thermiques,... sont aussi de plus en plus accessibles et usitées pour caractériser l'ensemble des réseaux de corridors fluviaux. Elles s'inscrivent en complément des méthodes classiques telles que la granulométrie de terrain, la mesure de profils en long, les inventaires,... (Carbonneau et al. 2012; Glassic et al. 2024). Les défenseurs de l'approche des « *riverscapes* » insistent tout particulièrement sur l'importance des analyses multi et hyperscalaires, rendues possibles par l'apparition de telles données, et permettant de rendre compte des gradients et connectivités des hydrosystèmes, mais également de leurs discontinuités, variabilités et de leur hétérogénéité (Carbonneau et al. 2012). L'idéal pour les gestionnaires est donc d'avoir accès à des données à haute résolution spatiotemporelle, disponibles à de larges échelles, permettant de planifier leurs actions de gestion du tronçon à la région entière si besoin (voir figure 3). Les études des gestionnaires tendent également à se décentrer des chenaux en eau pour inclure les structures paysagères plus larges des corridors fluviaux (Fausch et al. 2002). De la même manière, les éléments que nous avons abordés (priorisation, segmentation, modélisation,...) tendent de plus en plus à se diffuser chez les gestionnaires, notamment grâce à certains chercheurs travaillant à cela.

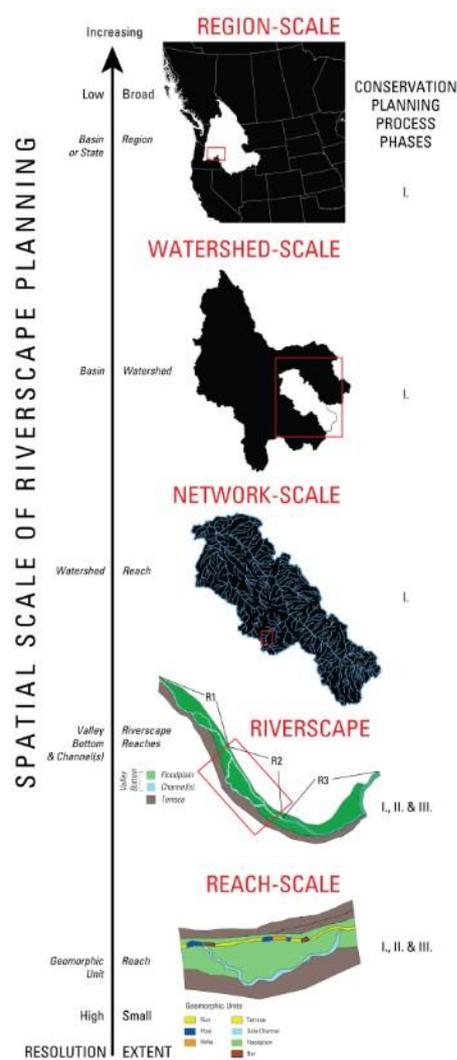
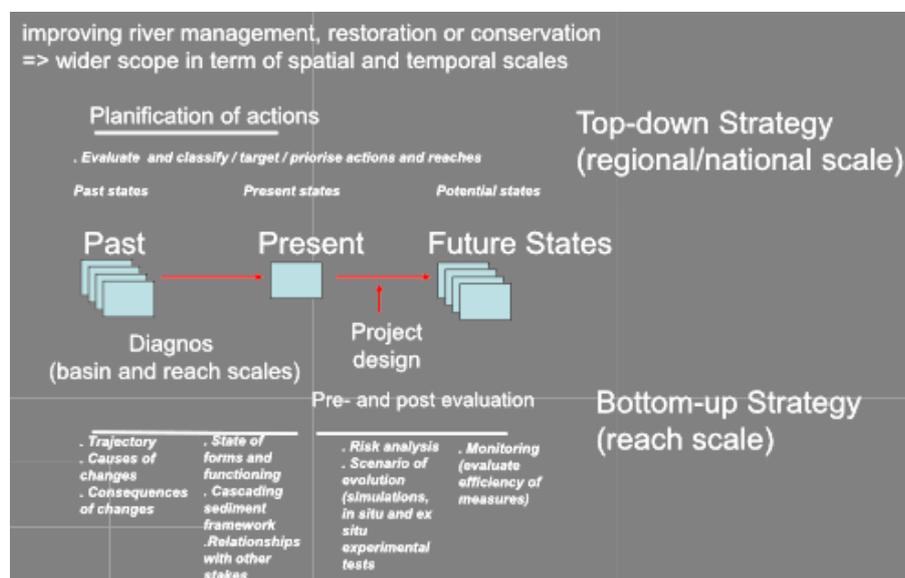


Figure 3 : Hiérarchisation et emboîtement des échelles utilisées pour la planification des actions de gestion et l'utilisation de données géospaciales (Wheaton et al. 2019)

Le développement des études scientifiques multiscalaires à l'échelle des bassins versants permet également à la recherche de produire des études, observations et prédictions pertinentes aux échelles auxquelles les gestionnaires évaluent les changements et exercent leurs actions de gestion (Fausch et al. 2002).

Les nouvelles méthodes et techniques permettant l'acquisition de telles données géospaciales sont de plus en plus diversifiées, et incluent une large gamme de capteurs tels que les caméras thermiques, digitales, LiDAR, les géophones,... montés sur des supports toujours plus diversifiés (drones, satellites, avions,

ULM,...)(Piégay et al. 2020). Ces techniques et méthodes ont permis l'apparition de la cartographie et de l'analyse de variables de premier ordre multiples et de leurs variations (granulométrie, cartographie de biotopes, transport de bois mort, variables de premier (largeur, profondeur, section mouillée,...) ou deuxième ordre (puissance du cours d'eau, shear stress, nombre de Froude, vitesse,...),...), sur l'ensemble d'un réseau de corridors fluviaux, chose quasi-impossible il y a quelques décennies. Elles peuvent par exemple être utilisées pour modéliser des habitats latéralement et longitudinalement. Ces techniques présentent également l'avantage considérable d'être plus économes en moyens, temps et énergie (Carbonneau et al. 2012). Comme nous l'avons précédemment évoqué avec l'exemple de Torgersen, ces méthodes d'acquisition à de larges échelles spatiotemporelles sont bien sûr complémentaires d'approches plus localisées et ponctuelles, ainsi que des techniques de terrain plus « traditionnelles » (Fausch et al. 2002).



Ainsi ces avancées et la démocratisation de ce type de données facilitent grandement les diagnostics (à diverses échelles), la priorisation, la planification et la conception de projets de gestion (restauration ou conservation notamment), le suivi et l'évaluation de projets, l'anticipation de trajectoires futures,... comme cela est résumé en figure 4 (Piégay et al. 2020).

Figure 4 : Cadre général des études en géomorphologie fluviale, du diagnostic à l'émergence de projet, stratégies top-down et bottom-up (Piégay et al. 2020)

1.4.8 La priorisation

L'un des aspects les plus importants et l'une des problématiques principales pour la restauration des cours d'eau concerne la priorisation de cette même restauration (Glassic et al. 2024). Le développement des données géospatiales haute résolution disponibles à de larges échelles permet d'une part d'évaluer l'état global d'un réseau de corridors fluviaux, et, d'autre part, de déterminer des tendances, qu'elles soient à l'amélioration, la dégradation ou à la stabilité, via des études multiscalaires. Ces dernières permettent de cibler les actions de gestion de manière beaucoup plus précise que les méthodes de terrain classiques (Glassic et al. 2024). Ainsi cette connaissance fine de l'espace étudié peut permettre de prioriser les actions de gestion, en préservant les secteurs jugés comme étant en bon état général, et en planifiant des opérations de restauration pour les secteurs les plus dégradés ou soumis aux plus grandes pressions. De même que dans la recherche, les gestionnaires qui en ont les moyens peuvent mesurer certaines variables sur l'ensemble de leur terrain d'étude, comme la granulométrie d'un bassin versant entier par exemple (Glassic et al. 2024).

Ce type d'approche et de méthodes permet également le suivi des opérations de gestion à diverses échelles, et notamment leurs effets sur l'ensemble du système (Glassic et al. 2024).

Ainsi, l'échelle des corridors fluviaux et le recours aux études multiscalaires, produites via un ensemble de données géospatiales à haute résolution disponibles sur de vastes espaces et complétées par de classiques études de terrain, sont de plus en plus adoptées par la recherche et plus récemment par les organismes de gestion. Ces approches permettent de caractériser et de prioriser les actions de gestion à des niveaux rarement atteints par le passé et de gérer les habitats pour les espèces menacées, de gérer les espèces invasives, de maintenir les services écosystémiques des hydrosystèmes (approvisionnement en eau potable,

pêche, loisirs, etc.), de maintenir ou d'améliorer la résilience des hydrosystèmes face aux pressions anthropiques et au changement climatique,...(Fausch et al. 2002).

1.5 Limites actuelles de la géomatique et du partage de données

1.5.1 Limites de la géomatique

Les données géospatiales acquises à l'échelle des tronçons sont très précises et généralement de grande qualité. Elles sont caractérisées par une résolution très fine et permettent de identifier des habitats, des perturbations locales, des processus, etc. Cependant, l'acquisition de ce genre de données est généralement relativement chronophage et coûteuse (bien que ce soit de moins en moins le cas), et donc opérée sur des espaces d'étendue limitée. Cela peut ainsi conduire à un manque de compréhension des perturbations anthropiques sur l'ensemble d'un bassin versant par exemple, à un manque de compréhension de l'hétérogénéité des hydrosystèmes,...(Glassic et al. 2024; Piégay et al. 2020). Les données à haute résolution disponibles sur de larges espaces acquises par LiDAR, bathymétrie, télédétection,... sont de plus en plus disponibles et usitées par les organismes de gestion, mais elles demandent des équipements et du matériel (notamment optique) très coûteux que nombre d'organismes, notamment de petite taille, ne peuvent se permettre d'acquérir(Glassic et al. 2024).

C'est sans compter la puissance de calcul potentiellement nécessaire pour traiter ce genre de données à haute résolution sur de larges espaces, qui peut être un autre facteur limitant à leur utilisation. Plus les données à haute résolution se démocratisent, plus les puissances de calcul nécessaires augmentent en parallèle(Fan et al. 2014). De plus, certains organismes de recherche ou de gestion préfèrent encore obtenir leurs propres données à l'échelle du tronçon, en utilisant leurs propres méthodes de collecte et souvent leur propre logique, ce qui complique les échanges, la collaboration et la réutilisation des données, et encore faut-il que ces organismes les partagent effectivement(Wilkinson et al. 2016; Glassic et al. 2024). Evidemment, ces problématiques ralentissent également l'avancée de la recherche, dans les sciences de l'eau mais aussi dans d'autres domaines, ainsi que les nouvelles découvertes(Wilkinson et al. 2016). Un des enjeux principaux lié à la démocratisation de la géomatique est donc la mise à disposition de ce type de données multiscalaires pour tous les organismes de gestion, même ceux dont les moyens sont les plus limités(Glassic et al. 2024).

Les données géospatiales publiques disponibles jouent un rôle essentiel pour atteindre cet objectif, car elles sont souvent accessibles à large échelle, généralement facilement accessibles et gratuites, fiables, correctement archivées, régulièrement mises à jour et généralement valorisées sur le long terme(Wilkinson et al. 2016). Cependant, l'acquisition, le traitement, le stockage,... de telles données reste couteux même pour les organisations publiques, d'autant plus que ce coût tend à augmenter avec la surface couverte(Piégay et al. 2020). Cependant il faut noter que le développement de nouvelles technologies telles que la démocratisation des drones, la constante amélioration de la résolution des satellites,... tend à démocratiser et faciliter l'accès à de telles données.

1.5.2 Partage des données

En 2016, Wilkinson et al. définissent des grands principes relatifs à la bonne gestion des données scientifiques et à destination des producteurs et publicateurs de données(Wilkinson et al. 2016). Ces grands principes sont au nombre de quatre : *Findability* (facilement trouvables), *Accessibility* (accessibilité), *Interoperability* (interopérabilité), et *Reusability* (réutilisabilité). Ces principes visent à améliorer le partage, la réutilisation et l'accessibilité des données produites scientifiquement, afin de permettre aux individus, ainsi qu'aux ordinateurs et machines via l'automatisation, de manipuler et d'utiliser facilement ces données(Wilkinson et al. 2016). Cela passe notamment par une standardisation des écosystèmes de données. Le détail des principes FAIR est visible en figure 5.

Box 2 The FAIR Guiding Principles
<p>To be Findable: F1. (meta)data are assigned a globally unique and persistent identifier F2. data are described with rich metadata (defined by R1 below) F3. metadata clearly and explicitly include the identifier of the data it describes F4. (meta)data are registered or indexed in a searchable resource</p> <p>To be Accessible: A1. (meta)data are retrievable by their identifier using a standardized communications protocol A1.1 the protocol is open, free, and universally implementable A1.2 the protocol allows for an authentication and authorization procedure, where necessary A2. metadata are accessible, even when the data are no longer available</p> <p>To be Interoperable: I1. (meta)data use a formal, accessible, shared, and broadly applicable language for knowledge representation. I2. (meta)data use vocabularies that follow FAIR principles I3. (meta)data include qualified references to other (meta)data</p> <p>To be Reusable: R1. meta(data) are richly described with a plurality of accurate and relevant attributes R1.1. (meta)data are released with a clear and accessible data usage license R1.2. (meta)data are associated with detailed provenance R1.3. (meta)data meet domain-relevant community standards</p>

Figure 5 : Principes FAIR, (Wilkinson et al. 2016)

Ces principes FAIR ont été développés en réponse à un manque de standardisation des données à l'échelle globale. Chaque hébergeur et gestionnaire de données tend à utiliser ses propres méthodes, architectures, formats, logiques,... Certains hébergeurs de données n'harmonisent même pas les données en leur possession. Cela complique donc fortement l'accès, l'interopérabilité et la réutilisation des jeux de données en question (Wilkinson et al. 2016).

Mais de nouveau, des progrès sont faits dans cette direction. Certaines organisations, comme le Riverscapes Consortium dont nous parlerons amplement ici, travaillent à cette standardisation et harmonisation. De plus en plus de réseaux de recherche, centres de données, communautés, collaborations... se forment et rassemblent des chercheurs et parfois des gestionnaires, afin de faciliter les échanges de données et la permisivité entre les différentes disciplines, organisations, modèles, et autres (Piégay et al. 2020).

1.6 Notions et concepts essentiels pour la compréhension de la suite du rapport

1.6.1 Le Valley Bottom, ou « fond de vallée »

Comme nous l'avons très rapidement abordé, le Valley Bottom joue un rôle essentiel dans la définition des riverscapes, ou corridors fluviaux. Il est constitué des chenaux en eau des cours d'eau, et des plaines d'inondation potentiellement créées et façonnées par le régime contemporain des crues, bien qu'elles puissent être inactives, principalement en raison de causes anthropiques (Wheaton et al. 2019).

Cet ensemble, et notamment les plaines inondables, occupe une place très importante dans le fonctionnement des corridors fluviaux, en termes d'hydrologie, de géomorphologie, et d'écologie. Comme leur nom l'indique, les plaines inondables sont régulièrement inondées et se forment par l'accumulation de sédiments lors de ces épisodes. Pour cette raison, elles sont relativement plates, et bordées par des versants, des moraines, des cônes de déjection, des terrasses (paléoplaines),... (Gilbert, Macfarlane, et Wheaton 2016 ; Glassic et al. 2024). Les plaines d'inondation sont corrélées à la taille et au style fluvial de la rivière associée, qui dicte la forme, la taille et l'étendue du fond de la vallée, mais aussi au degré de confinement du fond de la vallée, qui à son tour, dicte le type de rivière que l'on peut rencontrer. Un fond de vallée plus large correspond généralement à une zone de drainage plus étendue en amont. Il en va de même pour la pente de la plaine inondable (lit majeur) : plus elle est plate, plus la surface drainée est importante (Gilbert, Macfarlane et Wheaton 2016).

Le fond de vallée représente également l'emprise maximale que peut occuper la végétation riparienne et riveraine, en dehors de toute influence anthropique. Ils abritent une très grande diversité d'habitats (bras morts, marécages, marais,...) et d'organismes, et offrent de nombreuses fonctions écosystémiques (échanges hyporhéiques, puits de sédiments, mitigation des extrêmes hydrologiques,...) (Gilbert, Macfarlane, et Wheaton 2016 ; Glassic et al. 2024).

En raison de son importance au sein des corridors fluviaux, identifier correctement cet objet géographique est un enjeu majeur pour n'importe quel projet de gestion, et l'identification du degré de reconnexion

envisageable entre le lit mineur et le lit majeur peut permettre une priorisation de la restauration (Glassic et al. 2024).

De nombreux outils SIG ont été développés pour extraire et délimiter les fonds de vallée (lit majeur), à partir de MNT grossiers disponibles sur de grandes échelles, et de plus en plus à partir de MNT à plus haute résolution, produits à partir de données LiDAR. Plusieurs méthodes existent, que nous aborderons plus tard (Gilbert, Macfarlane, et Wheaton 2016 ; Glassic et al. 2024). En théorie, les fonds de vallée peuvent être déterminés à l'échelle des réseaux de corridors fluviaux dès qu'une information topographique est présente.

1.6.2 Castors

Les castors, qu'il s'agisse de *Castor fiber* ou de *C. canadensis*, ont un impact majeur sur les flux, les formes et les processus au sein des hydrosystèmes, et notamment des corridors fluviaux. Ces deux espèces tombent typiquement dans la définition d'espèces ingénieurs telles que définies par Jones et al. et Jones et Lawton en 1994 et 1995, dans le sens où ces espèces « *directly or indirectly modulate the availability of resources (other than themselves) to other species, by causing physical state changes in biotic or abiotic materials. In so doing they modify, maintain and/or create habitats* » (C. G. Jones, Lawton, et Shachak 1994). Cette capacité à modifier leur environnement est due notamment à la construction de structures au sein des corridors fluviaux (barrages, huttes, canaux,...) qui, en augmentant la rugosité hydrologique et la complexité du système, contribuent grandement à améliorer les connectivités latérales et verticales, notamment entre le lit mineur, le fond de vallée, les nappes d'accompagnement et la zone hyporhéique. Les castors contribuent également à l'accumulation de sédiments et à l'aggradation du cours d'eau par rupture de compétence. Ils jouent aussi un rôle d'épuration en diminuant les taux de nutriments (carbone, azote, phosphore,...) et de matière en suspension et de nutriments fins en sortie de complexe, tout en augmentant la production primaire via le stockage de ces nutriments,... (Kornse et Wohl 2020; Brazier et al. 2021; Wheaton et al. 2019).

En augmentant les temps de résidence de l'eau, ils contribuent à accroître les échanges entre le lit mineur et les nappes alluviales, ce qui a pour effet d'augmenter les toits de nappes de ces dernières, et augmentant le pouvoir mitigeur des corridors fluviaux sur les extrêmes hydrologiques (Brazier et al. 2021). Ils augmentent également considérablement les surfaces en eau et les milieux humides, directement (par la construction de barrages et de retenues par exemple), ou indirectement (par l'élévation des toits de nappe). De manière générale, ils complexifient largement les écosystèmes des milieux humides ou en eau en créant une grande diversité d'habitats en leur sein, et favorisent une plus riche biodiversité, ainsi qu'une résilience accrue aux perturbations tels les feux de forêts par exemple (cf. figure 6) (Kornse et Wohl 2020).

Leur alimentation sélective bouleverse aussi les communautés ripariennes, favorisant certaines espèces au détriment d'autres, et en maintenant des milieux ouverts (Kornse et Wohl 2020; Brazier et al. 2021).



Figure 6 : Sur cette image prise dans l'Utah aux Etats-Unis, la rugosité hydrologique créée par les castors et leur capacité à dévier les flux est bien visible, avec de nombreux canaux secondaires, retenues de barrage,... A noter, la diversité d'habitats observables et la différence de végétation du fond de vallée par rapport aux versants. C.George, 2024

Les castors, eurasiens et américains, ont connu une baisse très importante de leurs populations au cours des derniers siècles en raison d'impacts anthropiques directs (chasse) ou indirects (pertes d'habitats). Ils ont alors disparus de nombreuses régions, et ce, jusqu'à former de petits noyaux de populations relictuels en Europe (Kornse et Wohl 2020; Fustec et al. 2001). Ainsi, les écosystèmes des paysages fluviaux ont, tout du moins en partie, connu une simplification et une dégradation en raison de la disparition de cette espèce ingénieure (Kornse et Wohl 2020).

En raison de ses nombreux impacts positifs sur son environnement et notamment au niveau de la géomorphologie fluviale (lutte contre l'incision) le castor est devenu un aspect central de nombreux projets de restauration, et notamment des techniques *low-techs*. Cela passe par sa réintroduction, ou par l'imitation de structures similaires à celles construites naturellement par l'espèce et implantées directement dans les cours d'eau, communément appelées *Beaver dam analogs* ou BDA (Wheaton et al. 2019).

Cependant, le castor n'est pas adapté à tous les types de milieux et à tous les cours d'eau. En effet, il privilégie par exemple les rivières à faibles pentes au détriment des rivières à fortes pentes, et préfère les écoulements permanents. Il doit également disposer de sources de végétation ripariennes suffisantes et accessibles facilement pour son alimentation et ses activités de construction (Kornse et Wohl 2020). Ainsi, les gestionnaires, scientifiques,... ont besoin d'estimer la capacité d'un milieu donné à accueillir l'espèce, éventuellement dans l'objectif de la réintroduire ou de la favoriser (Kornse et Wohl 2020).

2. Objectifs et cadre du stage

2.1 Présentation et contexte de l'étude

2.1.1 Le Riverscapes Consortium

Le Riverscapes Consortium, cofondé par Joseph Wheaton, est une collaboration internationale de personnes engagées dans la préservation des hydrosystèmes. Son objectif est de développer des modèles, outils et données destinés aux gestionnaires et chercheurs en Sciences de l'Eau, afin d'améliorer globalement la santé des hydrosystèmes à travers le monde (Wheaton et al. 2022).

Le Riverscape Consortium travaille à développer des modèles principalement codés en Python. Ces modèles peuvent disposer de plusieurs « grades ». Dans ce rapport, nous ne traiterons que des modèles de grade « production ». Ils sont conçus pour être automatiquement exécutés dans le cloud via un outil particulier intitulé *CyberCastor*, et ne sont donc pas destinés à être utilisés directement par les utilisateurs sur leur ordinateurs personnels ou via des logiciels de cartographie, contrairement aux deux autres catégories, bien que cela reste possible (Riverscapes Consortium 2024c).

2.1.2 Objectifs et cadre du stage

A l'heure actuelle, environ 80 000 projets ont été produits par les modèles « Production » sur le territoire des Etats-Unis, dont le territoire couvert est visible en figure 7 (Riverscapes Consortium 2024c).

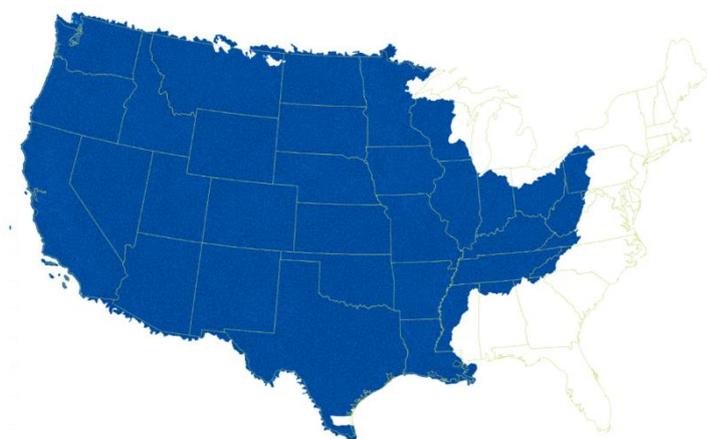


Figure 7 : Emprise spatiale des 80000 projets existants du Riverscape Consortium (Riverscapes Consortium 2024k)

Cependant, malgré une volonté affirmée de s'étendre à l'international, très peu de projets existent sur le territoire de pays autres que les Etats-Unis. Un début de rapprochement entre le Riverscape Consortium et l'EUR H2O Lyon a eu lieu en 2022 lorsque Joseph Wheaton, co-fondateur du RC, a passé une année à Lyon afin de travailler au déploiement des outils et modèles du RC sur le territoire européen, et ce pour permettre leur adoption par les gestionnaires et chercheurs européens (Wheaton et al. 2022). L'objectif initial était de développer une interface web commune, notamment afin de diffuser les outils et données de la recherche vers la gestion. Ce projet n'a pour l'heure pas abouti.

Ainsi, la période de stage ayant donné naissance au présent document s'inscrit en continuité de ce projet, avec pour objectif d'appliquer certains modèles du rang production au contexte français, et de préparer les données produites afin de pouvoir les héberger dans le Data Exchange, que nous aborderons plus tard. L'objectif n'est pas forcément de produire des résultats pertinents pour d'éventuels gestionnaires dans l'immédiat, la calibration des modèles sur le contexte français n'étant pas à l'ordre du jour. La finalité de ce stage est donc plutôt de pouvoir démontrer la possibilité d'exécuter ces modèles avec des données françaises sur le contexte français, et de pouvoir ouvrir la voie à un projet d'adaptation plus ambitieux.

2.1.3 Problématique

Ainsi, l'ambition de cette période de stage est de relancer ce projet en appliquant les modèles du R.C. au contexte français. Cependant, ces modèles sont-ils tous réellement applicables ? Quels sont les plus pertinents pour le contexte et les gestionnaires français ? Avec quelles données ? Quelles sont les modifications à apporter ? Quelles sont les probables difficultés qui seront rencontrées ? Comment diffuser les modèles et leurs données une fois ces derniers appliqués ? Quelle sera la suite du projet ? Le présent document se donne comme ambition de tenter de répondre à ces diverses questions.

2.1.4 Hypothèses

Plusieurs hypothèses se sont dégagées de ce début de réflexion quant à cette mission. Tout d'abord, les premiers modèles du R.C. devraient être facilement applicables au contexte français, moyennant quelques adaptations et changements. Comme nous l'évoquerons, les modèles fonctionnent en cascade : les premiers utilisent des données hydrologiques, topographiques, etc., et effectuent des géotraitements simples. Ainsi, il est nécessaire pour le fonctionnement des modèles de modifier et appliquer ces premiers modèles en priorité, ce que nous ferons ici. La plupart des données utilisées ont des équivalents en France, bien que certaines thématiques risquent de poser problème, comme la végétation par exemple. Cependant, les modèles situés plus bas dans la cascade, comme le Beaver Restoration Assessment Tool et le Riparian Condition Assessment Tool notamment, sont beaucoup plus complexes et utilisent des logiques qui leur sont propres et relativement spécifiques au contexte américain. Cette période de stage ne durant que 6 mois, nous n'aurons donc probablement pas le temps de les appliquer, mais une réflexion sera menée quant à leur adaptation, afin d'ouvrir la voie à la suite du projet. Les modèles ne seront pas calibrés au contexte français et leurs résultats seront donc probablement inexacts. Cela n'est pas une limite en soit, l'objectif de ce stage étant de montrer la faisabilité d'une telle adaptation de modèles américains sur le contexte français, et non pas la production de résultats à destination des gestionnaires par exemple. Il serait aussi techniquement possible de produire de vraies versions françaises des modèles, afin de les appliquer et de les automatiser sur le contexte français. Ce sera là l'objectif vers lequel nous tendrons.

Dans un premier temps, nous présenterons les matériels et méthodes utilisés pour le présent projet, à savoir les données et outils du Riverscapes Consortium, ainsi que leur fonctionnement. Par la suite, une réflexion et une analyse critique seront menées sur les modèles afin de déterminer lesquels sont les plus pertinents pour être appliqués au contexte français. Puis, une étude de cas sera menée afin de tester l'application des modèles au contexte français. Enfin, une dernière partie sera constituée des limites observées, des perspectives du projet et des recommandations formulées.

2.2 Fonctionnement général des outils du Riverscapes Consortium

Ces outils utilisent en entrée des données publiquement et gratuitement disponibles à l'échelle nationale, ce qui permet de mener des analyses sans avoir à effectuer de relevés sur le terrain. Chaque modèle utilise des données en entrée qu'il transforme d'une manière ou d'une autre en données de sortie. Tous les modèles sont libres de droits et gratuits, ainsi, leur code est également accessible gratuitement. La plupart des modèles ont été directement développés par le R.C., tandis que d'autres ont été développés par des partenaires et rendus compatibles avec les standards du Consortium, qui seront détaillés plus tard. Comme nous l'avons évoqué précédemment, les outils du R.C. disposent d'un « grade », en fonction de leur compatibilité avec les standards : concept, recherche, opérationnel, professionnel, production et commercial. Le grade « concept » signifie par exemple qu'un algorithme et une méthode ont été développés, mais qu'ils n'ont pas été intégrés à un véritable outil que d'autres personnes peuvent utiliser. Le grade production, qui nous intéresse ici, signifie que l'outil dispose d'une interface utilisateur facilement utilisable, qu'il produit des données de sortie pouvant être visualisées, manipulées et réutilisées par d'autres outils, et que son fonctionnement est basé sur des méthodes publiées et revues par les pairs, voire même d'une publication spécifique à l'outil (Riverscapes Consortium 2024k; Wheaton 2019).

2.2.1 Principe des projets

Les modèles et les applications du R.C. sont basés sur le principe de projets. Ces projets sont en réalité des dossiers, construits selon une architecture « logique » visant à faciliter leur utilisation. Ils comprennent plusieurs sous-dossiers dans lesquels sont organisées les données utilisées et produites (Riverscapes Consortium 2024h). Chaque projet est relatif à une emprise spatiale, une thématique, un modèle,.... Un projet est donc toujours associé à un type de projet donné, relatif par exemple à l'un des modèles du RC, et ce type permet de déterminer quelles données sont présentes dans le projet et quelle *business logic* utiliser.

Chaque script(s) python des modèles commence toujours par la création d'un tel projet, créant trois sous-dossiers (inputs, intermediates et ouputs), et écrivant le chemin des couches concernées. Puis le modèle se charge généralement directement d'écrire un fichier XML respectant une architecture spécifique au type de projet concerné, décrivant les métadonnées et les couches utilisées. Ce fichier se nomme toujours *project.rs.xml* et se trouve toujours à la racine du projet (Riverscapes Consortium 2024h).

Les couches vectorielles en entrée, intermédiaires et en sortie sont stockées généralement stockées au format Geopackage, parfois au format Shapefile. Les couches rasters sont simplement stockées dans les sous-dossiers, préférentiellement au format GeoTiff.

2.2.2 Standards et compatibilité

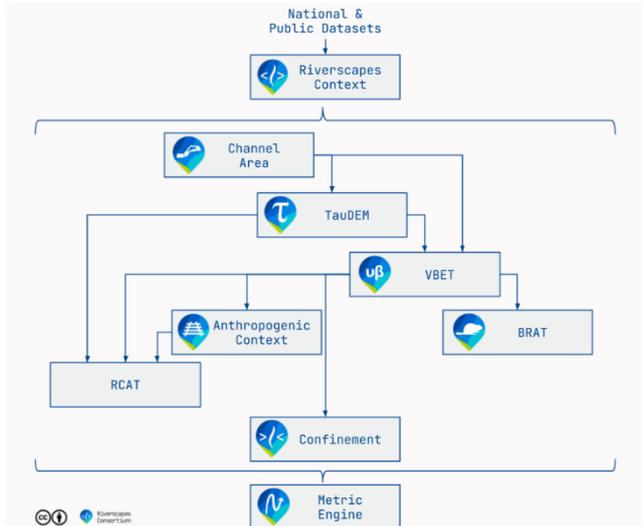
Le R.C. a volontairement défini des standards généraux et minimaux afin de faciliter l'accès aux données et aux modèles. Deux principaux standards ont été définis, l'un pour les modèles et l'autre pour les données utilisées (Riverscapes Consortium 2024h). Ce dernier liste notamment les métadonnées obligatoires et optionnelles à inclure, et dicte l'ensemble des règles à respecter pour que les fichiers XML des données soient compatibles avec les standards (notamment quels tags XML inclure, quels attributs, de quelle manière,...) (Riverscapes Consortium 2024h). Cela permet aux applications du R.C. (R.C. Viewer, Data exchange,...) de pouvoir retrouver, traiter et visualiser les données d'un projet.

Ces principes et standards facilitent l'interopérabilité en rendant les données et modèles open source et standardisés. Cela permet également l'automatisation simplifiée pour l'analyse et le traitement des données, ainsi que les transferts de données entre les modèles (via les fichiers XML) (Riverscapes Consortium 2024h).

De manière générale, le R.C. affirme son ambition d'appliquer les principes FAIR imaginés par Wilkinson et al. en 2016, que nous avons déjà abordés (Wilkinson et al. 2016).

2.2.3 Business Logic

Pour chaque type de projet au sein du R.C., un fichier XML appelé « Business Logic » est utilisé afin de traduire le fichier XML du projet d'une manière plus intuitive pour l'utilisateur, de manière à ce que celui-ci puisse plus facilement interagir avec les données (Riverscapes Consortium 2024h). Ce nouveau fichier XML définit un arbre de données hiérarchisé, déterminant comment ces dernières sont organisées et affichées dans les applications du R.C., ainsi que la symbologie associée à chacune d'entre elles (Riverscapes Consortium 2024h). Cette symbologie est définie pour chaque jeu de données dans des fichiers de style (.qml par exemple), qui sont liés aux données correspondantes grâce au fichier XML *business logic*, et ce via des clés indiquant le nom des fichiers de symbologie pour chaque couche. La visualisation des données est ainsi grandement facilitée, et accélérée.



2.2.4 La Waterfall

Ainsi, les standards du RC ont permis de développer les modèles sous la forme d'une cascade, ou « *waterfall* », les données produites par les uns étant par la suite utilisées par les autres comme visible sur la figure 7, grâce à la standardisation des modèles, des métadonnées, et des fichiers XML.

Figure 8 : Fonctionnement en cascade des modèles de grade production du Riverscapes Consortium, les flèches décrivant les données fournies à un modèle aval par un modèle amont, <https://www.riverscapes.net/>, 2024

2.2.5 RC Viewer, QRIS et Data Exchange : les Applications du Riverscapes Consortium

Le R.C. dispose de plusieurs applications en complément de ses modèles : le *Data Exchange*, QRIS, et de trois applications de visualisation, QViewer, ArcViewer, et Web Viewer. Ces trois dernières fonctionnent sur un principe relativement similaire, en utilisant les fichiers `project.rs.xml` spécifiques à un type de modèle, les business logics associées et les fichiers de style (i.e. symbologie) pour afficher les couches de manière pertinente (voir figure 8). Les deux premières sont des plugins destinés respectivement à QGIS et ArcGIS, et la troisième est disponible en ligne. Lorsque le *Riverscapes Viewer* est mentionné dans le texte de ce document, cela signifie que nous faisons référence à ces trois applications.

Le lien vers le site du Riverscapes Consortium, permettant d'accéder à toutes les applications et modèles, est en annexe 2.

Le *Data Exchange* que nous avons déjà rapidement évoqué est un portail en ligne où tous les projets rattachés au R.C. sont disponibles au téléchargement et visualisables via le Web Viewer. Les projets peuvent être recherchés par localisation géographique, par collections, par type de projet, par organisation contributrices,... Les gestionnaires peuvent également mettre en ligne leurs propres projets (voir annexe 3).

Ainsi, le R.C., en utilisant des modèles et données open source, standardisés et facilement accessibles, se donne pour objectif de permettre aux gestionnaires de grandement faciliter leurs processus de décision en leur permettant d'accéder rapidement et facilement aux données pertinentes. Tous les scripts, règles,... relatifs aux modèles et aux standards du RC sont publiquement disponibles dans un répertoire GitHub (voir annexe 4).

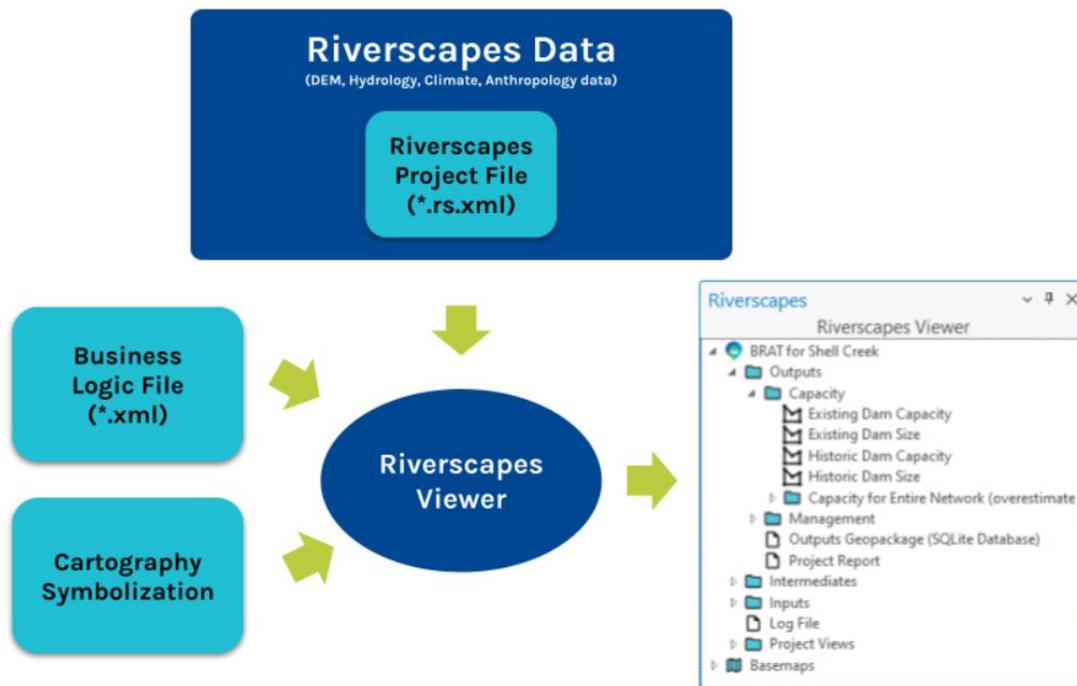


Figure 9 : Fonctionnement schématique du Riverscapes Viewer(Riverscapes Consortium 2024i)

2.3 Données utilisées aux Etats-Unis

Les données utilisées par les modèles du Riverscapes Consortium sont des données publiques et gratuites disponibles au minimum à l'échelle nationale, et ce afin de pouvoir appliquer les modèles sur l'ensemble d'un pays donné.

Cette partie a pour objectif de décrire les données utilisées par les modèles aux États-Unis, notamment les principales caractéristiques et attributs utilisés par les modèles, sans entrer dans de superflus détails. Cela permettra d'alimenter la réflexion quant à la constitution de la base de données française, qui sera abordée plus tard dans ce document, ainsi que l'adaptation des modèles au contexte français.

Certaines des données géospatiales utilisées par les modèles sont téléchargées à l'échelle des états, régions,... puis sont mosaïquées (pour les données au format raster) ou fusionnées (pour les données au format vecteur) afin de ne former qu'une seule couche par type de donnée, couvrant l'ensemble des Etats-Unis. Ces couches « nationales » sont regroupées dans un type de projet particulier, appelé National Project, et hébergé dans le cloud du RC, permettant ensuite aux modèles de les récupérer. Ces données ne sont que rarement mises à jour, retéléchargées et retraitées, et restent souvent statiques. En revanche, si les fournisseurs de données mettent à disposition un API fiable, alors les données ne sont pas téléchargées, et le modèle RC Context les récupère directement les données lors de son exécution, via un serveur FTP. Ce fonctionnement permet l'automatisation des modèles, que nous évoquerons par la suite.

Quasiment toutes les couches utilisées aux Etats-Unis utilisent le système géodésique North American Datum of 1983 (NAD 83) et le système de projection UTM ou d'Albers, et possèdent donc des coordonnées en degrés. Les données comportant une information altimétriques sont généralement basées sur le North American Vertical Datum of 1988 (NAVD 88), dont l'unité est le mètre. Les rasters sont tous au format TIFF, et les vecteurs tous au format Shapefile.

2.3.1 Données hydrologiques

2.3.1.1 National Hydrographic Dataset Plus High Resolution

Les données hydrologiques utilisées aux Etats-Unis par les modèles du RC sont issues d'un jeu de données géospatiales intitulé *NHDPlus High Resolution*, produit au 1:24 000 par l'*United States Geological Survey*, l'équivalent américain du BRGM français. Ce jeu de données se donne pour objectif de décrire en détail l'hydrographie du territoire étasunien, en regroupant divers jeu de données rasters ou vecteurs relatifs à cette thématique (Moore et al. 2019). Les couches suivantes sont extraites de ce jeu de données et utilisées par les modèles du RC :

- « *NHDFlowline* » est une couche de type polygones représentant le réseau hydrographique coulant (Moore et al. 2019)
- « *NHDWaterbody* », de type polygone, représente les plans d'eau (Moore et al. 2019)
- « *NHDFlowarea* » est également de type polygone, et représente l'emprise chenaux en eau à pleins bords, principalement pour les cours d'eau de grande taille (Moore et al. 2019)
- « *NHDPlusCatchment* » est une couche de type polygone décrivant les petits bassins versants (Moore et al. 2019)
- Une couche de polygones décrivant les bassins versants selon une classification hiérarchisée et standardisée que nous évoquerons dans un instant

La plupart de ces couches, pour les Etats-Unis continentaux, utilisent le système géodésique WGS84 (Moore et al. 2019).

Chaque entité des diverses couches et données géospatiales possède un identifiant unique composé de 14 chiffres. Ces identifiants sont recensés et organisés dans la base de données *NHDPlusID* (Moore et al. 2019).

Pour les entités de la couche « *NHDFlowlines* », un attribut décrivant la surface drainée par tronçon est déjà incrémenté dans la table attributaire par défaut. Il en va de même pour la valeur de pente moyenne en mètres par kilomètres par exemple (Moore et al. 2019).

NHD+ HR dispose également de tables attributaires séparées des tables des données géospatiales, précisant des attributs pour certaines entités comme les lignes d'écoulement. Cette table est nommée « *NHDPlusFlowlineVAA* », et est utilisée par les modèles du R.C. (Moore et al. 2019).

NHD+ HR possède un système de « *Feature Codes* » ou « *Fcodes* ». Ces derniers sont standardisés et homogénéisés pour tous les jeux de données NHD. Ils sont composés de cinq chiffres, et décrivent en détail la nature d'une entité, des stations de jaugeage aux rochers présents dans un chenal, en passant par un écoulement naturel pérenne. Les trois premiers chiffres indiquent le « *feature type* », ou « *Ftype* », et les deux derniers chiffres constituent le *Fcode* à proprement parler, apportant des précisions supplémentaires quant à la nature de l'objet. Par exemple, le *Ftype* 460 désigne les cours d'eau, et le *Fcode* 46003 les cours d'eau intermittents (Moore et al. 2019).

Un autre attribut largement utilisé par les modèles du RC est l'attribut « *LevelPathI* ». Au sein d'un réseau hydrographique coulant, chaque cours d'eau ou branche principale (ainsi que toutes les entités qui le constituent) se voit attribuer un identifiant unique, depuis sa source, jusqu'à son exutoire. Cet identifiant est constitué d'une séquence numérique correspondant à l'« *HydrologicSequence* » du tronçon situé le plus en aval du cours d'eau. Cette « *HydrologicSequence* » est un identifiant attribué à chaque tronçon d'un réseau hydrographique. Le tronçon le plus à l'aval de l'ensemble du réseau aura une valeur de 1, le tronçon situé directement à l'amont de ce premier aura une valeur de 2, et ainsi de suite jusqu'aux têtes de bassins versants. Par exemple, la rivière Ohio présente une *HydrologicSequence* de 48 pour son tronçon situé le plus en aval, le *LevelPathI* de la rivière Ohio est donc 48, et ce jusqu'à sa source (Moore et al. 2019). Les *LevelPathI* sont contenus dans la « *NHDPlusFlowlineVAA* ».

2.3.1.2 Les bassins versants

Aux Etats-Unis, les bassins versants, déterminés selon des critères topographiques et hydrologiques, font l'objet d'une classification hiérarchisée et standardisée réunie au sein d'un jeu de données, le *National Watershed Boundary Dataset* (Moore et al. 2019). Ainsi, chaque bassin versant possède un identifiant unique

dépendant de sa taille et de son importance. Six niveaux d'identifiants existent, hiérarchisés et emboîtés les uns dans les autres, et sont représentés sous la forme de polygones dans le jeu de données (K. A. Jones et al. 2022). Pour le niveau le plus élevé (à savoir les bassins versants régionaux), l'identifiant d'un bassin versant est composé de deux chiffres. Puis pour le niveau inférieur, deux autres chiffres sont ajoutés à ce même identifiant, et ainsi de suite, jusqu'aux identifiants à 12 chiffres représentant le plus petit niveau (K. A. Jones et al. 2022). Chaque bassin versant possède également divers attributs, comme la surface drainée, des informations concernant son emprise et sa position géographique, l'occupation du sol principale, son nom, ... (K. A. Jones et al. 2022)

Le Riverscapes Consortium utilise cette classification standardisée des bassins versants pour appliquer ses modèles sur le territoire américain. La plupart des modèles sont automatisés pour pouvoir fonctionner sur les bassins versants à 8 chiffres, produisant un projet pour chacun de ces bassins, qui peuvent ensuite être fusionnés si nécessaire.

2.3.1.3 National Streamflow Statistics

L'USGS produit des équations régressives permettant de prédire, avec plus ou moins de précision, les débits de crue (typiquement le débit de pic de crue de période de retour 2 ans) et d'étiages (en l'occurrence le débit dépassé 80% du temps sur le mois présentant les débits les plus faibles) pour les cours d'eau non jaugés d'une région donnée. Ces équations sont établies en transférant des données depuis des sites jaugés et en utilisant des paramètres climatiques et des caractéristiques des bassins versants comme variables explicatives ou prédictives (Ries et Atkins 2007). Ces paramètres varient selon les régions concernées (Ries et Atkins 2007). Ces équations sont ainsi importées dans le National Project américain.

2.3.2 Données topographiques

Les modèles du RC utilisent un Modèle Numérique de Terrain (MNT) pour de nombreuses analyses et productions de résultats. Aux États-Unis, ce MNT est produit par l'USGS et l'EROS Data Center, et est appelé le *National Elevation Dataset*. Ce jeu de données au format raster est mis à jour tous les deux mois, et est disponible à une résolution spatiale de 10 mètres maximum. Par endroits, la résolution spatiale est également disponible à 3 mètres (NED 3), mais pour des questions de cohérence, les modèles du RC utilisent uniquement le MNT de résolution 10 mètres (NED 10). Outre le territoire des États-Unis, ce MNT couvre une part significative du territoire canadien, et le Mexique dans son intégralité. Il utilise le système de projection UTM (USGS 2024a; 2024b).

2.3.3 Données anthropiques

2.3.3.1 Transports

Les modèles du R.C. font appel à des couches relatives aux réseaux de transport, à savoir une couche représentant le réseau routier, une autre représentant le réseau ferroviaire, et une dernière représentant les canaux artificiels.

Ces couches sont téléchargées depuis la base de données *National Transportation Dataset* de l'USGS. Cependant, ce dernier n'y apporte que des corrections mineures, et ces données sont des dérivés de la base de données *Census MAF/TIGER (Master Address File/Topologically Integrated Geographic Encoding and Referencing)*, mise à jour tous les ans par le *United States Census Bureau*. Les couches utilisées sont issues des données *TIGER/Line Shapefiles* décrivant les réseaux de transport, et sont projetées selon le système de projection *Global Coordinate System* basé sur le *North American Datum of 1983 (GCS NAD83)* (U.S Census Bureau 2023).

Le jeu de données *TIGER/Line Roads* à l'origine du réseau routier de la *National Transportation Dataset* de l'USGS regroupe de nombreuses classes de routes, telles que les routes primaires, secondaires, locales, rurales, les rues, les chemins empruntables par des véhicules, des vélos, des chevaux et des piétons, les rampes, les allées de service, les allées, les routes de parkings, les routes privées, ... (U.S Census Bureau 2023)

Les lignes de chemin de fer sont également issues de cette base de données, dans un shapefile intitulé *Railroads National shapefile*. Ce fichier regroupe toutes les lignes de chemins de fer, tels que les monorails, les lignes de tramway, les lignes de fret, les lignes de transport de voyageurs, ... (U.S Census Bureau 2023)

Les canaux quant à eux ont issus d'un shapefile de TIGER/Line intitulé *Linear Hydrography County-based shapefile* (U.S Census Bureau 2023).

2.3.3.2 Foncier

2.3.3.2.1 Régime de propriété

Aux Etats-Unis, le *Bureau of Land Management* (BLM) produit un jeu de données décrivant le régime de propriété ainsi que les organisations publiques responsables de la gestion des propriétés fédérales sur l'ensemble du territoire des Etats-Unis, sous la forme d'une couche vecteur de type polygone nommée *BLM National SMA Surface Management Agency Area Polygons*. Cette couche est constituée à partir d'informations issues de bases et jeux de données généralement présentes au niveau des états (BLM 2017).

2.3.3.2.2 Valeur foncière

Le RC utilise un jeu de données géospatiales représentant l'estimation et la prédiction de la valeur foncière du terrain en dollars américains par hectare. Cette couche est produite pour l'ensemble du territoire américain continental par le laboratoire PLACES de l'Université de Boston, à partir de données relatives au régime de propriété, aux registres de ventes, à l'emprise spatiale du bâti, à l'accessibilité, au relief, à l'occupation du sol, à l'hydrographie, au risque d'inondation, à la démographie,... et grâce à des arbres de décisions et des entraînements sur plus de 6 millions de parcelles sur le territoire étasunien (Nolte 2020). La couche résultante est au format raster, avec une résolution spatiale d'environ 500 mètres.

2.3.3.3 Frontières administratives et politiques

Des données géospatiales relatives aux frontières administratives et politiques sont également obtenues. Ces dernières sont fournies par le *United States Census Bureau*, et issues de la base de données *Cartographic Boundary Files*. Les polygones représentant les limites des Etats et des comtés en sont extraites.

2.3.4 Données climatiques

Plusieurs jeux de données climatiques au format raster sont rassemblés dans le *National Project* américain. Ils sont tous issus des jeux de données géospatiales climatiques produits pour l'emprise du territoire étasunien par le *PRISM Climate Group*, dépendant de l'Université de l'Oregon. Ce groupe produit de très nombreuses données et projets relatifs au climat, mais les jeux de données récupérés par le Riverscapes Consortium concernent les normales climatiques et sont au nombre de sept :

- Les précipitations moyennes annuelles en mm/an
- Les températures moyennes annuelles en degrés Celsius, dérivées du calcul de la moyenne des températures maximales et minimales
- Les températures minimales journalières moyennées sur trente ans en degrés Celsius
- Les températures maximales journalières moyennées sur trente ans en degrés Celsius
- Les températures moyennes journalières du point de rosée moyennées sur 30 ans en degrés Celsius
- Le déficit de pression de vapeur DPV minimal journalier moyenné sur trente ans en hPa
- Le déficit de pression de vapeur DPV maximal journalier moyenné sur trente ans en hPa

Toutes ces normales sont définies et moyennées sur la période 1991-2020, sont disponibles à une résolution spatiale d'environ 800 mètres, et modélisées à l'aide de MNT, de données issues de plus de dix-mille stations météorologiques et de CAI (*Climatologically-Aided Interpolation*), en tenant compte de l'altitude, de la proximité par rapport aux traits de côte, de l'orientation topographique, des courants atmosphériques, des effets orographiques,... (PRISM 2024; Daly et al. 2008).

2.3.5 Données relatives à la végétation et l'occupation du sol

Dix jeux de données relatifs à la végétation et à l'occupation du sol sont utilisés par les modèles du Riverscape Consortium. Ils sont tous fournis par le programme LANDFIRE (*Landscape Fire and Resource Management Planning Tools*), dont la mission est de créer des produits et bases de données géospatiales sur l'ensemble des Etats-Unis. Ce programme est un partenariat entre le programme *Wildland fire management* du *United States Department of Interior*, le *Forest Service* de l'*United States Department of Agriculture*, et l'ONG *The Nature Conservancy* (La Puma 2023).

Tous les jeux de données produits par Landfire le sont au format raster avec une résolution spatiale de 30 mètres, à partir de données échantillonnées sur le terrain, acquises par télédétection, et par des méthodes de modélisation écologiques (La Puma 2023). Ces données utilisent le système de projection d'Albers. Voici les jeux de données regroupés dans le National Dataset :

- Existing Vegetation Type (EVT) : Ce jeu de données décrit l'emprise spatiale actuelle des systèmes écologiques terrestres tels que classifiés par *NatureServe*, et définis comme des *"groups of biological communities that are found in similar physical environments and are influence by similar dynamic ecological processes, such as fire or flooding"*. Ce jeu de données comporte une catégorie « class », décrivant grossièrement le type de végétation rencontrée (forêt ouverte, forêt fermée, végétation arbustive,...), et une catégorie « name », qui, elle, indique le type de système écologique terrestre rencontré, dont le nombre est de plus de 800 aux Etats-Unis. Ce jeu de données est produit à l'aide de modèles d'arbres de décision, de données de terrain, d'imagerie Landsat, de données altimétriques,... Les classifications tiennent également compte de divers paramètres comme les écorégions, et atteignent donc un niveau de détail extrêmement poussé. Les espaces utilisés à des fins agricoles, urbanisés et imperméabilisés, en eau, sans végétation, ou englacés et enneigés sont masqués et non pris en compte (La Puma 2023).
- Existing Vegetation Height (EVH) : Ce jeu de données décrit la hauteur moyenne de la végétation dominante. Cette hauteur est déterminée par des modèles d'arbres de décision, utilisant des données de terrain, LiDAR, Landsat,... et de manière différenciée selon le type de végétation dominante (arborée, arbustive, herbacée). Les végétations de type arborée, arbustive, et herbacée possèdent trois plages de valeurs séparées (La Puma 2023).
- Existing vegetation Cover (EVC) : Ce jeu de donnée représente le pourcentage de couverture de la canopée vivante. Les végétations de type arborée, arbustive, et herbacée possèdent trois plages de valeurs séparées (La Puma 2023).
- Biophysical Settings (BPS) : Cette couche représente les systèmes de végétation modélisés tels qu'ils auraient pu dominer le paysage avant l'arrivée des colons européens aux Etats-Unis. En réalité, cette modélisation se base sur les environnements biophysiques actuels, et sur une modélisation approximative des régimes de perturbations du passé, pour créer une couche de la végétation potentielle. La classification utilisée reprend celle de la couche « Existing Vegetation », à savoir celle de *NatureServe* (La Puma 2023).
- Historic disturbance (HDist) : Comme les autres couches *LANDFIRE disturbance*, cette couche fournit des indications sur les changements spatiotemporels d'occupation du sol et paysagers. Plus précisément, elle représente les perturbations passées tels que les feux, les coupes rases, les maladies,... et ce sur un intervalle de 10 ans. Les scénarios de perturbations annuels sont confrontés aux données de végétation LF de la même année afin de vérifier d'éventuelles incohérences (La Puma 2023).
- Fuel Characteristics Classification System (FCCS) : Est définis comme un lit de combustible les « caractères physiques inhérents aux combustibles qui contribuent au comportement de feu et à ses effets ». Dans cette couche, les « lits de combustibles » représentent la structure et la composition des combustibles des espaces naturels (notamment à partir des espèces et communautés végétales présentes) et sont organisés en 6 couches appelées « strates », qui décrivent différentes caractéristiques des combustibles. Cette couche permet donc de prédire le comportement des feux, la couronne de feu potentielle, la quantité de combustible disponible, les effets des feux, et les émissions. La donnée est construite à partir de la littérature, d'avis d'experts, de photos, et d'autres bases de données relatives aux combustibles (La Puma 2023).
- Fuel Disturbance (FDist) : Ce jeu de données utilise les 10 dernières années des couches « Annual Disturbance » en y représentant l'année de la perturbation et son code de classe de perturbation, et ce afin de rendre compte des impacts des perturbations sur le combustible végétal disponible. Il s'agit également d'une amélioration de la couche *HDist* pour mieux rendre compte des scénarios de perturbations (La Puma 2023).
- Vegetation Departure (VDep) : Cette couche indique à quel degré la végétation actuelle est différente de celle modélisée dans la couche *BPS*. Elle est basée sur les changements de composition au sein

des communautés végétales, le stade de succession, et le degré de fermeture de la canopée (La Puma 2023).

- Vegetation Condition Class (VCC) : Il s'agit d'une reclassification et recatégorisation de la couche VDep, permettant d'estimer le degré de dégradation de la végétation, de très faible à très haut (La Puma 2023).
- Succession Classes (SClass) : Cette couche caractérise les conditions actuelles de la végétation, via la composition des communautés végétales, le taux de couverture, et la hauteur actuels, mis en regard de la couche modélisée BPS (La Puma 2023).

La plupart de ces jeux de données relatifs à la végétation sont essentiellement utilisés afin d'apporter du contexte sur les zones d'intérêt.

2.3.6 Données géologiques

Les données géologiques ne sont pas utilisées à l'heure actuelle par les modèles, et sont uniquement présentes pour apporter du contexte aux zones d'étude. Elles sont issues de la base de données géospatiales SGMC (*State Geological Map Compilation*) produite par l'USGS sur l'emprise du territoire des Etats-Unis d'Amérique. Cette base de données est issue de la compilation de 48 cartographies géologiques d'Etats à des échelles allant du 1:50.000 au 1:1.000.000, mais standardisées au niveau des données géologiques en tant que telles. Elles utilisent le système de projection d'Albers (Horton, San Juan, et Stoesser 2017).

2.3.7 Ecorégions

De la même manière, les données géospatiales liées aux écorégions servent avant tout à apporter du contexte. Elles sont produites par l'United States Environmental Protection Agency (EPA) au format vecteur et pour l'ensemble du continent nord-américain. Les écorégions sont définies comme des « *areas of general similarity in ecosystems and in the type, quality, and quantity of environmental resources* ». Ces données comportent quatre niveaux d'écorégions hiérarchisés, du niveau I (le moins détaillé avec 15 écorégions), au niveau IV (le plus détaillé avec un nombre très important d'écorégions), en passant par le niveau II (50 écorégions), et le niveau III (182 écorégions) (EPA 2013).

2.4 Les modèles

Le code source des modèles, pour rappel stocké dans un répertoire GitHub (voir annexe 4), est organisé de manière intuitive. A la racine du répertoire, un dossier *packages* regroupe des sous-dossiers portant le nom des différents modèles. Dans ces sous-dossiers sont contenus l'essentiel des scripts nécessaires à l'exécution de chacun des modèles. Il contiennent les éléments suivants :

- Un fichier *readme.md*, fournissant de la documentation concernant le modèle, tout comme un fichier de licence sont toujours présents.
- Un sous-dossier *.vscode* contenant un fichier *launch.json*, fichier très utile permettant de fournir les configurations nécessaires pour exécuter le modèle dans son environnement dédié, lui indiquant quels paramètres utiliser pour quelles fonctions, les arguments nécessaires ou optionnels pour l'exécution des divers scripts, où chercher les données, quel est le type de données utilisées, comment les lancer,...
- Un sous-dossier *docs* contient, comme son nom l'indique, de la documentation supplémentaire relative au modèle.
- Un sous-dossier portant de nouveau le nom du modèle. Celui-ci contient les scripts python principaux, constituant le modèle à proprement parler, dont le script principal nommé *NomUtil.py*

Un dossier *lib* est également présent à la racine du répertoire, et regroupe les librairies utilisées par les modèles du R.C.. La librairie *cybercastor* comporte les scripts nécessaires au fonctionnement de cet outil (et ne sera donc pas plus évoquée ici), et la librairie *commons* regroupe les scripts régulièrement appelés par les modèles afin de réaliser certaines opérations et/ou traitements géospatiaux. D'autres scripts utilisés notamment pour l'automatisation des modèles sont insérés dans un dossier *scripts* à la racine du répertoire.

Enfin, un dossier Workspaces regroupe un ensemble de fichiers *.code-workspaces*, un pour chaque modèle. Si les modèles sont exécutés localement, sur un ordinateur personnel par exemple, ces fichiers permettent aux modèles de l'être dans leur propre environnement, selon les configurations définies, et évitant ainsi les conflits avec d'autres scripts et environnements.

2.4.1 Riverscapes Context

Le premier outil de la cascade est le Riverscapes context, ou RC context. Il s'agit d'un outil permettant d'acquérir et d'organiser l'ensemble des couches géospatiales nécessaires aux autres modèles, mais également les couches nécessaires à la compréhension générale des corridors fluviaux (Riverscapes Consortium 2024e).

Il permet également de reprojeter l'ensemble des couches selon le même système de projection, de couper l'ensemble des jeux de données nationaux selon l'emprise spatiale du bassin versant du projet, et de les organiser dans un dossier de projet (un *Riverscapes Context project*) (Riverscapes Consortium 2024e). Ainsi, l'utilisateur des modèles n'a pas à rassembler l'ensemble des couches nécessaires, les découper selon sa zone d'intérêt, ni à appliquer quelconque géotraitement. C'est le seul type de projet qui ne comprend pas trois sous-dossiers *inputs*, *intermediates* et *outputs*, mais un sous-dossier par thématique de données (hydrographie, climat, transport,...).

Par ailleurs, l'outil produit des jeux de données issus de premiers géotraitements, qu'il sauvegarde dans un Geopackage intitulé *hydro_derivatives*. Les couches « *buffered_clip100m* » et « *buffered_clip500m* » sont issues de la mise en tampon de l'emprise spatiale du projet, c'est-à-dire du bassin versant considéré, respectivement de 100 et 500 mètres. La couche « *network_300m* » est issue de la segmentation de la couche représentant le réseau hydrographique en tronçons d'une longueur de 300 mètres maximum. Les entités de moins de 50 mètres avant segmentation sont conservées telles quelles, et la segmentation qui produirait des tronçons de moins de 50 mètres n'est pas opérée (ce qui peut entraîner la création de tronçons supérieurs à 300 mètres). La couche « *network_crossings* » est une couche ponctuelle, où un point est créé à chaque intersection entre les entités des couches représentant le réseau routier, de voie ferrée, ainsi que les limites de types de propriétés foncières, et les entités de la couche représentant le réseau hydrographique. Une couche linéaire intitulée « *ownership_lines* » est également créée par la même occasion, représentant les limites des entités polygonales des couches de la thématique transport et les limites de régimes de propriété foncières. La couche « *network_intersected* » est issue de la segmentation de la couche représentant le réseau hydrographique en fonction des entités des couches représentant les réseaux de transport et les limites de types propriétés foncières. La couche « *network_intersected_300m* » est le résultat d'une opération de segmentation opérée sur la couche *network_intersected*, de nouveaux selon les couches de transport et propriété foncière. Les couches polygones représentant les plans d'eau et les chenaux sont découpées selon la couche *NHDPlusCatchment*, tout en joignant aux nouvelles entités créées l'identifiant de l'entité de la couche *NHDPlusCatchment*. Enfin, une couche reprenant l'emprise spatiale du projet est produite et intitulée *processing_extent*.

2.4.2 Channel Area Tool

L'outil Channel Area Tool génère des polygones représentant, en théorie, le ou les chenaux actifs à plein bord au sein du bassin versant considéré. Pour ce faire, l'outil utilise la base de données *NHD HR+* pour mener ses analyses. Le projet comprend trois dossiers *inputs*, *intermediates*, *outputs*, contenant chacun un Geopackage du même nom.

Après la création du projet et des fichiers contenant les métadonnées, le modèle commence par filtrer les entités des couches *Waterbody* et *FlowArea* selon leur nature, contenue dans le champ *Fcodes* de ces données. L'outil supprime par exemple les entités correspondant à des surfaces englacées, les conduits busés,... créant les couches *filtered_waterbodies* et *filtered_flowareas*. Ces couches filtrées sont ensuite fusionnées pour n'obtenir qu'une seule couche de type polygones, *combined_fa_wb*. Toutes ces couches sont enregistrées dans les *intermediates* (Riverscapes Consortium 2024b).

Les entités de la couche *Flowline* passant par des polygones de cette couche nouvellement créée sont alors supprimées. L'outil effectue à nouveau son filtrage via les *Fcodes*. Les *Flowlines* dont les valeurs de *Fcode*

correspondent à 55800 sont supprimées, cette valeur signifiant que ce sont des « tronçons artificiels » passant par des entités polygonales représentant des plans d'eau ou des chenaux et servant à produire un réseau hydrographique coulant cohérent. Les canaux, fossés, aqueducs,... sont supprimés par la même occasion (Riverscapes Consortium 2024b).

Pour le reste du réseau hydrographique, n'étant pas représenté par des entités polygonales, une équation régressive est alors utilisée pour déterminer la largeur du chenal à plein bord en fonction de la surface drainée par chaque tronçon (cette même surface drainée étant un attribut déjà présent dans les données d'origine), et de la hauteur de précipitations moyennes sur le bassin versant. Cette équation a été calculée par T. Beechie et H. Imaki en 2014 dans le cadre de leurs travaux visant à créer des modèles permettant de prédire le style fluvial des cours d'eau au sein du bassin versant de la rivière Columbia aux Etats-Unis (T. Beechie et Imaki 2014). L'équation utilisée est la suivante :

$$w = 0.177(A^{0.397})(P^{0.453}) \quad (R^2 = 0.844, P < 0.001)$$

Où :

- w = largeur en mètres,
- A = Surface drainée en km^2 ,
- P = précipitations moyennes sur le bassin versant en mm/an .

Cette équation est donc appliquée pour chaque tronçon, afin de déterminer la largeur à pleins bords en mètres. Ce nouvel attribut intitulé *bankfull_m* est alors ajouté à la table attributaire pour chaque tronçon. Les entités ayant ces nouveaux attributs sont sauvegardées dans les intermédiaires, dans une couche nommée *bankfull_network*. Elles sont alors mises en tampons selon cette valeur, puis sauvegardées dans la couche *bankfull_polygons*. Les tampons ou parties de tampons qui se superposent avec des polygones de la couche *combined_fa_wb* sont alors supprimés, créant la couche *difference_polygons* (Riverscapes Consortium 2024b).

Puis, l'outil fusionne les entités de la couche *combined_fa_wb* avec celles de la couche *difference_polygons*, afin de n'obtenir qu'une seule classe d'entité et une seule couche représentant l'emprise spatiale des chenaux à plein bord du réseau hydrographique. Cette couche est nommée *channel_area*, et est enregistrée dans le Geopackage des *ouptuts*.

2.4.3 Terrain Analysis Using Digital Elevation Models (TauDEM)

TauDEM est un ensemble d'outils et de modèles permettant de mener des analyses topographiques à partir de MNT. Ces outils ont été développés par David Tarboton et son équipe à l'Université d'Etat de l'Utah, via le groupe de recherche en hydrologie. Cet ensemble de scripts et de modèles a donc été réuni en un seul outil, compatible avec les standards du R.C. et le grade de production.

Au sein de la *Waterfall*, TauDEM utilise des données d'entrée en provenance du Riverscape Context Tool, à savoir un MNT coupé aux limites de la zone d'étude, mais aussi des données en provenance du Channel Area Tool, à savoir la couche *channel_area*. Il est à noter que des couches similaires non produites par cet outil, et même une simple couche de lignes, peuvent être utilisées en entrée. Si besoin est, l'outil peut également utiliser une couche vectorielle de masque en entrée, utilisée pour masquer le MNT.

L'algorithme (ou plutôt l'ensemble d'algorithmes) produit en intermédiaires diverses couches relatives à la topographie, à savoir :

- *Pit-filled DEM (pitfill)* : Les dépressions topographiques du MNT en entrée sont comblées via un algorithme dédié, utilisant une approche d'inondation (David Tarboton 2015)
- *D-infinity flow direction raster (dinfflowdir_ang)* : Un raster de direction d'écoulement produit en appliquant l'algorithme *D-infinity Flow Directions* à la couche *pitfill*. La direction d'écoulement est donnée comme un angle en radian dans le sens inverse des aiguilles d'une montre par rapport à l'est (David Tarboton 2015)

- Une couche des chenaux à plein bord rasterisée (*rasterized_channel*) : La couche *channel_area* en entrée (ou son équivalent) est convertie en raster où les pixels des chenaux ont une valeur de 1, et les autres pixels une valeur de 0
- Une couche représentant le MNT masqué (*dem_masked*) : Le MNT masqué via la couche de type polygone optionnellement utilisée en entrée
- Un raster de pente où les valeurs de pentes égales à 0 sont reclassées (*dinfflowdir_slp_reclass*)

En sortie, le modèle produit d'autres couches topographiques supplémentaires :

- Un raster de pente D-infinity (en pourcentage) (*dinfflowdir_slp*) : Un raster de pente produit en appliquant l'algorithme *D-infinity Flow Directions* à la couche *pitfill*.
- *D-infinity contributing area raster (areadinf_sca)* : Un raster décrivant l'aire contributive spécifique en un point de la zone d'intérêt, en utilisant un raster de direction d'écoulement multiple (*dinfflowdir_ang*)
- *Topographic Wetness Index (twi)* : Un raster Topographic Wetness Index produit en utilisant l'algorithme dédié. Ce type de raster, produit en combinant l'aire contributive amont et la pente locale, est couramment utilisé afin de quantifier le contrôle topographique sur les processus hydrologiques, et notamment le degré d'humidité, les flux hyporhéiques et aquifères,... (Sørensen, Zinko, et Seibert 2006)
- *Height Above Nearest Drainage (hand)* : Dans ce raster, chaque valeur de pixel correspond à la hauteur de ce pixel par rapport au réseau de drainage le plus proche. Cette couche est produite via l'algorithme *D-infinity Distance Down*. Ce type de raster présente l'avantage de normaliser la topographie en fonction du réseau coulant, ce qui permet de mieux analyser les potentiels de drainage locaux et les milieux humides, puisque ce type de raster présente une forte corrélation entre ses valeurs les plus faibles et le degré d'humidité et l'importance des aquifères (Nobre et al. 2011).
- Il est également possible de produire un raster de pente D-8 en degrés en utilisant la bibliothèque GDAL (*gdal_slope*).

L'outil se base notamment sur la bibliothèque GDAL pour certaines de ses fonctions.

2.4.4 Valley Bottom Extraction Tool (VBET)

VBET est un modèle ayant comme objectif d'identifier le fond de vallée d'un corridor fluvial, et de le séparer en différentes unités géomorphologiques, à savoir les chenaux, la plaine d'inondation active, et celle inactive.

En entrée, ce modèle utilise le MNT découpé par le *Riverscape Context*, la couche de polygones produite par le *Channel Area Tool*, une couche linéaire décrivant le réseau hydrographique coulant, et trois données typiquement produites par TauDEM, à savoir un raster de pentes en degrés, un raster TWI (*Topographic Wetness Index*), et un raster HAND (*Height Above Nearest Drainage*) (Gilbert, Macfarlane, et Wheaton 2016). La couche *channel_area* est également rasterisée.

VBET est principalement basé sur une approche de pente et de seuils. Cela signifie que pour déterminer l'emprise spatiale du fond de vallée, VBET se base sur des seuils appliqués aux rasters en entrée selon la surface drainée d'un tronçon donné. En effet, le fond de vallée est généralement relativement plat, et bordé par des ruptures de pentes importantes au contact des versants. Les seuils de pente seront par exemple plus hauts pour de faibles surfaces drainées, et plus bas pour de larges surfaces drainées, puisque de manière générale, plus un cours d'eau possède une large surface drainée, plus il aura tendance à posséder un fond de vallée à faibles pentes longitudinales et latérales (Gilbert, Macfarlane, et Wheaton 2016). De la même manière, des valeurs élevées de HAND auront moins de chances de faire partie du fond de vallée pour les cours d'eau majeurs de plaine, que pour les petits chevelus en tête de bassin versant. Le modèle utilise donc un raster décrivant la surface drainée, qu'il subdivise selon des seuils prédéterminés. Pour chacun de ces seuils, des fonctions de transformation sont associées, et appliquées aux rasters en entrée (Gilbert, Macfarlane, et Wheaton 2016). Les nouveaux rasters alors obtenus constituent un ensemble de faisceaux d'indices, qui permettront de déterminer l'étendue spatiale du fond de vallée. Les résultats sont ensuite moyennés en multipliant les rasters transformés afin d'obtenir un raster de probabilité relative attribuant une

valeur comprise entre 0 et 1 à chaque pixel, 1 indiquant une très forte probabilité que ce pixel fasse partie du fond de vallée, et 0 une très faible probabilité (Gilbert, Macfarlane, et Wheaton 2016). Une fois ce raster obtenu, il est conservé dans le dossier des données de sortie du projet. L'outil utilise ensuite les *LevelPath* que nous avons évoqués précédemment. Ces identifiants uniques pour chaque chevelu du réseau hydrographique permettent à l'outil d'identifier les différents cours d'eau du bassin versant. VBET applique alors deux seuils au raster de probabilité, en exécutant une boucle sur l'espace considéré, un cours d'eau après l'autre, en commençant par le cours d'eau principal. Cela permet ainsi d'identifier clairement le fond de vallée appartenant à un cours d'eau donné et d'éviter que ces derniers ne se chevauchent, une entité polygonale par cours d'eau étant créée pour chaque couche de résultats (Gilbert, Macfarlane, et Wheaton 2016). Le premier seuil utilisé est défini à 0,85, permettant de délimiter le fond de vallée considéré comme bas (autrement dit la plaine d'inondation active), et le deuxième à 0,65, permettant de délimiter le fond de vallée élevé (Gilbert, Macfarlane, et Wheaton 2016). Techniquement, d'autres seuils peuvent être ajoutés si l'utilisateur le souhaite, pour identifier d'autres formes fluviales telles que les terrasses par exemple.

En plus du raster de probabilité, VBET produit diverses couches en sortie qu'il prend soin de polygoniser en amont. La couche *vbet_full* décrit l'emprise maximale du fond de vallée, telle qu'obtenue en appliquant le seuil maximal au raster de probabilité (0,65). La couche *floodplain* couvre la même emprise spatiale, mais sans les chenaux en eau. La couche *inactive_floodplain* décrit l'emprise de la surface comprise entre le seuil haut et le seuil bas appliqués au raster de probabilité (espace composé des pixels ayant une probabilité comprise entre 0,85 et 0,65 donc). La couche *active_valley_bottom* représente le fond de vallée bas (c'est-à-dire l'espace où les pixels ont une valeur de probabilité supérieure à 0,85), tandis que la couche *active_floodplain* représente le même espace mais sans les chenaux en eau. La figure 10 décrit la caractérisation de ces objets géographiques.

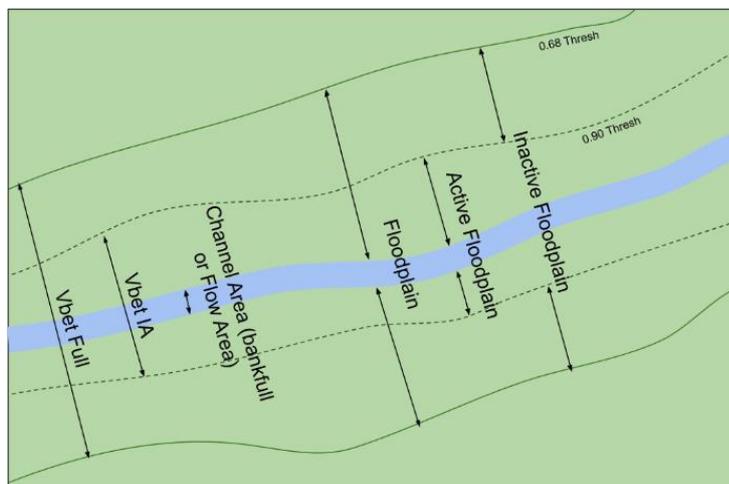


Figure 10 : Principaux objets géographiques caractérisés par VBET (Gilbert, Macfarlane, et Wheaton 2016)

Enfin, une couche intitulée *vbet_centerlines* est produite, représentant les entités linéaires passant par le centre de l'emprise spatiale de chaque fond de vallée de chaque cours d'eau.

A savoir que les limites des entités décrivant les différentes unités géomorphologiques n'ont pas été lissées après leur vectorisation, et que les limites des pixels sont donc encore visibles, afin de ne pas perdre en précision pour de simples objectifs esthétiques.

L'outil VBET procède également à une segmentation du corridor fluvial en Discrete Geographic Objects (DGO) et en Integrated Geographic Objects (IGO), permettant ainsi d'extraire des métriques décrivant la proportion de chaque unité géomorphologique au sein du DGO, la largeur de ces unités, les hectares de fonds de vallées ou de plaine alluviale par kilomètre,...

2.4.5 Anthropogenic context

Cet outil relativement simple combine les jeux de données géospatiaux anthropiques (routes, voies ferrées et canaux) et une classification de l'occupation du sol à la couche des chenaux à pleins bords et aux IGO et DGO de VBET, en joignant des valeurs d'attributs à leur table attributaire. Il permet donc d'extraire des

métriques liées aux pressions anthropiques, comme la distance aux infrastructures, l'intensité d'occupation du sol (basée sur une classification préalable),... Ces attributs sont ensuite notamment utilisés par BRAT ou RCAT(Riverscapes Consortium 2024a).

2.4.6 Beaver Restoration Assessment Tool

L'Université d'Etat de l'Utah a développé le Beaver Restoration Assessment Tool, qui se donne comme ambition d'estimer quantitativement la capacité des tronçons individuels à soutenir la présence de castors au sein d'un réseau hydrographique. Ce modèle tient compte notamment de la position des tronçons par rapport aux infrastructures humaines et aux occupations du sol les plus intensives et défavorables aux castors. Il est capable de modéliser :

- Les espaces à risques potentiels
- Les opportunités limitées ou inadaptées pour la construction de barrages
- Les opportunités de restauration et de conservation via les castors

Les principales données en entrée sont les jeux de données de végétation de LANDFIRE (Landfire 2.0 Existing Vegetation type EVT et Landfire 2.0 Biophysical Settings BPS), des équations de régression régionales issues de l'US Geological Survey et permettant de prédire les débits de crue (typiquement le débit de pic de crue de période retour 2 ans) et d'étiages (en l'occurrence le débit dépassé 80% du temps sur le mois présentant les débits les plus faibles) pour les cours d'eau d'une région donnée en traduisant la surface drainée en débits, un MNT, et une couche décrivant le réseau hydrographique.

Au total 7 faisceaux d'indices sont utilisés pour estimer la capacité d'un tronçon pour supporter des barrages :

- Une quantité suffisante d'eau (W. W. Macfarlane et al. 2017)
- Une végétation riveraine consommable par les castors, et utilisable pour leurs constructions(W. W. Macfarlane et al. 2017)
- Une végétation favorable dans un tampon de 100 mètres autour des tronçons pour assurer l'expansion des complexes des barrages et la croissance de la colonie(W. W. Macfarlane et al. 2017)
- Un gradient de pente ni trop fort ni trop faible. Une valeur de pente par tronçon est calculée en soustrayant à l'altitude moyenne d'un transect de 30 mètres à l'amont du dit tronçon, l'altitude moyenne d'un transect de 30 mètres à l'aval, puis en divisant le tout par la longueur en mètres du tronçon (W. W. Macfarlane et al. 2017)
- Une quantité d'eau considérée suffisante pendant les étiages afin d'assurer la viabilité de la population et des retenues (estimés via les équations hydrologiques régionales que nous avons déjà mentionnées)(W. W. Macfarlane et al. 2017)
- La probabilité qu'un barrage résiste aux crues récurrentes, typiquement de période retour deux ans. La valeur de pente calculée est associée aux débits, calculée par les équations de régression hydrologiques régionales, afin de calculer la puissance du cours d'eau sur ce tronçon, et donc sa capacité à détruire d'éventuels barrages lors des pics de crue. (W. W. Macfarlane et al. 2017)
- Une largeur de rivière pas trop importante, pour permettre la construction de barrages(W. W. Macfarlane et al. 2017)

La première étape de BRAT (ou techniquement la deuxième, si l'on considère que le Riverscapes Context constitue une première étape de traitement, et la troisième si l'on considère la création du projet) consiste à segmenter les polygones représentant le réseau hydrographique permanent et temporaire (mais pas intermittent) selon la longueur spécifiée (généralement 300 mètres, considérée comme une longueur adaptée par rapport à la résolution des données(W. W. Macfarlane et al. 2017)), avant de les copier dans une base de données SQLite, qui servira à stocker les informations et données nécessaires au modèle. Ces segments sont ensuite mis en tampon de 30 et 100 mètres, tampons utilisés pour intersecter d'autres couches dont les attributs (végétation, pente, surface drainée, propriété foncière,...) sont alors joints aux tronçons dans la table attributaire, et enregistrés dans de nouvelles couches vecteur, au format Geopackage. Ces couches forment les « intermédiaires ».

L'aptitude de la végétation à soutenir les besoins d'une population de castors est alors modélisée à partir des informations de répartition des types de végétation au sein des bandes tampons précédemment définies

autour des polygones du réseau hydrographique. L'outil se base ensuite sur une classification effectuée sur les jeux de données en entrée, où les types de végétation sont classés en catégories selon leur capacité à soutenir la présence de castors (favorisé, adapté, modérément adapté, à peine adapté, inadapté, comme visible sur la figure 11). Cette classification est basée sur la littérature disponible sur le sujet (W. W. Macfarlane et al. 2017). Il en va de même pour la largeur des tampons, qui correspond aux distances typiquement parcourues par les castors pour leur alimentation (30 et 100 mètres) (W. W. Macfarlane et al. 2017).

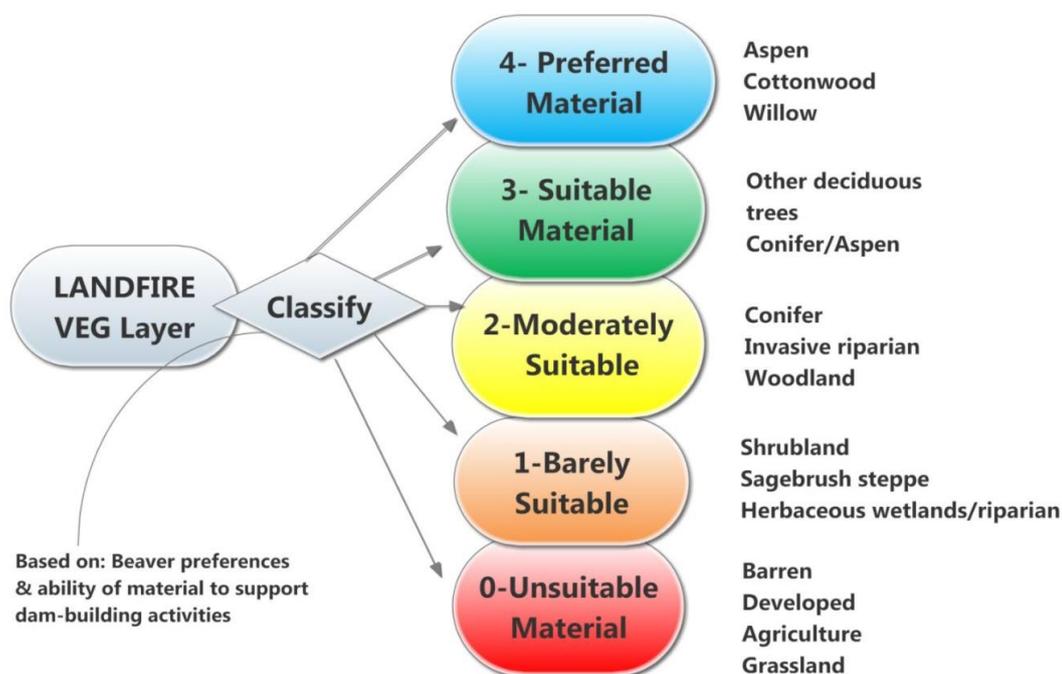


Figure 11 : Classification des types de végétation selon les préférences alimentaires de *C. canadensis* (Wheaton et al. 2019)

Ces paramètres peuvent être ajustés manuellement, mais ils ont été automatisés aux États-Unis. Les données en sortie produites sont stockées dans un fichier Geopackage. L'outil estime ainsi le nombre maximal de barrages par kilomètre de cours d'eau en fonction de la disponibilité en matériaux et en nourriture, et classe les cours d'eau en cinq catégories, de nul (0 barrage), à généralisé (plus de 15 barrages). Un modèle mathématique *Fuzzy Inference System* (FIS) est utilisé pour prendre en compte tous les faisceaux d'indices relatifs à la végétation et les réunir en un seul (W. W. Macfarlane et al. 2017).

Les équations hydrologiques régressives sont alors utilisées pour estimer les débits de crue, et, combinées à la pente, la puissance du cours d'eau sur un tronçon donné en watts par mètre. Un seuil de surface drainée ajusté localement pour correspondre à une largeur à plein bord d'environ 20 mètres est utilisé afin de déclasser les tronçons dont les débits et la largeur sont trop importants pour l'établissement de barrages viables. Dans ce cas, la valeur des tronçons est réglée à 0, soit très défavorable. Les débits d'étiage sont également modélisés et utilisés comme un critère de classification, tout comme les gradients de pente qui ne doivent être ni trop forts ni trop faibles. Pour chacun de ces paramètres, les tronçons sont catégorisés selon une typologie spécifique (cf. figure 12) (W. W. Macfarlane et al. 2017). Les sept faisceaux d'indices sont alors utilisés, via un modèle FIS, pour déterminer la capacité d'un tronçon à supporter la construction de barrages, les résultats étant donnés en densités de barrage par kilomètre. Certains paramètres sont éliminatoires, comme l'absence de végétation (W. W. Macfarlane et al. 2017).

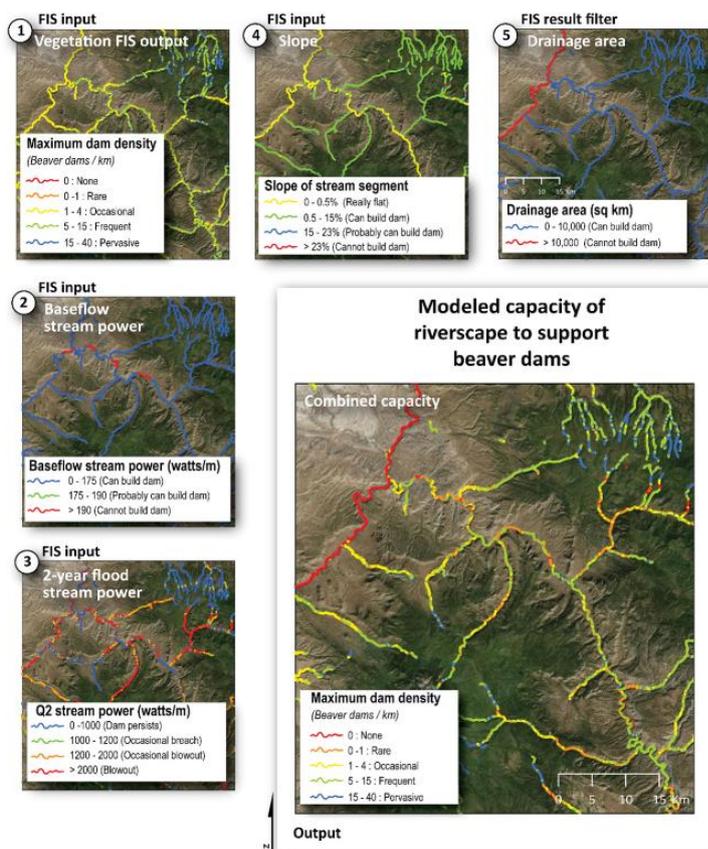


Figure 12 : Illustration méthodologique des données en entrée (1-5) et en sortie du modèle de capacité combinée du corridor fluvial à soutenir l'activité de construction de barrages de castors. Les résultats du modèle ont été exprimés en densité de barrages (barrages/km)(W. W. Macfarlane et al. 2017).

Après avoir produit ce premier jeu de données, BRAT utilise un autre modèle pour estimer les contraintes et les opportunités de la restauration par les castors. En effet, les castors constituent souvent une nuisance dans les environnements fortement anthropisés, abattant des arbres plantés, bouchant des conduits, inondant des terres publiques ou privées,... BRAT essaie donc d'évaluer ces externalités négatives(W. Macfarlane et al. 2020). L'outil utilise en entrée un jeu de données décrivant l'étendue spatiale du fond de vallée au sein du corridor fluvial (typiquement produit par VBET), les deux couches décrivant les routes et les chemins de fer, la couche de polygones des chenaux à plein bord, et une couche d'occupation des sols, issue de LANDFIRE aux Etats-Unis(W. Macfarlane et al. 2020).

Il produit alors un score d'intensité d'occupation du sol par tronçon (via une mise en tampon), calcule la distance des tronçons aux routes, canaux et aux voies ferrées situés au sein du fond de vallée, ainsi que la distance aux croisements entre réseaux de transports et réseau hydrographique. Les infrastructures sont classifiées selon les distances typiquement parcourables par les castors, immédiatement adjacentes, (moins de 30 mètres), dans un rayon normal de distance parcourue (30-100 mètres), dans un rayon de distance possiblement parcourue (100-300 mètres), et en dehors du domaine de préoccupation (plus de 300 mètres)(W. Macfarlane et al. 2020). Les données en sortie sont combinées afin d'attribuer un « score de risque » aux tronçons(W. Macfarlane et al. 2020).

Enfin lors d'une troisième étape, les données relatives aux risques et à la capacité des tronçons sont combinées pour obtenir des couches dites de « gestion », permettant d'estimer les potentialités de restauration et de conservation en fonction des résultats obtenus précédemment. Les trois couches obtenues décrivent 1) les opportunités limitées ou absentes pour la construction de barrages, 2) les espaces où les castors peuvent construire des barrages, mais qui peuvent être indésirables, et 3) les opportunités de restauration et de conservation possibles(W. Macfarlane et al. 2020). L'outil fournit également une classification hiérarchisée des potentiels de restauration et/ou conservation, du plus fort au moins fort.

2.4.7 Riparian condition assessment tool RCAT

Comme nous avons pu l'évoquer, la végétation riparienne joue un rôle essentiel au sein des corridors fluviaux. Cet outil se base sur trois faisceaux d'indices pour estimer l'état de la végétation riparienne :

- L'intensité de l'occupation du sol au sein du corridor fluvial (fournie par l'*Anthropogenic Context*)
- Le départ de la végétation riparienne en comparant les données de végétation actuelle (Landfire EVT) et les données de végétation modélisées biophysiquement (Landfire BPS)
- La connectivité à la plaine inondable. Cette dernière est estimée à l'aide d'un algorithme de direction d'écoulement D-8, qui vérifie pour chaque pixel si celui-ci est hydrologiquement connecté au réseau drainant, ou si l'écoulement est bloqué par une quelconque infrastructure.

Un peu à la manière de BRAT, ces trois données en entrée sont combinées via un modèle *Fuzzy Inference System* produisant un raster où les pixels possèdent une valeur de 0 (très mauvais état), à 1 (état intact). Différents attributs sont également joints aux tronçons hydrographiques, aux DGO, et IGO (type de changements de végétation et d'occupation du sol notamment).

L'outil produit également deux couches décrivant la végétation riparienne, en sélectionnant les types de végétation considérés comme ripariens aussi sein des couches EVT et BPS.

3. Analyse critique et réflexion quant à l'application des outils du Riverscapes Consortium sur le contexte français

3.1 Généralités

Comme cela a pu être montré dans la partie précédente, les modèles du R.C. essayent d'adopter une approche la plus holistique et interdisciplinaire possible.

L'objectif de ces modèles n'est clairement pas de mener des études précises et d'acquérir des résultats suffisants pour mettre en place tout un plan de gestion à l'échelle des tronçons, mais plutôt d'utiliser les données à large échelle en complément d'autres études pour permettre une première priorisation au sein des corridors fluviaux. L'idéal étant bien sûr de combiner des données à diverses échelles, et relatives à différentes thématiques, afin d'obtenir une caractérisation et une évaluation de l'état des corridors fluviaux plus holistique. (Glassic et al. 2024)

Par exemple, combiner des données relatives à la végétation riparienne, des données relatives au lit majeur et topographiques, des données hydrologiques,... peut permettre d'identifier des secteurs atypiques, soumis à de fortes dégradations, de formuler des hypothèses, de prioriser des études sur le terrain à l'échelle des tronçons, et donc la restauration (Glassic et al. 2024).

Le *Riverscapes Viewer* peut être considéré comme une potentielle solution au besoin de puissance de calcul importante nécessaire pour traiter, stocker et analyser des données spatiales haute résolution à de larges échelles, comme c'est souvent le cas avec les approches à l'échelle du riverscape (Glassic et al. 2024).

Ces modèles s'inscrivent dans le cadre de la notion de corridors fluviaux telle que nous l'avons décrite précédemment, avec pour objectif une compréhension plus globale des paysages fluviaux, de leur état de santé et de leur fonctionnement, une meilleure priorisation de la restauration, en utilisant des données géographiques décrivant des attributs physiques, biologiques et hydrologiques, à relativement fine résolution, à de larges échelles spatiales (voire éventuellement temporelles), et ce à moindre coût.

Cette utilisation de données publiques disponibles à de larges échelles intervient notamment en réponse au fait que de manière générale, les produits géospatiaux de ce type ont souvent été utilisés pour produire des résumés d'informations à l'échelle de bassins versants (pente moyenne, densité de drainage,...), servant notamment de contexte pour certaines études. Mais ces informations, en tant que telles, ne sont pas forcément très pertinentes pour permettre aux gestionnaires de caractériser en détail leurs terrains d'étude,

ni de prioriser et décider où implanter leurs actions, de conservation ou de restauration par exemple. Ainsi ces dernières ont souvent lieu sur des tronçons spécifiques de chenaux en faisant suite à des études très localisées demandant des moyens techniques, humains et financiers importants, alors que la nécessité d'inscrire ces actions de gestion dans une prise en compte de l'ensemble des réseaux hydrographiques est de plus en plus admise (Glassic et al. 2024). L'objectif est donc de permettre de développer des modèles utiles à la gestion, produisant des résultats à diverses échelles, permettant la caractérisation des hydrosystèmes, la priorisation des actions, le tout en se basant sur des données publiques et gratuites, disponibles de façon homogène au sein d'un pays.

3.2 Analyse outil par outil

3.2.1 Riverscapes Context

Comme nous l'avons rapidement abordé, l'outil Riverscapes Context joue un double rôle. Il fournit une contextualisation pour l'emprise spatiale du bassin versant considéré en utilisant diverses couches regroupées par thématiques, ce qui permet donc une contextualisation géographique globale de la zone d'intérêt. Il prépare également les données nécessaires aux autres outils de la *Waterfall*. Cet outil peut être utilisé n'importe où à partir du moment où des jeux de données géospatiaux sont disponibles au niveau national. Mis à part la production de quelques données dérivées de couches hydrographiques, ce modèle ne fait pas appel à des opérations complexes. Ainsi l'élaboration d'un tel projet pour un bassin versant français est facilement réalisable.

3.2.2 Channel Area Tool

Le modèle Channel Area Tool permet de caractériser l'emprise spatiale des chenaux à pleins bords, et est donc utilisé pour caractériser un objet géographique spécifique à l'échelle d'un réseau hydrographique dans son ensemble. Le modèle se donne comme objectif de fournir des résultats pertinents et à haute résolution à l'échelle des tronçons, mais aussi sur l'ensemble d'un ou de bassins versants, voire de régions (Riverscapes Consortium 2024f). En ce sens, ce modèle s'inscrit parfaitement dans le cadre conceptuel ayant mené à l'apparition du R.C. et caractérisé par le besoin de disposer de données à haute résolution, continues sur des ensembles de réseaux.

L'outil permet surtout de donner un ordre de grandeur de la largeur (tout du moins pour les tronçons ne possédant pas d'entités polygonales digitalisées représentant l'emprise spatiale de leurs chenaux), puisque basé sur une équation pour déterminer ladite largeur. Cette équation a été développée pour un travail de recherche spécifique, sur un bassin versant spécifique. Elle devra être adaptée pour pouvoir appliquer le modèle au contexte français. Mis à part cela, l'adaptation du modèle semble largement faisable au vu des données disponibles en France.

Au-delà de son importance pour la caractérisation de l'objet géographique que sont les chenaux à plein bord, l'outil permet surtout de fournir des données essentielles aux modèles suivants dans la *Waterfall*, à savoir TauDEM et VBET.

3.2.3 TauDEM

TauDEM est un ensemble d'algorithmes développés bien avant la création du R.C. Ce modèle a largement été utilisé au sein de la communauté scientifique pour permettre des analyses et modélisations hydrologiques à partir d'informations topographiques (Fan et al. 2014). Le modèle a donc été adapté aux standards du R.C. (fonctionnement en projets, *business logic*, fichiers XML,...), puis intégré à la *Waterfall*. Il fournit de nombreuses données essentielles pour les modèles suivants. Cependant, ces données produites peuvent également constituer un produit en soit, fournissant de nombreuses informations utiles pour la caractérisation d'un bassin versant, pour diverses analyses hydrologiques, et pouvant même servir de données en entrée pour d'autres modèles externes au R.C. (Riverscapes Consortium 2024j; 2024g; Fan et al. 2014).

Ainsi TauDEM est un modèle particulièrement intéressant à adapter et appliquer au contexte drômois en raison de sa facilité d'exécution une fois bien programmé pour fonctionner avec les données françaises, de la

richesse des données produites à partir d'un faible nombre de données en entrée, et du nombre d'applications possibles avec ces données.

3.2.4 VBET

L'objectif de VBET est d'identifier les fonds de vallée sur de grandes surfaces et à différentes échelles, depuis les petits bassins versants jusqu'aux régions entières, et de les séparer en unités géomorphologiques (chenal en eau, plaine d'inondation active, et inactive)(Gilbert, Macfarlane, et Wheaton 2016). Ainsi l'objectif principal de VBET est de caractériser les objets géographiques du corridor fluvial (en particulier le fond de vallée, mais également d'autres formes comme les terrasses). Plus globalement, VBET permet d'identifier l'espace faisant partie du corridor fluvial et l'espace situé en dehors de ce dernier, le fond de vallée étant généralement considéré comme l'étendue maximale de ce corridor.

Or, comme nous l'avons évoqué précédemment, le lit majeur où fond de vallée est le siège de très nombreux processus, joue un rôle majeur dans la bonne santé des hydrosystèmes et constitue l'étendue maximale du corridor fluvial. Ainsi, l'un des principaux enjeux de la restauration concerne la reconnexion des cours d'eau à leur lit majeur, au sein de la plaine alluviale, et l'estimation de « l'état de santé » d'un paysage fluvial passe par une bonne connaissance du degré de connexion entre les chenaux et leur plaine inondable, et l'emprise de cette dernière au sein du Valley bottom(Glassic et al. 2024). Comme nous l'avons évoqué, VBET produit également une segmentation des corridors fluviaux, représentés dans ce cas par l'emprise maximale du fond de vallée (seuil de probabilité à 0.65), et introduit diverses métriques associées. Ainsi, le modèle vise avant tout la caractérisation d'objets géographiques, mais il est également le premier des outils à véritablement introduire un travail de sectorisation et d'état des lieux via les métriques, qui permettra ensuite la priorisation des actions de gestion. Son application sur le bassin versant de la Drôme est donc tout particulièrement pertinente.

De plus, VBET a été développé en premier lieu pour combler un manque méthodologique concernant les outils capables d'identifier les fonds de vallée. En effet, la plupart des outils disponibles à l'époque de son développement offraient de très bons résultats à de fines échelles spatiales avec des jeux de données en entrée disposant de fines résolutions (typiquement utilisés pour des études de terrain sur quelques tronçons), ou alors des résultats à de larges échelles spatiales avec des MNT relativement grossiers. Les premiers ne pouvaient donc pas être utilisés à de larges échelles en raison de leurs besoins en puissance de calcul beaucoup trop importants, et les résultats des seconds étaient souvent considérés comme plutôt médiocres(Gilbert, Macfarlane, et Wheaton 2016). VBET a donc été conçu pour s'adapter à diverses résolutions de MNT disponibles à de larges échelles spatiales, en produisant des résultats qui soient significatifs à l'échelle des tronçons, tout en fonctionnant dans le cloud afin de se débarrasser des contraintes liées aux puissances de calcul nécessaires. Ainsi dès le début de son développement, VBET s'inscrit parfaitement dans la logique et le cadre conceptuel ayant donné naissance au R.C. (Gilbert, Macfarlane, et Wheaton 2016). De plus, si l'outil produit des données en sortie à l'échelle des bassins versants ou des régions, les paramètres sont définis à l'échelle des tronçons ou légèrement supérieure.

VBET présente également l'avantage de considérer certains grands principes géomorphologiques dans son fonctionnement, que beaucoup d'outils ignorent partiellement (Gilbert, Macfarlane, et Wheaton 2016):

- La largeur du fond de vallée dépend généralement de la surface drainée, plus cette dernière est importante, plus le fond de vallée sera large (en ignorant certaines variables de contrôle telles que la géologie, ou les différents paramètres biophysiques régionaux)
- Plus la surface drainée est importante, plus les pentes longitudinales et latérales auront tendance à être faibles
- Les fonds de vallées sont globalement des espaces relativement plats, bordés par des ruptures de pente

3.2.5 Anthropogenic Context

Cet outil est intéressant de par sa simplicité d'application, puisqu'il ne nécessite que trois couches d'entrée auxquelles il ne fait qu'ajouter des métriques. Cependant, il permet de dégager rapidement une vue d'ensemble des impacts et pressions anthropiques subies par les corridors fluviaux. Il permet donc aux

gestionnaires d'évaluer facilement les contraintes pouvant peser sur leurs opérations de gestion, ainsi que les opportunités, qu'elles soient liées à des actions de conservation (des corridors fluviaux très peu impactés) ou au contraire de restauration (des secteurs soumis à de fortes pressions).

3.2.6 BRAT

BRAT est le premier modèle de la Waterfall à être explicitement dédié à la restauration et à la priorisation des actions de gestion. Il se base sur trois modèles pour permettre une vision la plus holistique possible des possibilités de restauration. Le modèle est complet ; il prend en compte l'hydrologie, les pressions anthropiques, la géomorphologie fluviale,... Il propose une typologie des tronçons, notamment avec les couches dites de « gestion ». Ces dernières permettent de planifier la restauration et la conservation via les castors, d'estimer les conflits d'usages liés à ces derniers,... Par ailleurs, l'outil propose même une classification des potentiels de restauration et de conservation par tronçon, du plus haut potentiel au plus bas, et ce à l'échelle des bassins versants et des régions. L'outil est donc clairement conçu pour la planification. Le modèle s'inscrit dans la logique du R.C. de proposer des outils fonctionnant avec des données publiques disponibles aux échelles nationales afin de soutenir les gestionnaires dans leurs processus de prise de décision en leur fournissant des données précises à de larges échelles spatiales. Au-delà de cet aspect, cet outil a émergé d'un cadre conceptuel bien précis. Comme le déclarent les développeurs eux-mêmes, BRAT « dépeint une vision de ce que les bassins versants ont pu être par le passé, et ce qu'ils pourraient être si le castor pouvait revenir ». Une allusion claire est faite à un état de référence, avec pour objectif clair de s'en rapprocher le plus possible.

Il serait très intéressant d'appliquer l'outil sur le contexte français, à condition de l'adapter en profondeur aux jeux de données disponibles, notamment concernant la végétation. Un travail bibliographique est également nécessaire, notamment concernant les différences entre *C.fiber* et *C.canadensis* (alimentation, densités,...).

3.2.7 RCAT

Concernant RCAT, l'objectif d'atteindre un état de référence dénué de tout impact humain est encore plus évident que pour BRAT. La logique de l'outil s'articule autour de cet objectif. En effet, il se base sur la couche de la végétation potentielle, la considérant comme caractéristique de la végétation précolombienne, pour déterminer les changements de végétation et d'occupation du sol par rapport à l'époque moderne. L'objectif est donc en quelque sorte d'estimer l'ampleur des dégradations subies par la végétation, et notamment la végétation riparienne, notamment à des fins de conservation et priorisation. La végétation héritant de la meilleure classe dans les résultats de RCAT est même qualifiée d'« intacte », chose impossible.

Cependant en Europe, il n'existe pas, d'une part, de jeux de données similaires, et d'autre part, la végétation riparienne a été anthropiquement dégradée et impactée depuis des millénaires, au moins depuis les grands défrichements du Néolithique (Bravard et Petts 1996). Les corridors fluviaux européens sont des systèmes socio-écologiques où l'homme est pleinement intégré (Piégay et al. 2020). Il est même possible que derrière cela se cache des différences culturelles de rapport à la nature entre Européens et Américains, ces derniers ayant tendance à voir la nature comme quelque chose à préserver de toute influence humaine (cf. le concept de Wilderness et la naissance des parcs nationaux), parfois dans des espaces dédiés.

Au-delà de cet aspect, rares sont les jeux de données géospatiaux anciens donnant une indication sur la végétation et l'occupation du sol (à savoir les cartes d'Etat-Major du 19^e siècle numérisées et/ou vectorisées). Ceux qui existent décrivent un territoire où les pressions anthropiques sur les ripisylves et la végétation riparienne étaient en réalité bien plus importantes qu'aujourd'hui. Ainsi, la surface couverte par les ripisylves et la végétation riparienne a depuis largement augmenté en France, à la faveur de l'exode rural et de la déprise agricole notamment, aidées par la fin du Petit Age Glaciaire et la réduction des styles en tresses par exemple. Il est donc difficile, voire impossible, d'estimer l'ampleur de ces dégradations au vu de ce contexte particulier et des données disponibles.

3.3 Comparaison avec des modèles existants, différences architecturales et de constructions

Il existe plusieurs modèles permettant d'identifier le lit majeur ou Valley Bottom, et plusieurs techniques. Les deux principales techniques sont les suivantes :

- Les modèles de pente : ces derniers utilisent un seuil de pente appliqué à un MNT relatif afin de déterminer l'emprise spatiale du fond de vallée. VBET appartient partiellement à cette catégorie. L'un des principaux problèmes avec ce type d'approche est qu'elle est bien adaptée aux grands fonds de vallée de plaine, mais qu'elle tend à sous-estimer les fonds de vallées confinés et en tête de bassin versant, où les pentes longitudinales et latérales sont largement supérieures à celles des fonds de vallées plus grands et plus plats (Gilbert, Macfarlane, et Wheaton 2016).
- Les modèles d'inondation : ces derniers identifient le Valley Bottom en modélisant une profondeur d'eau spécifique ajoutée à un MNT relatif (c'est-à-dire un MNT où les valeurs altitudinales correspondent à la hauteur par rapport au chenal). Ces modèles tendent, quant à eux, à sous-estimer le fond de vallée à l'aval, et le surestime au niveau des têtes de bassin versant, puisqu'ils appliquent la même profondeur à toutes les parties du réseau hydrographique (Gilbert, Macfarlane, et Wheaton 2016).

Comme nous l'avons précédemment évoqué, VBET se distingue principalement par la production d'un raster de probabilité, où chaque pixel possède une probabilité donnée (de 0 à 1) de faire partie du fond de vallée, et par l'utilisation de divers paramètres adaptés en fonction de la surface drainée. Cette approche permet de remédier aux traditionnelles limites des modèles de pente et d'inondation.

La Fluvial Corridor Toolbox propose également un modèle permettant de délimiter l'emprise du fond de vallée. Cependant, son algorithme utilise une approche d'« inondation », qui présente de nombreuses limites comme nous l'avons vu. J. Gilbert et al. en 2016 ont comparé les résultats de la FCT et de leur outil VBET. Pour pallier à l'absence de seuils de profondeur appliqués en fonction de l'ordination des cours d'eau (ou de la surface drainée), ces derniers ont appliqués à plusieurs reprises le modèle sur leur site d'étude, une fois avec des paramètres jugés adaptés pour les têtes de bassin versant, et une autre fois avec des paramètres jugés adaptés pour les portions aval. Ils ont ensuite fusionné les résultats. Ces auteurs soulignent l'aspect chronophage de ce genre d'opération, et le besoin de traiter manuellement les données après exécution. Ils affirment donc que ce type de modèle est inadapté pour être utilisé à des échelles régionales (Gilbert, Macfarlane, et Wheaton 2016)

Cependant la Fluvial Corridor Toolbox présente plusieurs points communs avec la philosophie du R.C. Cette dernière, initialement développée comme un *plug-in* ArcGis, se donne comme objectif de caractériser longitudinalement les corridors fluviaux à diverses échelles spatiotemporelles (Roux et al. 2015). Plus précisément, son but est de pouvoir permettre à ses utilisateurs d'extraire des unités géomorphologiques des corridors fluviaux, à de larges échelles, à partir de données publiquement disponibles comme des MNT ou des couches vectorielles, et d'agrèger ces unités spatiales en objets géographiques segmentés permettant d'extraire des métriques. La FCT se base notamment sur l'utilisation d'UGO, de DGO et d'AGO, de manière semblable à ce qui a été décrit en introduction. Les premiers sont extraits puis désagrégés en DGO, puis agrégés en AGO selon les besoins et les questions auxquelles l'utilisateur souhaite répondre (Roux et al. 2015). La FCT dispose ainsi de plusieurs outils d'extraction, comme celui dédié au fond de vallée dont nous venons de parler, mais également d'autres utilisés pour extraire le réseau coulant, pour extraire les centerlines, ... (Roux et al. 2015)

A la suite de l'analyse présentée dans cette partie, il a été décidé d'appliquer au moins quatre des modèles sur le contexte drômois : le Riverscapes Context, Channel Area Tool, TauDEM, et VBET. Dans le même temps, une réflexion sera menée quant à l'application de RCAT, BRAT et de l'Anthropogenic Context, qui devrait permettre d'ouvrir la voie à la suite du projet, ce que nous aborderons en dernière partie.

4. Etude de cas et application sur le bassin versant de la Drôme

4.1 Site et contexte

Les premières tentatives visant à appliquer les modèles du RC sur le contexte français ont eu lieu sur le bassin versant de l'Arly, en Haute-Savoie. Cependant, il a été rapidement décidé d'appliquer les modèles sur le bassin versant drômois, dont la figure 13 constitue le carton de localisation, et présente le contexte hydrographique.

Carton de localisation du bassin versant de la Drôme et contexte hydrographique en 2024

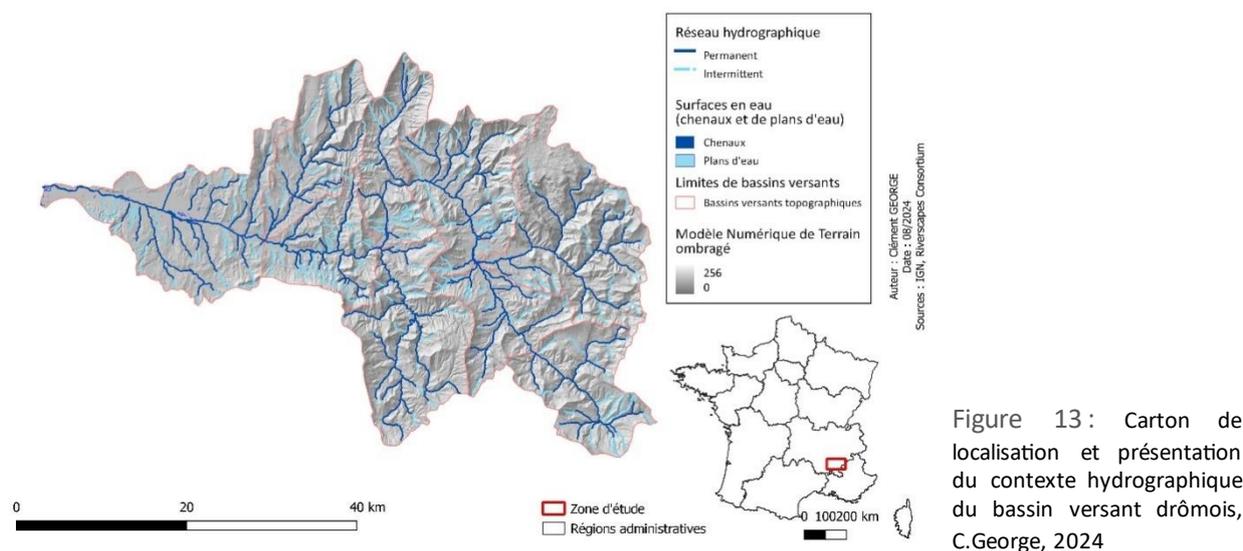


Figure 13: Carton de localisation et présentation du contexte hydrographique du bassin versant drômois, C.George, 2024

En effet, cette rivière a connu de profondes mutations en lien avec les grandes trajectoires socio-économiques de ces derniers siècles. Au 19^e et au 20^e siècle, la Drôme connaît de profonds changements géomorphologiques, notamment des changements de styles fluviaux et une incision généralisée.

La Drôme est une rivière dont le drain principal mesure environ 106 kilomètres, prenant sa source dans le Diois à 1 262 mètres d'altitude, puis confluant avec le Rhône en rive gauche. La rivière a, jusqu'au 20^e siècle, présenté un style fluvial majoritairement en tresse, dont des tronçons relictuels sont encore visibles, mais est aujourd'hui caractérisée par un style à méandres/vagabond dominant. La rivière, bien qu'endiguée sur 37% de son linéaire, n'est que très peu impactée par des ouvrages transversaux (Piégay et al. 2004). Son bassin versant s'inscrit dans des roches sédimentaires. Ses crues parfois violentes ont lieu au printemps et à l'automne (régime pluvio-nival) (Landon et Piégay 1994). Elle est un affluent subméditerranéen du Rhône, de rang intermédiaire.

Jusqu'au 20^e siècle, le bassin versant de la Drôme présente des densités de populations importantes, et la plupart des versants sont dévolus à l'agriculture ou au pastoralisme. Cependant, au tournant de la révolution industrielle, les campagnes françaises se vident, les populations étant attirées par les centres d'emplois des nouvelles industries alors que l'agriculture se modernise, laissant les petits exploitants non compétitifs à la marge. La mécanisation et l'intensification de l'agriculture, accompagnée de la déprise rurale, entraînent une déprise agricole, les versants peu productifs étant alors abandonnés à la végétation (Mazoyer et Roudart 2017). Dans le même temps, les corridors fluviaux drômois voient les pressions anthropiques, et notamment agricoles diminuées, ce qui favorise également l'installation de ripisylves (Piégay 1996). Parallèlement, un réchauffement du climat se fait sentir, marquant la fin du Petit Age Glaciaire, et favorisant donc la végétation. D'autant plus qu'à la fin du 19^e siècle sont promulguées les lois Restauration des Terrains de Montagne sont promulguées, afin de faire face aux importantes crues charriant de grands volumes de charge solide, et mettant en péril habitat et infrastructures humaines dans le bassin de la Drôme et du Rhône. Le génie végétal

est notamment utilisé, des périmètres à reforester sont délimités, et les populations locales sont expulsées. Ainsi la politique RTM a en quelque sorte devancé la déprise agro-pastorale, en reboisant volontairement les versants, expulsant les populations, et en concentrant l'agriculture dans les fonds de vallées. Ainsi, cette forte augmentation de la couverture végétale entraîne une diminution du coefficient de ruissellement (et donc des crues, tout particulièrement des crues morphogènes), et une diminution de la charge solide (Landon et Piégay 1994; Piégay et al. 2004). Ceci, combiné aux extractions massives de matériaux au sein de la bande active au 20^e siècle, et à l'endiguement de la partie aval de la rivière, entraîne une incision marquée sur la quasi-totalité du linéaire drômois, et une mutation depuis un style en tresses (caractérisé par une charge sédimentaire supérieure à ce que les débits liquides peuvent transporter), à un style vagabond, voire à méandre.

Au-delà de cet aspect, faisant du bassin de la Drôme un terrain d'étude particulièrement intéressant, le bassin de la Drôme est d'intérêt puisqu'il abrite une population de castors depuis relativement longue date, que de nombreux essais de restauration low-tech sont menés dans le bassin, et que ce dernier fait également l'objet de nombreuses études par les scientifiques et l'agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse.

4.2 Constitution de la base de données utilisée

4.2.1 Recherche des données et formation du « National Dataset ».

La première étape (et sensiblement la plus longue) de l'application des modèles du RC a été la constitution de la base de données utilisée pour faire fonctionner les modèles. Les couches d'informations géographiques utilisées devaient répondre à plusieurs critères que nous avons évoqués :

- Données publiques et gratuites
- Couvrant l'ensemble du territoire français, ou tout du moins la France métropolitaine Corse incluse
- Disponibles avec une résolution la plus fine possible (spatiale tout du moins, temporelle si possible)
- Dans des formats pris en charge par la bibliothèque GDAL et les outils SIG (Qgis et ArcGIS)
- Dans l'idéal utilisables telles quelles, sans géotraitements

Dans l'idéal, un gestionnaire doit pouvoir télécharger cette base de données pour sa zone d'intérêt et ne pas avoir besoin de récupérer davantage de données publiques de ce type.

L'objectif a été de se rapprocher le plus fidèlement possible des données utilisées par les modèles du RC, et rassemblées dans le « National Project » étasunien, tout en l'enrichissant avec les données françaises pertinentes n'ayant pas d'équivalent aux Etats-Unis.

Afin de faciliter cette étude de cas, et puisque les modèles seront exécutés localement via un éditeur de texte et environnement de développement intégré (VS Code), toutes les données seront téléchargées, même celles disposant d'un API pouvant théoriquement être appelées lors de l'exécution des modèles. Cependant, ces API pourront être utilisées si les versions françaises des modèles viennent à être officialisées, avec des types de projets français, et qu'elles sont automatisées sur le territoire français. La plupart des couches n'étant pas directement disponibles à l'échelle nationale, elles ont été téléchargées selon des emprises plus petites (régions si possible, départements autrement). Ces couches ont alors été manuellement fusionnées (vecteurs) ou mosaïquées (raster) pour obtenir une seule couche couvrant le territoire national.

Pour des raisons de facilité, toutes les couches disponibles ont été manuellement découpées selon l'emprise spatiale du territoire français métropolitain, Corse incluse, avec ses frontières actuelles mais sans les territoires ultra-marins. Cette emprise a été dérivée de la BD Topo de l'IGN.

Ces couches découpées ont ensuite été organisées et stockées manuellement dans un projet (i.e. un dossier) reprenant sensiblement l'architecture des projets produits par le modèle Riverscape Context, avec des sous-dossiers thématiques, l'emprise du projet national au format Geojson, et un fichier XML décrivant les métadonnées. Ce dossier, actuellement stocké dans le cloud du laboratoire ETAL de l'Université d'Etat de l'Utah, sera dans un futur proche hébergé dans le cloud du RC, où il prendra la forme d'un type de projet spécialement créé pour l'occasion, intitulé « French National Datasets ». Il sera ainsi accessible et téléchargeable par tous (mais il ne sera pas possible de visualiser les données, qui pèsent plusieurs centaines

de giga-octets, car elles sont trop volumineuses), et pourra être employé pour appliquer manuellement les modèles sur n'importe quel bassin versant français. Il pourra également être utilisé si l'automatisation de la version française des modèles vient à être développée, comme aux États-Unis.

Toutes les données de type vecteur sont au format Shapefile, et toutes les données raster au format TIFF. Toutes les couches ont été reprojetées, si elles ne l'étaient pas déjà, selon la projection conique conforme de Lambert93 (EPSG 2154), liée au système géodésique RGF 93, et ce pour éviter d'éventuelles erreurs de projection.

4.2.2 Données hydrologiques

Concernant les données relatives à l'hydrographie, le choix s'est porté sur le référentiel hydrographique français BD Topage, produit par l'IGN, l'OFB, les agences de l'eau, le secrétariat technique du Sandre, ainsi que d'autres organisations publiques. Ce référentiel se donne pour objectif de décrire toutes les entités hydrographiques présentes sur l'emprise spatiale du territoire français (IGN, OFB, et Sandre 2020; Sandre 2023). Il vient en remplacement, à partir de 2020, de l'ancien référentiel à moyenne échelle BD Carthage afin d'établir un référentiel hydrographique à l'échelle métrique plus exhaustif, conforme à la directive INSPIRE, et compatible avec le référentiel à grande échelle de l'IGN, le RGE, et notamment le thème hydrographique de la BD TOPO (IGN, OFB, et Sandre 2020; Sandre 2023).

De ce référentiel ont été extraits :

- les bassins versants topographiques
- les bassins hydrographiques, eux-mêmes issus de la fusion des bassins versants topographiques et correspondant approximativement aux grands bassins des agences de l'eau (IGN, OFB, et Sandre 2020)
- les surfaces élémentaires, polygones représentant une étendue d'eau continentale de surface (plans d'eau ou cours d'eau de largeur supérieure à 5,5 mètres) d'origine naturelle ou anthropique, et donc équivalents des couches *Waterbodies* et *Flowareas* de NHD
- les tronçons hydrographiques, équivalents des *Flowlines* de NHD, représentant l'axe des lits des cours d'eau ou des canaux, homogènes quant à leurs attributs et leurs liens. Tous les cours d'eau permanents ou temporaires, naturels ou artificiels sont inclus, à l'exception des tronçons temporaires naturels de moins de 200 mètres aux extrémités amont du réseau, des fossés de moins de deux mètres de large, des tronçons artificiels longeant les voies de communication, des tronçons souterrains ou busés de moins de 25 mètres (Sandre 2023; IGN 2024). Des attributs sont spécifiés dans la table attributaire de la couche, notamment leur nature (écoulements naturels, canaux, conduits busés,...), leur persistance (pérenne, intermittents, éphémères,...), leur position par rapport au sol, la salinité, la navigabilité,... (Sandre 2023; IGN 2024). Tous les tronçons représentant des cours d'eau d'une largeur supérieure à 5 mètres, qui sont donc modélisés dans la couche Surfaces Élémentaires, ou passant par un élément pérenne de la couche surface élémentaire, comportent un attribut « TronconFic » = « 1 », l'équivalent de l'attribut « *Artificial path* » de la couche *Flowlines* NHD (Sandre 2023; IGN 2024)

L'un des problèmes principaux posés lors de la réflexion quant à l'usage de ces données pour l'application des modèles sur le contexte français a concerné l'équivalent des *Levelpath* américains, ces identifiants uniques à chaque cours d'eau aux États-Unis. En effet, la BD Topage dispose d'une couche cours d'eau, constituée d'entités d'un seul tenant (de leur source à l'exutoire) décrivant les entités hydrographiques linéaires uniquement. Les tronçons hydrographiques, qui sont contenus dans une autre couche, sont des entités constitutives des cours d'eau (un cours d'eau étant potentiellement constitué de nombreux tronçons hydrographiques), mais en sont différenciés puisqu'ils traversent également des entités surfaciques, les surfaces élémentaires, et sont de longueur largement inférieure (Sandre 2023). De plus, les tronçons hydrographiques sont largement plus exhaustifs que les cours d'eau, décrivant des cours d'eau de rang très élémentaire, paradoxalement absents de la couche « cours d'eau ». Pour ces raisons, les tronçons hydrographiques sont de bien meilleurs équivalents aux *Flowlines* de NHD que les cours d'eau. Cependant, les tronçons hydrographiques sont dépourvus de code qui permettrait d'identifier le cheveu du réseau hydrographique auquel ils appartiennent, de sa source à son exutoire. Or, cela est indispensable pour

l'exécution du modèle VBET. Cependant, les tronçons constitutifs des entités hydrographiques de type cours d'eau possèdent un code renvoyant à cette même entité hydrographique (Sandre 2023). Il a donc été décidé de créer une nouvelle couche, uniquement pour l'application de la présente étude de cas, en sélectionnant et exportant dans un nouveau jeu de données uniquement ces tronçons, bien que cette nouvelle couche ne soit ainsi qu'une version très simplifiée du réseau hydrographique décrit par la couche des tronçons hydrographiques complète.

Concernant les bassins versants, BD Topage ne fournit pas de système hiérarchisé et classifié comme aux Etats-Unis. Nous nous baserons donc sur l'échelle des bassins versants topographiques fournis par le référentiel, dont la taille moyenne correspond de toute manière grossièrement aux bassins versants à 8 chiffres utilisés pour automatiser les modèles aux Etats-Unis.

En plus de ces couches essentielles à l'exécution des outils du RC, il a été décidé d'ajouter des couches supplémentaires au projet national français. Ces couches permettront d'une part, d'ajouter du contexte, et d'autre part, d'enrichir les modèles si le projet vient à être poursuivi. Elles sont au nombre de quatre :

- Contextes piscicoles : Ce sont des composantes du réseau hydrographique délimitées par un critère biologique. Ce sont les unités spatiales dans lesquelles une population de poissons est considérée comme fonctionnant de façon autonome. Trois types de peuplements sont identifiés : Salmonicoles, intermédiaires, et Cyprinicoles (Sandre 2014). Cette couche est fournie par le Sandre
- Masses d'eau de Surface : Définies comme « *une partie distincte et significative des eaux de surface telle qu'un lac, un réservoir, une rivière, un fleuve ou un canal, une partie de rivière, de fleuve ou de canal, une eau de transition ou une portion d'eaux côtières, constituant le découpage élémentaire des milieux aquatiques destinée à être l'unité d'évaluation de la DCE* » (Sandre 2014). Cette couche est fournie par le Sandre.
- Référentiel des Obstacles à l'écoulement, que nous évoquerons par la suite
- Syrah-ce, que nous évoquerons par la suite

Toutes les données présentées ici sont au format vecteur.

4.2.3 Topographie

L'Institut national de l'Information Géographique et Forestière (IGN) est en charge de l'élaboration du RGE, le Référentiel Géographique à Grande Echelle, de précision métrique, constituant une base de données géospatiales intégrant des données de l'IGN et d'autres producteurs (IGN 2018c). Le RGE Alti est un (ou plutôt des) MNT, venant en remplacement de la BD Alti, et disponible pour l'ensemble du territoire français sous forme de dalles de 5x5 kilomètres (IGN 2018c). Bien que disponible à une résolution spatiale de 1 mètre, le RGE Alti 5 mètres sera ici utilisé, afin de faciliter le mosaïquage de la couche sur l'ensemble du territoire et de réduire son poids.

Bien que généralement plutôt précis, le RGE présente parfois des inconsistances concernant l'exactitude altimétrique. Les données altimétriques des zones sensibles telles que les zones inondables ou littorales sont acquises par technologie LiDAR, dont l'exactitude altimétrique est comprise entre 0,2 et 0,5 mètre. La technologie Radar est déployée pour les zones de montagne, avec une exactitude altimétrique de l'ordre de 7 mètres pour les secteurs à fortes pentes. Pour le reste du territoire, des techniques de corrélation de photographies aériennes sont utilisées, avec une précision altimétrique de l'ordre de 0,5 à 0,7 mètre. Les éventuelles lacunes sont alors comblées par des données altimétriques anciennes (IGN 2018c).

4.2.4 Végétation et occupation du sol

Concernant la végétation et l'occupation du sol, 14 jeux de données ont été regroupés au sein du projet national français. Les jeux de données français comportent une information très largement lacunaire concernant la végétation existante, en comparaison des jeux de données américains. En France, la plupart des données géospatiales contenant des informations sur la végétation existante sont en réalité des jeux de données d'occupation du sol plus généralistes, et ne présentent donc pas un niveau de détail important. Ainsi, obtenir des données concernant cette thématique a été compliqué, et nous avons dû détourner certains jeux de données concernant l'agriculture et la foresterie (RPG et BD Forêt de l'IGN par exemple), et regrouper le

maximum de données possibles, afin d'obtenir un niveau de détail acceptable. Les jeux de données regroupés sont les suivants :

- *BD Forêt V2.0* : Cette base de données est le référentiel géographique de description des espèces forestières. Elle décrit les formations végétales forestières (dont la définition répond à celle fournie par la FAO) et naturelles de plus de 0,5 hectare, fournissant des indications quant à la densité, la composition du peuplement, et l'essence dominante, via 32 classes(IGN 2018a). Les formations herbacées (principalement les pelouses), les landes, peupleraies, forêts ouvertes et fermées sont décrites(IGN 2018a). Cette couche étant notamment destinée à la filière forestière, elle est loin d'être exhaustive et les essences décrites ont souvent un intérêt économique et sylvicole. Ce jeu de données au format vecteur est produit par l'IGN, et est conçu de manière similaire aux produits du RGE afin d'être compatible(IGN 2018a).
- *BD TOPO* : La BD TOPO est une base de données faisant partie du RGE, comportant de nombreuses couches vectorielles regroupées thématiquement, et ayant pour objectif la modélisation 3D du territoire français et de ses infrastructures(IGN 2024). L'une des thématiques de la BD TOPO concerne l'occupation du sol, où l'on retrouve une couche intitulée « Zone de végétation ». En plus des peupleraies, des forêts ouvertes ou fermées, et des landes de plus de 0,5 hectares (qui sont donc communes avec la BD Forêt bien que largement moins détaillées), cette couche dispose d'entités décrivant les haies de plus de 25 mètres, les bois (zones arborées) de plus de 0,005 hectares et moins de 0,5 hectares (seuil à partir duquel ils sont considérés comme des forêts), les vignes de plus de 0,2 hectares, et les vergers de plus de 0,5 hectares(IGN 2018b; 2024).
- *Registre Parcellaire Graphique* : Ce jeu de données géospatiales vectoriel fournit des informations quant à la nature des parcelles agricoles sur la base des déclarations des agriculteurs exploitants ayant demandé des aides de la Politique Agricole Commune. Il est géré par l'Agence de Services et de Paiements responsable du paiement de ces aides. Chaque parcelle dispose de plusieurs attributs, notamment un code culture (310 classes), et un code groupe (24 groupes)(IGN 2023b).
- *BD CARTO Etat-Major* : Cette base de données vectorielle produite par l'IGN décrit l'occupation du sol au XIX^e siècle sur l'ensemble du territoire métropolitain à partir de la vectorisation des cartes numérisées de l'Etat-Major de la même période. Elle regroupe un total de 10 couches thématiques (hydrologie, routes, bâti, entités administratives, couverture du sol ancienne, forêts,...), et décrit des entités linéaires et surfaciques(IGN 2023a). L'occupation du sol ancienne est décrite via 86 classes. Ces informations sont particulièrement utiles pour les modèles, comme nous le développerons plus tard. La principale limite de cette base de données réside dans son manque d'uniformisation à l'échelle nationale, même si elle s'enrichit en permanence. Certains départements sont ainsi complètement couverts, tandis que d'autres ne disposent que d'une couche décrivant l'emprise spatiale des forêts par exemple(IGN 2023a).
- *OSO* : Le produit OSO est un raster produit par le groupe d'experts « Occupation des sols », réunissant des équipes de Cesbio, de l'UMR Ispa, de Dynafor, du CNRM, de l'UMR Tetis, de IGN-Matis, de Costel, et du Sertit, pour le pôle de données et services relatifs aux surfaces continentales Theia, dépendant de l'Infrastructure de Recherche Data Terra. Ce groupe d'experts développe des algorithmes (disponibles publiquement et gratuitement) permettant de mener des classifications des occupations du sol à partir d'images satellitaires(Inglada et al. 2017). Pour la production du produit OSO, des images de Sentinel-2 sont utilisées, en complément d'informations géospatiales extraites des bases de données du RPG, de la BD TOPO et de Corine Land Cover pour plus de précision. En comparaison d'autres jeux de données relatifs à l'occupation du sol disponibles en France et en Europe, OSO présente l'avantage d'être mis à jour tous les ans, de disposer d'une résolution spatiale de 10 mètres, de 23 classes d'occupation du sol différentes, et globalement d'être de grande qualité(Inglada et al. 2017).
- *Corine Land Cover Riparian Zones* : Produit par *Copernicus Land Monitoring Service*, un service du programme Copernicus de l'Union Européenne dédié à la production de données relatives à l'occupation du sol, ce jeu de données vectoriel fait partie du *Priority Area Monitoring*, visant à produire des informations précises et détaillées concernant l'occupation et la couverture du sol pour certains espaces à enjeux, en complément des jeux de données plus généralistes produits par Copernicus(Copernicus Land Monitoring Service 2023). Ainsi *CLC Riparian* fournit une classification

détaillée et métrique (56 classes) de l'occupation et de l'usage des sols dans des zones tampons de certains cours d'eau européens sélectionnés, typiquement les cours d'eau de rang de Strahler 2 à 9 (Copernicus Land Monitoring Service 2023). Cependant une très large part du réseau hydrographique n'est pas incluse. Le jeu de données Corine Land Cover classique n'a pas été inclus, puisque jugé comme n'ayant pas une résolution spatiale et une précision suffisante pour les modèles, et n'étant pas assez exhaustif.

- High Resolution Layer Dominant Leaf Type (DLT) : Egalement produit par Copernicus Land Monitoring Service, ce jeu de données au format raster fait partie de la base de données High Resolution Layers Forest, et décrit le type de végétation arborée dominant (feuillus ou conifères) en 2018 pour le territoire de l'Union Européenne, avec une résolution spatiale de 10 mètres. Ces données sont issues de méthodes de télédétections appliquées à des orthophotographies et images satellitaires (Copernicus Land Monitoring Service 2021a).
- HRL Tree Cover Density (TCD) : Ce jeu de données au format raster fait également partie de la base de données HRL Forest de Copernicus. Il décrit le pourcentage de l'espace couvert par la canopée de la végétation arborée par pixel, avec une résolution spatiale de 10 mètres (Copernicus Land Monitoring Service 2021a). Les données de la base de données HRL Forest sont dans l'immédiat uniquement utilisées pour apporter du contexte, mais leur utilisation à l'avenir dans d'autres modèles que RS Context n'est pas exclue.
- HRL Imperviousness : Les données HRL Imperviousness de Copernicus Land Monitoring Service décrivent le degré d'imperméabilisation des sols par des infrastructures et constructions humaines en pourcentage de chaque pixel, avec résolution spatiale de 10 mètres. Seules les structures anthropiques sont considérées (Copernicus Land Monitoring Service 2018).
- HRL Grasslands (GRA), HRL Small Woody Features (SWF) : Ces deux jeux de données au format raster produits par Copernicus Land Monitoring Service décrivent respectivement l'emprise spatiale des formations herbacées et arbustives (incluant les alignements d'arbres et autres formations arbustives linéaires ou surfaciques) pour le territoire de l'Union Européenne, avec une résolution spatiale de respectivement 10 et 5 mètres (Copernicus Land Monitoring Service 2020; 2021b).
- Global Forest Canopy Height et Global Forest Change de GLAD : Ces jeux de données au format raster sont produits à l'échelle globale par le laboratoire Global Land Analysis and Discovery de l'Université de Maryland. Le premier est relatif à la hauteur de la canopée des espaces couverts par la végétation arborée, et a été produit en 2019 à partir de données issues du capteur LiDAR GEDI embarqué à bord de la Station Spatiale Internationale, spécialement conçu pour mesurer la structure de la végétation, de données Landsat-8, et de données LiDAR de terrain, utilisées notamment pour la calibration des modèles (Potapov et al. 2021). Sa résolution spatiale est de 30 mètres, et la hauteur de la canopée est donnée en mètres. Le deuxième jeu de données est également produit par le même laboratoire, et décrit les changements dans la structure forestière via trois classes (gains, pertes, et couverture forestière stable) entre 2000 et 2023. Sa résolution spatiale est également de 30 mètres (Hansen et al. 2013).
- Fuel Map Effis : Ce jeu de données géospatiales est produit par l'European Forest Fire Information System. Cette cartographie reprend les 13 catégories du NFFL ou modèles de comportement du feu d'Anderson permettant de classer 13 types de combustibles (Anderson 1982). Sa résolution spatiale est de 250 mètres (European Forest Fire Information System (EFFIS) 2017).

4.2.5 Transports

Les couches relatives aux transports ont été en majorité extraites de la BD TOPO, la thématique de cette base de données étant relativement complète. Les couches vectorielles suivantes ont été regroupées dans le projet national :

- **Aérodromes** : L'IGN définit comme aérodrome « *Tout terrain ou plan d'eau spécialement aménagé pour l'atterrissage, le décollage et les manœuvres des aéronefs y compris les installations annexes qu'il peut comporter pour les besoins du trafic et le service des aéronefs* » (IGN 2024). Ces objets sont représentés par des entités surfaciques. Plusieurs attributs liés à la nature, l'usage, l'altitude, l'importance, ... des aérodromes sont contenus dans la table attributaire (IGN 2024).

- Equipements de transports : Ces objets sont définis comme « *Équipement, construction ou aménagement relatif à un réseau de transport terrestre, maritime ou aérien* »(IGN 2024). Ce sont notamment des gares, aire de repos, parkings, péages, stations de transports en commun,...(IGN 2024)
- tronçons de routes : ce sont des « *Portions de voies de communication destinées aux automobiles, aux piétons, aux cycles ou aux animaux, homogènes pour l'ensemble des attributs et des relations qui les concernent* »(IGN 2024). Cette définition inclut également les routes privées, et non revêtues. Pour les routes à chaussées séparées, une polyligne par chaussée est modélisée, suivant son axe. Des axes fictifs peuvent être modélisés, pour les parkings, péages, grands carrefours,...(IGN 2024)
- tronçons de voies ferrées : Toute portion de voie ferrée considérée comme homogène pour l'ensemble de ses attributs est modélisée par des tronçons de voies ferrées. Seules les voies ferrées des parcs d'attraction, les aires de triage et les rails supprimés sur le terrain ne sont pas incluses(IGN 2024).

Une couche « canal » au format shapefile similaire à celle utilisée aux Etats-Unis a été créée à partir de la couche tronçons hydrographiques de la BD Topage, via une requête attributaire effectuée sur le champ « NatureTH » de la couche, permettant de sélectionner et d'exporter les tronçons dont la valeur de ce champ correspond à « Canal ». Une opération similaire a été menée sur la couche des tronçons hydrographiques de la BD TOPO afin de créer une couche regroupant les voies navigables de France métropolitaine. Les tronçons dont la valeur associée à l'attribut « NAVIGABL » correspond à « Vrai » ont été sélectionnés et exportés dans cette nouvelle couche.

4.2.6 Frontières administratives

De manière similaire aux couches de transport, les couches décrivant les frontières administratives du territoire français métropolitain ont été extraites de la base de données BD TOPO. Les frontières des régions, départements, EPCI et communes ont été regroupées dans le projet national.

4.2.7 « Foncier »

En France, il n'existe pas de jeux de données géospatiaux décrivant le régime de propriété foncière à l'échelle nationale, ni de jeux de données décrivant ou prédisant la valeur estimée des terrains, bien que ces informations aient leur importance pour l'élaboration de plans de gestion, de restauration ou de conservation. Il existe cependant des registres et bases de données recensant les prix de vente des parcelles et contenant des coordonnées spatiales, ce qui pourrait théoriquement donner lieu à la création de jeux de données de ce type.

Pour le National Project, d'autres données relatives au foncier, certes plus lacunaires et moins utiles, mais apportant tout de même du contexte, ont donc été choisies. Elles sont toutes issues de la BD TOPO.

Deux de ces couches sont issues de la thématique « Zones réglementées ». Il s'agit de la couche « Parc ou réserve », et de la couche « Forêt publique ». Cette première couche comporte des entités géographiques représentant tous les espaces naturels protégés où certaines activités sont régies par un règlement particulier, ce qui inclut les parcs et réserves naturels, nationaux ou régionaux, mais aussi les zones NATURA 2000, les arrêtés de protection divers, les sites RAMSAR, les sites des conservatoires d'espaces naturels,...(IGN 2024). Cette donnée apporte un contexte important pour les gestionnaires souhaitant implanter des opérations de gestion. La couche Forêt publique représente, quant à elle, toute forêt gérée par une structure publique, domaniale ou non. Les données sont issues de l'Office National des Forêts(IGN 2024).

Les couches « Bâtiment », « Construction linéaire », « Construction ponctuelle » ont également été récupérées depuis la thématique « Bâti ». Cette première couche décrit toute construction permanente au-dessus du sol utilisée pour abriter humains, animaux, objets, pour la production de biens économiques ou la prestation de services(IGN 2024). Les entités sont issues de la BD PARCELLAIRE, sans seuil de surface minimal. Les entités surfaciques représentent l'emprise au sol vue du dessus. La nature des bâtiments, leur usage,... sont spécifiés dans la table attributaire(IGN 2024). Les constructions linéaires regroupent notamment les barrages, clôtures, murs divers, ponts, quais, tunnels,...(IGN 2024) Les constructions ponctuelles représentent

notamment les clochers, éoliennes, phares, transformateurs, antennes, et autres constructions ponctuelles(IGN 2024).

4.2.8 Géologie

Le Bureau des Recherches Géologiques et Minières (BRGM) produit une base de données intitulée BD Charm-50. Il s'agit des cartes géologiques départementales au 1:50.000 numérisées puis vectorisées. Pour chaque département, deux couches de type polygones (formations géologiques et couche de surcharge), deux couches linéaires (éléments structuraux et divers linéaires), et deux couches ponctuelles (éléments ponctuels structuraux et divers) sont disponibles(BRGM 2024). Chacune de ces six couches a été fusionnée à l'échelle nationale à partir des couches départementales, avant d'être toutes regroupées au sein d'un fichier au format Geopackage.

4.2.9 Ecorégions

Le *World Wildlife Fund* produit une couche de données géospatiales opérant une régionalisation du monde en 7 écozones, 14 biomes, et 867 écorégions, basée sur une approche biogéographique, et sur l'existence d'espaces relativement larges, contenant des assemblages de communautés écologiques et espèces distincts les uns des autres et dont les limites sont approximativement celles de ces communautés avant les grands impacts anthropiques(Olson et al. 2001). Les Biomes et Ecozones ont été extraits de cette base de données pour former des couches à part entière. Pour les écorégions, nous nous sommes basés sur le travail de régionalisation de l'*European Environment Agency*, ayant débouché sur la *Digital Map of European Ecological Regions*, comportant 70 écorégions. Cette cartographie reprend les écorégions du WWF pour le continent européen, en les précisant et en les subdivisant si besoin(EEA 2009).

En plus de ces écorégions, les hydroécorégions de niveau 1 et 2 ont été ajoutées au national project, définies dans le référentiel masses d'eau Sandre comme étant des « *Entités spatiales homogènes du point de vue des déterminants physiques qui contrôlent l'organisation et le fonctionnement global des écosystèmes aquatiques. A l'échelle du bassin, les déterminants primaires universellement reconnus du fonctionnement écologique des cours d'eau sont la géologie, le relief et le climat. Ce concept s'inspire des théories de contrôle hiérarchique des hydrosystèmes, et repose particulièrement sur l'emboîtement des échelles physiques, du bassin jusqu'au micro-habitat.* »(Sandre 2014).

4.2.10 Climat

Il n'existe pas, en l'état, de jeux de données géospatial harmonisé décrivant les normales pour les principaux paramètres climatiques sur l'emprise spatiale du territoire français, comme c'est le cas de Prism aux Etats-Unis. Il a donc été décidé d'opter pour une base de données disponible à l'échelle globale. Les deux bases de données les plus utilisées à cette échelle sont *Climatologies at High Resolution for the Earth Land Surface Areas* (CHELSA) et *WorldClim*. Ces deux bases de données sont basées sur des modèles permettant de prédire des variables bioclimatiques. Les modèles de *WorldClim* se basent avant tout sur de simples interpolations de données météorologiques en entrée, les régionalisant grâce à une approche régression linéaire pondérée, utilisant la longitude, latitude, altitude, distance au trait de côte,... comme des variables prédictives(Fick et Hijmans 2017). Les données produites le sont à une résolution de 1x1 kilomètre, et les normales bioclimatiques sont calculées sur la période 1970-2000. Ceux de CHELSA se basent sur des méthodes de désagrégation statistique des données en sortie du modèle de circulation atmosphérique ERA-interim, à partir de données météorologiques, tout en utilisant des variables prédictives tels que les vents dominants, la topographie,... Les résultats sont produits à une résolution spatiale d'environ 1 kilomètre. Les normales bioclimatiques de CHELSA sont calculées sur la période 1979-2013(Karger et al. 2017).

Bien que *WorldClim* soit une base de données reconnue, montrant de bons résultats en Amérique du Nord et en Europe(Hijmans et al. 2005), des recherches, notamment concernant l'utilisation de ces données pour modéliser la répartition d'espèces végétales, ont montré de meilleurs résultats en utilisant des données issues de CHELSA(Maria et Udo 2017). CHELSA semble également montrer de meilleurs résultats concernant la prédiction des précipitations orographiques(Maria et Udo 2017). Une autre étude comparative menée sur un bassin versant en Colombie a cependant trouvé de meilleurs résultats pour *WorldClim* au niveau des températures moyennes, et une légère meilleure performance pour CHELSA au niveau des prédictions de

précipitation, tout en soulignant la bonne qualité des deux bases de données (Bastidas Osejo, Betancur Vargas, et Alejandro Martinez 2019). Le choix des données climatiques pour le projet national s'est donc porté sur la base de données CHELSA, qui, de manière générale, semble présenter de meilleurs résultats. Les données incorporées au national project sont celles se rapprochant au mieux des données utilisées aux Etats-Unis, ou considérées comme les plus pertinentes :

- Un raster des normales de précipitation en mm/an
- La température moyenne en degrés Celsius
- Un raster des normales de températures moyennes du trimestre le plus froid, en degrés Celsius
- Un raster des normales de températures moyennes du trimestre le plus chaud, en degrés Celsius
- Trois rasters décrivant le déficit de pression de vapeur DPV moyen, minimal, et maximal
- Un raster de l'évapotranspiration potentielle moyenne calculée par la formule de Penman

4.2.11 Géotraitements

En plus des 14 jeux de données de végétation et d'occupation du sol regroupés à l'échelle nationale, 3 jeux de données supplémentaires ont été créés à partir de couches existantes pour l'emprise spatiale du bassin versant de la Drôme, via Qgis. Cette décision vient en réponse à l'absence d'un jeu de données continu à un niveau de détail similaire aux couches américaines Landfire. L'objectif est ainsi de pouvoir tester BRAT et RCAT avec ces jeux de données en entrée, et de comparer avec les résultats obtenus avec les couches non traitées.

Pour chacun de ces trois jeux de données, la BD Forêt V2 a été utilisée comme base, et l'ensemble de ses informations et entités ont été conservées, puisque disposant d'un niveau de détail important concernant la composition des surfaces forestières. Pour le premier jeu de données produit, l'opération « différence » a été utilisée dans Qgis, avec les zones de végétation de la BD Topo comme couche source, avant de fusionner les deux couches via l'outil « fusionner des couches vectorielles ». Cette opération a été répétée avec la couche de Registre Parcellaire Graphique, puis avec l'occupation du sol de Théia vectorisée pour l'occasion. Pour le deuxième jeu de données, l'opération a été sensiblement similaire, à l'exception près que les zones de végétation de la BD Topo n'ont pas été incluses. Enfin, la dernière couche a été produite simplement en utilisant les entités de l'occupation du sol Théia comme couche source et les entités de la BD Forêt V2 comme couche de superposition, permettant en quelque sorte de combler les vides de la couche BD Forêt V2 par les informations de la couche Théia. Le résultat de cette dernière couche est en annexe 7.

Concernant la topographie, le choix a été fait de produire un MNT Hillshade et un raster de pente en pourcentages, directement à partir du RGE Alti 5 mètres fusionné à l'échelle nationale, via la bibliothèque GDAL, et ce afin de simplifier les opérations nécessaires lors de l'exécution des modèles.

Les tronçons de voie ferrée et de route dont la valeur de l'attribut « ETAT » correspondait à « Non exploité » ont été supprimés.

4.3 Protocole suivi pour adapter les modèles

Une fois la base de données constituée et regroupée dans le projet national, l'adaptation des données et des scripts Python pour l'étude de cas sur le bassin versant de la Drôme a pu commencer à être menée.

4.3.1 Constitution du Riverscape Context Project pour le bassin versant de la Drôme

En l'état actuel des choses, les scripts python destinés à constituer les projets de type RC Context ne sont pas prévus pour être exécutés localement sur une machine, mais pour fonctionner dans le cloud du R.C., en récupérant les données américaines au sein du National Project, ou via des API. Etant donné que le Projet National français n'est pas hébergé sur le cloud du R.C., mais l'est localement et sur le cloud de l'Université d'Etat de l'Utah, et pour des raisons d'efficacité concernant la mise en œuvre de cette étude de cas, le projet de Riverscapes Context a été produit manuellement pour le bassin de la Drôme, reprenant les thématiques (Climat, Ecorégions, Foncier, Frontières administratives, Géologie, Hydrologie, Topographie, Transport, et Végétation) et globalement l'architecture du projet national et de la version américaine du modèle. Les limites du bassin versant de la Drôme ont été créées en agrégeant les bassins versants topographiques de la BD

Topage faisant partie de ce même bassin versant, puis les couches ont été coupées selon ces limites, et ajoutées aux sous-dossiers thématiques. Certaines couches ont été réunies au sein de fichiers Geopackage, notamment les couches relatives à l'hydrographie, leurs dérivés, les couches géologiques, et les écorégions. Des projets *RC Context* rudimentaires ont également été produits pour chaque bassin versant topographique (au nombre de 9), contenant uniquement les données nécessaires à l'exécution des modèles jusqu'à VBET, à savoir les données topographiques et hydrologiques.

Une fois cette étape effectuée, les produits dérivés des couches hydrographiques, normalement produits automatiquement par RSContext, ont été produits manuellement, via des outils SIG disponibles dans diverses librairies, et regroupés dans un Geopackage *hydro_derivatives* de manière similaire à ce qu'opère l'outil en temps normal. Certains de ces dérivés ont dû être légèrement adaptés en raison des données disponibles en France. Par exemple, *ownership_lines*, *network_crossings*, *network_intersected* et *network_intersected_300m* ont été produits via les limites des espaces protégés et des forêts publiques en lieu et place des limites des régimes de propriété foncière.

Un fichier xml de type Project.rs.xml a également été manuellement produit, avec les métadonnées, comme les noms des jeux de données, et leur description, écrites en français. Ce fichier XML permettra la mise en ligne du projet RC Context pour la Drôme une fois qu'une version française de ce type de projet reconnaissant ce fichier XML sera officialisée.

Une fois que toutes ces étapes ont été effectuées pour le bassin versant de la Drôme et ses neuf sous-bassins versants, les projets ont été importés dans le *Code Space* servant à la modification du code des modèles, dans un répertoire intitulé *Data*, situé à la racine du répertoire *Workspaces*.

4.3.2 Traitement des données sur le bassin versant de la Drôme et modification de certains paramètres

4.3.2.1 Surface drainée

Une fois le projet RC Context construit, certains traitements ont été effectués avant de débiter l'adaptation des modèles.

Ainsi, les tronçons hydrographiques issus de la BD Topage ne disposent d'aucune information relative à la surface qu'ils drainent, contrairement aux *Flowlines* américaines. Pour faciliter l'application des modèles et pour garantir une certaine justesse des données, cette information a été ajoutée pour chaque entité de la couche des tronçons hydrographiques couvrant le bassin de la Drôme, sous la forme d'un nouvel attribut.

Pour ce faire, les tronçons ont été rasterisés à l'aide de l'outil « *rasterize stream network* » de la *Fluvial Corridor Toolbox*. Un raster de direction d'écoulement (flow direction) a ensuite été calculé, également grâce à la FCT. Pour ce raster, 8 valeurs de pixels indiquent le sens d'écoulement (Nord, Nord-Est, Est, Sud-Est, Sud, Sud-Ouest, Ouest, Nord-Ouest, Pas de direction). Puis, l'outil SAGA Next Gen « *burn stream network into DEM* » a été utilisé afin d'« enfoncer » artificiellement le réseau hydrographique dans le MNT, en utilisant en entrée les trois rasters précédemment créés. Cette technique permet de forcer l'écoulement théorique dans le réseau hydrographique « réel », et non pas dans le réseau hydrographique interpolé via le MNT. La couche rasterisée du réseau hydrographique est utilisée comme masque sur le MNT, et l'altitude de chaque pixel de ce dernier compris dans le réseau hydrographique réel est alors diminuée (Lindsay 2016). Cet enfoncement a été effectué pour une valeur de 20 mètres.

Par la suite, un nouveau raster de direction d'écoulement a été produit via l'outil « *burn stream and fill depressions* » de la FCT, qui, au passage, permet de combler les dépressions. En effet les dépressions constituent un obstacle pour les algorithmes liés aux écoulements (Lindsay 2016). Puis l'outil « *flow accumulation* », utilisant en entrée le raster de directions d'écoulement hydrologiquement corrigé, a permis de produire un raster où la valeur de chaque pixel correspond au nombre de pixels se drainant dans celui-ci. Par la suite, l'outil « points le long des lignes », avec une fraction de 0,5, a été utilisé, et ce afin de placer un point correspondant au centre de gravité sur chaque tronçon. Ces points ont alors été mis en tampon de 35 mètres afin de s'assurer que les pixels du raster *flow accumulation* d'un tronçon donné soient bien compris dans leur emprise spatiale. Ensuite, ces tampons ont été drapés sur le raster *flow accumulation* avec l'outil

« *Drape Vectors* ». En d'autres termes, les valeurs Z de nos tampons ont été mises à jour avec les valeurs du raster de flow accumulation. Il a ensuite suffi d'extraire ces valeurs Z via l'outil « extraction des valeurs Z ». La valeur maximale a été extraite à chaque reprise, pour obtenir la surface drainée totale pour chaque tronçon, avant d'être jointe à la couche des tronçons hydrographiques (en utilisant l'identifiant unique des tronçons comme champ de jointure) dans un nouveau champ intitulé « DA_km2 ». Une vérification manuelle des données a été effectuée afin de corriger les valeurs aberrantes, certains tampons captant les valeurs d'autres tronçons (au niveau des confluences par exemple). En connaissant la résolution de notre MNT (5x5 mètres), il a alors été aisé d'obtenir la valeur de la surface drainée par tronçon en kilomètres carrés.

4.3.2.2 Equation hydrologique de pleins bords

Comme nous l'avons précédemment évoqué dans le présent document, le Channel Area Tool utilise une équation régressive afin de déterminer, à partir des précipitations moyennes en mm/an et de la surface drainée, la largeur à plein bord pour chaque tronçon du réseau hydrographique.

Cependant, cette équation a été déterminée par Beechie et Imaki en 2014 sur le bassin versant de la rivière Columbia aux Etats-Unis (T. Beechie et Imaki 2014), et est donc adaptée à un contexte particulier, où de nombreux autres facteurs non pris en compte par l'équation sont certainement en jeu (géologie, occupation du sol, climat,...). Ainsi, il a été décidé de produire une équation régionalisée pour le bassin versant de la Drôme, permettant de lier la surface drainée à une largeur à pleins bords estimée.

Pour ce faire, les orthophotographies issues de la BD ORTHO 2023 de l'IGN, en couleurs réelles et IRC, ont été utilisées. A partir de ces données, des tronçons choisis le long du réseau hydrographique ont été échantillonnés, avec, pour chacun d'entre eux, la mesure de la largeur de la bande active observable par photo-interprétation au centre du tronçon, et de la surface drainée en ce point. En effet, la bande active représente l'espace comprenant le chenal en eau, ainsi que les bancs alluviaux peu ou pas végétalisés remaniés par les crues de période retour généralement comprises entre un et deux ans, et représente donc plus ou moins la largeur du chenal à plein bord, souvent défini comme le niveau d'eau lors des crues de période retour 2 ans (Malavoi et Bravard 2011). Cette bande active correspond au lit moyen des géomorphologues, en eau entre le débit d'étiage et la crue de plein bord (Malavoi et Bravard 2011).

Lors du premier essai, 114 tronçons ont été échantillonnés plus ou moins au hasard au sein du bassin versant, en essayant de répartir au maximum les valeurs de surfaces drainées. Les données n'étant pas linéaires, une équation de régression polynomiale de degré 5 (ce degré présentant le plus faible coefficient de détermination) a été calculée, afin d'ajuster au mieux le modèle aux valeurs mesurées. Cependant, comme visible sur la figure 15, les valeurs obtenues étaient très fortement dispersées et le R² de l'équation n'était que de 0,7712, signifiant que le modèle n'expliquait que 77,12% de la variance observée, résultat assez médiocre. Cette dispersion des valeurs peut potentiellement être expliquée par différents facteurs, notamment le caractère karstique du bassin versant (avec donc des résurgences de cours d'eau dont la surface drainée est largement supérieure à ce qu'indique leur bassin versant topographique, ou au contraire des pertes), la présence de styles fluviaux en tresse majoritairement sur les cours d'eau les plus importants (et donc avec une plus grande surface drainée), mais aussi les changements de styles fluviaux que connaît le bassin versant de la Drôme (les différents styles fluviaux ayant un impact sur la largeur de la bande active). Pour essayer d'obtenir une équation plus fiable, un deuxième essai a été entrepris. Cette fois-ci, 101 tronçons présentant un style fluvial à chenal unique, ou au maximum à deux chenaux et banc central unique non végétalisé, et donc sans tressage visible, ont été échantillonnés.. Il a également été décidé de satisfaire la contrainte $f(0) = 0$, une surface drainée nulle n'ayant (à priori), pas de largeur à plein bord supérieure à 0. Pour imposer cette contrainte, le polynôme a été ajusté en réduisant son degré de liberté, et en excluant son terme constant. Cette équation a été produite via un script Python de la bibliothèque *NumPy*.

L'équation obtenue est la suivante :

$$L = 3,7059 \times 10^{-14} \times a^5 - 1,965 \times 10^{-10} \times a^4 + 3,9091 \times 10^{-7} \times a^3 - 3,5034 \times 10^{-4} \times a^2 + 1,59 \times 10^{-1} \times a$$

$$R^2 = 0,9275$$

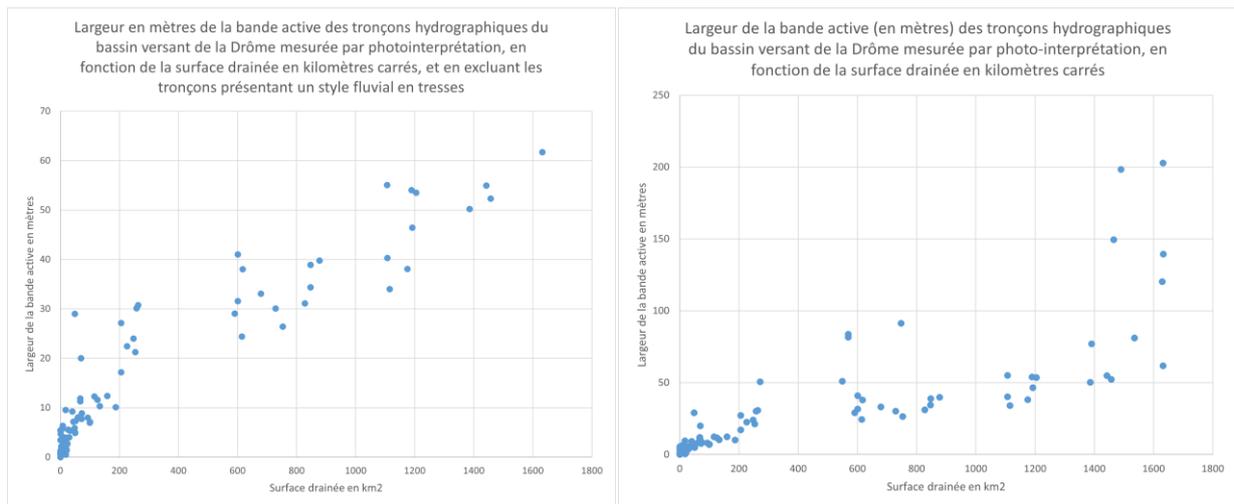
Et où :

- L = La largeur à plein bord estimée en mètres
- Et a = Surface drainée en km²

Les valeurs ayant donné cette équation sont visibles sur la figure 14. Le coefficient de détermination de Pearson (R^2) est de 0,9275 pour cette équation, signifiant que ce modèle explique environ 92,75% de la variance observée, résultat considéré comme satisfaisant pour notre étude de cas. Pour rappel le R^2 est calculé de la manière suivante :

$$R^2 = 1 - \left(\frac{SSE}{SST} \right)$$

Où SSE = la somme des carrés des résidus, c'est-à-dire la somme des carrés des différences entre les valeurs observées et celle prédites par le modèle, et SST = somme des carrés totale, soit la somme des carrés des différences entre les valeurs observées et la moyenne des valeurs observées.



Figures 14 et 15 : Largeurs des tronçons échantillonnés en mètres en fonction de leur surface drainée en kilomètres carrés. A droite se trouve le premier essai d'échantillonnage et à gauche le second, à partir duquel l'équation a été calculée.

Après ces traitements, la modification des scripts python des modèles a pu être entamée.

4.3.4 Modifications des scripts communes à tous les modèles

La première étape de la création d'une version française des différents modèles, après l'analyse poussée de leur fonctionnement bien entendu, a été la modification des différents scripts, afin que ceux-ci soient adaptés aux données françaises, à leur architecture. Dans une première partie, nous aborderons les modifications apportées aux scripts de l'ensemble des modèles, avant d'aborder les principales modifications spécifiques à chaque modèle.

Pour permettre leur modification sans impacter la version originale des modèles, l'ensemble du code relatif aux modèles du RC, contenu dans un dépôt GitHub « *riverscapes-tool* », a été transféré dans un « *CodeSpace* » GitHub, permettant de développer, modifier les scripts et exécuter les modèles dans un environnement de développement personnel, fonctionnant dans le cloud de GitHub via une machine virtuelle. Chaque modèle dispose d'un environnement respectif, permettant d'exécuter les scripts ensemble, selon des configurations spécifiées dans un fichier *launch.json* situé à la racine de l'environnement.

4.3.4.1 Modification des scripts python

Dans les scripts principaux de chacun des modèles (*channel.py*, *vbet.py*,...), une variable intitulée « *LayerTypes* = » est généralement définie, après l'importation des diverses bibliothèques et fonctions nécessaires à l'exécution des scripts, et permet de décrire chacune des couches utilisées (et produites) par le script, ainsi

que leur chemin d'accès relatif, leur type (vecteur ou raster),.... Les noms des couches, et/ou leur sommaire description, ont été traduits et modifiés si cela a été considéré comme nécessaire ou pertinent.

A la suite de cette variable, la fonction principale du script est généralement définie et ses arguments sont listés. Pour les modèles Channel Area et TauDEM, certains de ces arguments ont été traduits (« *flowlines=* » traduit en « *troncon_hydrographique=* » par exemple) pour plus de clarté si les scripts viennent à être manipulés par des francophones. Si tel a été le cas, ces arguments ont dû être traduits dans l'ensemble du script à chaque fois qu'ils sont appelés. Si certains arguments sont définis directement dans la définition de cette fonction, leur valeur a été modifiée pour correspondre à celle des données françaises. Si cela a été jugé nécessaire, certaines variables contenues dans la fonction principale ont été traduites. Toutes les valeurs définies « par défaut » pour diverses fonctions ont été modifiées (par exemple l'EPSG par défaut a toujours été modifié pour correspondre à l'EPSG 2154).

A la fin de la fonction principale, un module *argparse* est utilisé afin de permettre de définir ses arguments. Si les arguments ont été modifiés d'une quelconque manière dans le script, ils ont également été modifiés ici.

De manière générale, toutes les fonctions, variables, arguments,... faisant référence à des couches, champs, valeurs d'attributs,... dans les scripts principaux et secondaires des modèles, et dans les scripts Python des bibliothèques à effectuer certaines opérations spécifiques et accompagnant les modèles, ont été modifiées afin de correspondre aux données françaises.

Les commentaires et la journalisation des modèles (c'est-à-dire les messages s'affichant dans le terminal lors de leur exécution) ont été traduits autant que possible, pour permettre une meilleure intelligibilité pour les utilisateurs francophones. Des éléments de journalisation ont par ailleurs été régulièrement ajoutés où cela a semblé pertinent, ou aux endroits où les scripts présentaient les erreurs les plus fréquentes lors de leur exécution avec les données françaises.

Les scripts permettant l'écriture des fichiers xml de métadonnées ont également été modifiés, en traduisant certains éléments et en modifiant les noms des couches.

4.3.4.2 Modification des configurations et de la description des couches

Une fois tous les scripts modifiés, la dernière étape de l'adaptation des modèles a consisté en la modification du fichier « *launch.json* » et ses configurations pour tous les modèles. Ainsi, lors de l'exécution locale des modèles dans leurs environnements respectifs, la seule indication à fournir est le nom du bassin versant, indiquant le projet du même nom dans lequel se trouvent les données le concernant. Par ailleurs, l'identifiant des bassins versants est numéraire aux Etats-Unis, et les arguments, paramètres,... faisant appel à cet identifiant sont donc souvent au format *integer* (ou numéraire) pour la version américaine des modèles. Pour la version française, ces arguments et paramètres ont été convertis au format chaîne de caractères (*string*).

Pour l'outil Channel Area par exemple, les chemins d'accès ont tous été modifiés pour correspondre au chemin d'accès aux données dans un projet type de Riverscape Context français, tout comme la fonction permettant le calcul de la largeur du réseau hydrographique a plein bord, le champ de la couche des tronçons hydrographiques spécifiant la surface drainée, les champs permettant d'effectuer des tris sur cette couche et sur celle des surfaces élémentaires, et les chemins d'écriture du projet, des sous-dossiers et des fichiers xml. L'EPSG par défaut a toujours été modifié pour correspondre à l'EPSG 2154 RGF93 v1 / Lambert-93. Si des arguments sont ajoutés dans les scripts, il le sont aussi dans le fichier *launch.json*.

Suite à cela, et de nouveau pour chaque modèle, le fichier *layer_description.json* a été adapté. Ainsi, chaque nom de couche a été modifié si celui-ci a été modifié dans le script principal, et les descriptions de ces couches ont été traduites afin d'être facilement compréhensibles par un locuteur français. Ces descriptions sont ensuite utilisées dans le fichier xml, et dans l'affichage du *RC Viewer*.

4.3.5 Modifications spécifiques aux modèles

4.3.5.1 Channel Area Tool (C.A.T.)

Dans le script principal du modèle C.A.T. (« *channel.py* »), et juste après les importations de diverses bibliothèques et fonctions, les premières lignes spécifient la fonction par défaut permettant de déterminer la largeur du réseau hydrographique à plein bord, ainsi que ses paramètres (dans notre cas le champ comportant la surface drainée). Cette fonction par défaut a donc été remplacée par celle déterminée sur le bassin versant de la Drôme.

Dans la fonction principale « *channel* », quatre nouveaux arguments ont été ajoutés : « *position_code_field* », « *position_codes* », « *artificial_code_field* », « *artificial_codes* ». En effet, ce modèle filtre, comme nous l'avons évoqué, les *waterbodies*, *flowlines* et *flowareas* selon leur *Fcode*. Les informations comprises dans ces codes agrègent dans un même champ des informations présentes dans plusieurs champs dans la couche Bd topage, à savoir la persistance de l'écoulement, la nature du tronçon, et son caractère fictif ou non. Ainsi, le filtrage sur ces deux couches pour la version française de l'outil se base sur le champ « Nature », mais également sur les champs « TronconFic », et sur les champs « PositionPa », via l'ajout de nouvelles fonctions.

La couche des surfaces élémentaires constituant à elle seule l'équivalent des couches *Waterbodies* et *Flowareas*, toutes les fonctions, arguments et variables relatifs à la couche *waterbodies* ont été supprimés, puisqu'en doublon avec la version adaptée aux surfaces élémentaires de ceux des *flowareas*. Le triage effectué sur cette couche supprime les entités correspondantes aux canaux, aux conduits busés, et aux glaciers et névés.

La logique du modèle a également quelque peu été modifiée, pour des raisons que nous détaillerons dans la partie consacrée à VBET. L'outil a été forcé à produire une couche *bankfull_polygons* mettant en tampon tous les tronçons hydrographiques, opérant uniquement un filtrage concernant leur position par rapport au sol, mais pas selon leur fictivité ou leur nature, comme c'est le cas dans la version américaine. Cette couche est alors conservée telle quelle dans les données intermédiaires. C'est à l'étape suivante, avant de produire la couche *difference_polygons*, que le filtrage complet s'effectue enfin, directement sur les tronçons mis en tampon, ne conservant que les tampons de tronçons non fictifs, puis les triant selon leur nature en ne conservant que les écoulements canalisés, endoréiques, karstiques, naturels, et inconnus. Deux intermédiaires supplémentaires sont produits par la même occasion, l'un décrivant les tronçons mis en tampon non fictifs, et l'autre décrivant les tampons non fictifs filtrés selon leur nature (*non_artificial_bankfull_polygons* et *filtered_reach_bankfull_polygons*). Ainsi, le filtrage intervient plus tardivement dans le processus, impactant les intermédiaires, mais pas les données en sortie.

Des problèmes liés aux systèmes de projection ont été rencontrés lors de l'exécution de l'outil. Il a donc été décidé de supprimer les opérations visant à déterminer automatiquement le système de projection des couches, et des opérations ont été rajoutées pour forcer l'outil à utiliser l'EPSG 2154 et à reprojeter les couches si besoin est, le tout avec une journalisation adéquate.

4.3.5.2 TauDEM

Aucune modification importante n'a été apportée à TauDEM mis à part les modifications communes évoquées en première partie.

La section du script permettant de produire un raster de pente en degrés avec GDAL a été désactivée, puisque ce raster est déjà produit en amont.

4.3.5.3 VBET

L'adaptation de VBET a soulevé certains problèmes majeurs. Le principal est l'absence d'identifiant unique par cours d'eau, des sources aux exutoires, pour les surfaces élémentaires, dont l'emprise spatiale de certaines entités couvre parfois plusieurs cours d'eau différents. Cela ne pose pas de problème pour les autres modèles. Cependant, pour VBET, la couche « *channel_area* » utilisée en entrée doit disposer d'identifiants uniques pour chaque cours d'eau, afin que l'outil puisse déterminer à quels cours d'eau appartiennent quelles entités surfaciques représentant les chenaux à plein bords. Cette couche est issue de la fusion des polygones de différence (qui ont des identifiants uniques par cours d'eau) et des surfaces élémentaires (qui n'en ont

pas) via l'outil *Channel Area*. Cette couche ne dispose donc que de quelques entités avec des identifiants liés aux cours d'eau, et d'une majorité sans. VBET produit ainsi une couche de polygones de chenaux très largement incomplète pour chaque cours d'eau qu'il identifie (via les tronçons hydrographiques et leur identifiant cours d'eau), puisque ne récupérant que les entités disposant d'un identifiant cours d'eau. Or, l'outil se base ensuite sur l'emprise spatiale de ces couches pour produire quasiment toutes ses couches temporaires (y compris les chenaux rasterisés, etc.). Cependant, ces couches ne sont composées que de quelques entités parfois groupées, et donc souvent largement plus petites que l'emprise du cours d'eau. Des erreurs apparaissent donc dans les traitements postérieurs, les coordonnées étant souvent situées en dehors des couches temporaires utilisées.

La solution la plus pertinente a consisté à modifier l'outil *Channel Area* de manière à le forcer à produire une couche représentant la mise en tampon de l'ensemble des tronçons hydrographiques du bassin versant, selon l'équation produite précédemment. Ainsi, même si la couche combinant surfaces élémentaires et tronçons mis en tampon est plus proche de la réalité que la couche issue uniquement de la mise en tampon des tronçons par l'équation régionalisée, cette dernière présente l'avantage non négligeable de comporter des identifiants uniques par cours d'eau et pour chacune de ses entités. En entrée, le VBET français n'utilise donc pas le jeu de données *channel_area*, mais la couche *bankfull_polygons*. Comme décrit plus haut, le jeu de données final du Channel Area Tool n'est pas modifié, puisqu'un filtrage est réalisé a posteriori. Plusieurs autres solutions ont été envisagées, mais aucune ne présentait de résultats satisfaisants.

Des fonctions visant à forcer VBET à fonctionner avec l'EPSG 2154 et des fonctions vérifiant l'emprise spatiale des couches et des couches temporaires ainsi que leurs coordonnées ont été ajoutées afin de diagnostiquer les problèmes précédents. Elles ont été conservées puisqu'elles étaient utiles, et complétées par une journalisation.

Les *LevelPath1* étant composés de caractères numériques, la grammaire et la *syntaxe* de leurs lignes de code ont été modifiées pour fonctionner avec des identifiants de type chaîne de caractères, comme les codes cours d'eau de la BD Topage.

4.3.6 Business logics et symbologies, création de nouveaux types de projets français

Pour chacune des versions françaises des modèles, une nouvelle business logic a été créée de toutes pièces. Les données ont été réorganisées thématiquement, une symbologie a été attribuée à chacun des jeux de données, reprenant ou non celle de la version américaine, et le nom des jeux de données a généralement été traduit et formulé de manière intuitive si tel n'était pas déjà le cas. Ainsi, un projet français ouvert dans le RC Viewer à l'aide de ces nouvelles Business Logic apparaît dans une version complètement française, tant dans la langue utilisée que dans la manière dont les couches sont organisées et visualisées. Les fichiers XML des Business Logics sont typiquement intitulés « NomModèle.xml ». Ils sont pour l'heure stockés directement à la racine des projets de chaque bassin versant, avec les fichiers .qml définissant les symbologies pour chaque jeu de données, mais serviront à l'avenir pour la création de la version française officielle des modèles et leur visualisation par n'importe quel utilisateur du RC Viewer.

Le répertoire contenant la version modifiée des modèles ainsi que les projets est disponible en Annexe 1.

4.4 Résultats

Ainsi, à l'issue de ce stage, quatre modèles sur les huit modèles de rang « *production* » et « *operational* » que compte la Waterfall du RC ont été appliqués au bassin versant de la Drôme, et leurs données produites sont ainsi disponibles. Ces quatre modèles ont été modifiés de manière à pouvoir devenir de véritables versions françaises des modèles d'origine. Les fichiers de métadonnées XML, les business logics, et les symbologies ont été modifiés pour correspondre à cette nouvelle version française, tant dans leur logique que dans la manière dont ils sont visualisables. De plus, une base de données relativement complète est désormais disponible pour l'ensemble de l'emprise spatiale du territoire français métropolitain, sous la forme d'un projet national qui, à terme, devrait être hébergé sur le cloud du RC.

Les modèles ont donc été appliqués aux 1020 kilomètres de réseau hydrographique et aux 1660 kilomètres carrés du bassin versant de la Drôme. Pour l'outil RS Context, toutes les couches géospatiales ont été découpées selon l'emprise spatiale du bassin versant de la Drôme. Les dérivés hydrologiques décrits dans la partie « Données utilisées » ont également été produits manuellement.

Pour l'ensemble du bassin versant de la Drôme, la surface maximale du fond de vallée a ainsi été estimée à environ 44,02805 kilomètres carrés, soit environ 2,65 % de l'espace total du bassin versant.

Pour l'outil Channel Area Tool, 91 % de l'emprise spatiale de la couche finale en sortie est constituée de surfaces élémentaires, et 9 % de tronçons mis en tampon. Tout le chevelu principal du bassin versant est en réalité digitalisé dans les surfaces élémentaires, ce qui explique ce résultat.

Les principaux résultats sont disponibles en annexe, sous forme de cartes. L'annexe 5 décrit les tronçons hydrographiques avec une symbologie adaptée à la surface drainée, déterminée selon le processus expliqué précédemment. L'annexe 6 présente la symbologie simplifiée des couches surfaciques de la BD-CharM50 du RC Context. L'annexe 7 présente le jeu de données créé à partir de la BD Forêt V2 et du jeu de données OSO de Theia, destiné à être testé via BRAT. L'annexe 8 décrit la couche de sortie finale du Channel Area Tool, représentant les chenaux à pleins bords. L'annexe 9 représente le raster HAND, produit par TauDEM. L'annexe 10 décrit le raster TWI, également produit par TauDEM, tout comme l'annexe 11 qui décrit le raster de pente D-Infinity en degrés. Ces trois rasters sont les principaux faisceaux d'indices utilisés pour produire l'annexe 12, qui est le raster de probabilité (allant de 0 à 1) d'un pixel de faire partie du fond de vallée, principal intermédiaire de VBET. Des seuils appliqués à ce raster permettent la caractérisation du corridor fluvial. L'annexe 13 décrit cette caractérisation opérée par VBET sur les unités géomorphologiques du corridor fluvial, en extrayant les chenaux à pleins bords, la plaine inondable active et la plaine inondable supposément non active. Les annexes 14 et 15 présentent les IGO et DGO produits par VBET, ainsi que deux de leurs métriques (le nombre d'hectares de fond de vallée par kilomètre pour les IGO, et la proportion de fond de vallée élevé ou de plaine d'inondation inactive pour les DGO). Une fois les projets hébergées sur le Data Exchange, les différents projets des bassins versants topographiques pourront potentiellement être fusionnés via le Merge Tool, un outil en développement permettant de fusionner certains projets (Riverscapes Consortium 2024d).

Un total de 39 projets sont disponibles sur le contexte français, 3 pour chacun des modèles appliqué sur l'entièreté du bassin versant de la Drôme, et 4 pour chacun de ses neuf sous-bassins versants.

Il est à garder à l'esprit qu'aucun de ces résultats et des données produites n'est juste à l'heure actuelle, aucun des modèles n'ayant été calibré sur le bassin drômois. Ces résultats montrent donc la faisabilité de l'application de ces modèles américains sur le contexte français, mais ils ne sont pas utilisables comme tel pour permettre une quelconque caractérisation des corridors fluviaux, ou la priorisation d'actions de gestion.

En annexe 1 se trouve un lien permettant d'accéder aux modèles français, et aux projets.

5. Limites, recommandations et discussions

5.1 Limites générales des modèles

La cartographie et la géomatique consistent toujours en une représentation simplifiée du monde observable, qui est bien trop complexe pour pouvoir être représenté fidèlement. Cette simplification est nécessaire pour faire ressortir les informations considérées comme importantes, et elle dépend des choix effectués par le ou les auteurs, qu'ils soient conscients ou non. Elle découle de contextes et de cadres conceptuels particuliers, de la culture, de l'historique de la recherche dans le domaine, des normes cartographiques, etc.

En aparté, c'est également le cas des grands concepts en sciences de l'eau, comme les grands gradients, et un parallèle pourrait être tiré entre les deux. C'est ce que les sous-parties de l'introduction du présent document dédiées à la géomatique ont essayé de démontrer. Il en va de même pour la modélisation, qui décrit et analyse une réalité simplifiée et manipulée pour obtenir certains résultats. Ainsi, les modèles du Riverscape Consortium ne font pas exception. Ils sont volontairement relativement généralistes et globalisants, puisque conçus pour être appliqués à des échelles spatiales extrêmement larges, dédiés aux

gestionnaires de cours d'eau et d'espaces naturels et non pas à la recherche, et basés volontairement sur des données publiques gratuites disponibles à de larges échelles, et donc avec des résolutions spatiales parfois relativement grossières. La priorisation, que ce soit pour la restauration ou la conservation, est l'un des principes centraux de la logique de ces modèles et de la « Waterfall ». Ainsi, cette logique et ces choix sont à considérer absolument lors de leur utilisation. Ces modèles, si utilisés par un gestionnaire par exemple, ne peuvent toutefois pas se substituer à des études de terrain plus précises. En revanche, ils s'inscrivent en complément de ces dernières, permettant, avec une importante économie de ressources, d'orienter et de les prioriser.

Au-delà de cet aspect, plusieurs limites inhérentes aux modèles du RC peuvent être citées. Par exemple, les équations utilisées, que ce soit pour le Channel Area Tool ou pour BRAT, sont généralement très peu précises, ce qui entraîne de larges approximations (W. W. Macfarlane et al. 2017). De plus, dans un bassin karstique comme celui de la Drôme, considérer uniquement les bassins versants topographiques comme cela est le cas risque de fausser certains résultats, notamment pour les outils utilisant les surfaces drainées. Ainsi, nous nous sommes nous-mêmes aperçus, lors du calcul de l'équation pour le Channel Area Tool, que nombre de tronçons présentent des largeurs aberrantes, parfois largement trop grandes pour leur surface drainée, ou inversement.

Concernant VBET, certaines erreurs sont inévitables et notamment imputables à la résolution des données, mais aussi aux seuillages, qui ne sont pas forcément adaptés à tous les contextes. Si plus de temps avait été disponible durant cette période de stage, tester différents types de seuils aurait pu être pertinent (Gilbert, Macfarlane, et Wheaton 2016).

Par ailleurs, même si l'utilisation de données publiques disponibles aux échelles nationales présente de nombreux avantages, la très grande taille de leur emprise n'est pas sans conséquence sur leur qualité. La résolution est généralement de quelques dizaines de mètres, et les lignes hydrographiques passent rarement exactement par le réseau coulant réel, notamment dans les systèmes très dynamiques comme sur certains secteurs de la Drôme. C'est d'ailleurs l'un des probables problèmes de Channel Area Tool, qui caractérise de manière relativement approximative des objets géographiques extrêmement dynamiques.

Ainsi, des jeux de données différents utilisés pour un même site peuvent donner des résultats radicalement différents. Par exemple, Les données utilisées dans BRAT ne sont pas forcément d'une très grande résolution spatiale, généralement autour de 10 à 30 mètres selon les jeux de données utilisés. Si l'utilisation de ces jeux de données géographiques publics permet de faciliter grandement l'utilisation de l'outil et sa diffusion, leur résolution peut toutefois entraîner des erreurs d'estimation dans la capacité des tronçons concernés à supporter une densité donnée de castors, notamment au sein des petits bassins versants ou des cours d'eau de très faible rang. En effet, des zones de végétation riparienne, et donc des sources d'alimentation et de matériaux, peuvent être présentes sous la forme de fines bandes dans ces espaces, au sein de fonds de vallées étroites par exemple, et être ignorées par les jeux de données utilisés (Kornse et Wohl 2020).

Kornse et Wohl (2020) ont par exemple testé BRAT sur un petit bassin versant du sud des Montagnes Rocheuses en utilisant divers jeux de données de végétation en entrée, l'un issu de LANDFIRE et deux produits pour l'occasion, et issus de méthodes de classifications largement plus précises menées par télédétection via des images satellites NAIP de résolution un mètre (Kornse et Wohl 2020). Il en résulte des estimations largement différentes. Pour les données LANDFIRE, 9 % du site d'étude était dans la catégorie « occasionnelle » et 53 % dans la catégorie « fréquente ». Pour l'une de leurs deux méthodes de classification, 63 % du bassin versant entraient dans la catégorie « occasionnelle » et 33 % dans la catégorie « fréquente », soit un écart significatif avec une sous-estimation de la capacité à soutenir les populations de castors sur de nombreux tronçons lorsque LANDFIRE est utilisé en entrée (Kornse et Wohl 2020). La résolution et les erreurs de classification de LANDFIRE, qui sous-estiment la végétation riparienne, pourraient être à l'origine de ces écarts (Kornse et Wohl 2020). Toujours selon Kornse et Wohl, BRAT tendrait parfois à sous-estimer la capacité des castors à transformer leur environnement et à s'installer dans et s'adapter à des habitats que l'outil ne considère pas comme favorables. Certains tronçons étudiés ayant été classés dans les catégories « occasionnelle » ou « fréquente », ont en réalité accueilli des densités de barrages correspondant à la catégorie « pervasive » (Kornse et Wohl 2020).

5.2 Limites de l'adaptation des modèles au contexte français

Ainsi, nous avons rencontré plusieurs difficultés lors de l'application de ces modèles. Les principaux d'entre eux ont résulté de l'absence ou de l'insuffisance de données équivalentes. La végétation, bien qu'elle n'ait pas encore été utilisée puisque ni BRAT ni RCAT n'ont été appliqués, risque fort de poser problème pour la continuité de ce projet. De manière générale, les données géospatiales et biogéographiques en France sont particulièrement lacunaires. Et en ce qui concerne la végétation riparienne, c'est d'autant plus le cas.

Le fait que les modèles aient été construits autour de données typiquement américaines ressort aussi parfois. Les *LevelPathl* en sont un bon exemple. VBET a été construit autour de l'architecture des données NHD HR+. Il en va de même pour les *Fcodes* et la surface drainée. De ce fait, nous avons dû utiliser une version simplifiée du réseau hydrographique, ce qui rend les résultats obtenus peu significatifs. Il est fort probable que le fond de vallée total sur le bassin versant de la Drôme soit bien supérieur à celui que nous avons obtenu.

D'autant plus que nous avons dû utiliser la couche des tronçons mis en tampon, et non la couche de sortie de Channel Area Tool. Là encore, ceci est dû aux problèmes de *LevelPathl*. Or, cette couche est largement moins représentative de la réalité et elle sous-estime très fortement les cours d'eau en tresse à l'aval du bassin versant de la Drôme, ce qui ne devait à l'origine pas être un problème, puisque ces cours d'eau sont digitalisés dans la couche « surfaces élémentaires ». Elle est en revanche plutôt précise à l'amont.

Au cours de ces six mois, nous nous sommes efforcés de faire de ces modèles une véritable version française, en modifiant les scripts ou en retranscrivant nos réflexions à ce sujet dans ce rapport. Cependant, il convient de toujours rester prudent, car les modèles du R.C. ont été développés dans un contexte particulier, entraînés, seuillés, validés, calibrés, etc., sur des données et des bassins versants américains. Ainsi, ces modèles ne sont pas parfaitement adaptés au contexte dans lequel ils sont appliqués, et ne le seront pas si un travail de recherche plus approfondi n'est pas mené sur le sujet. Ainsi, les résultats obtenus par certains modèles lors de notre travail d'adaptation sont visiblement erronés. C'est le cas de VBET par exemple, où la caractérisation du fond de vallée est très clairement sous-estimée, notamment dans les parties les plus anthropisées du bassin versant, où son emprise est très fortement impactée par les digues bordant la Drôme par exemple.

Les différences culturelles, de rapport à l'environnement, aux rivières, à la nature de manière générale ne sont pas non plus à mettre de côté. La géographie reste une science sociale. Certains de ces rapports sont clairement visibles dans certains modèles, comme RCAT par exemple.

5.3 Prospectives du projet

Globalement, et malgré quelques déboires, les quatre premiers modèles de la « *Waterfall* » ont été exécutés sur le contexte français. Les données sont à présent prêtes pour pouvoir exécuter Anthropogenic Context dans un premier temps, ce qui devrait être relativement simple, puis pour exécuter BRAT, RCAT, et enfin possiblement Confinement et Metric Engine. Il s'agira alors de créer, comme nous l'avons fait, une véritable version française des modèles, adaptée pour fonctionner avec des données françaises, sa propre *Business Logic*, et type de projet (exemple : French BRAT).

L'une des prochaines étapes consistera également à automatiser les modèles sur les bassins versants de la BD Topage, sans avoir à les exécuter manuellement et localement. En théorie, c'est également largement faisable. Il faudra alors récupérer les sources de données disposant d'API fiables (l'IGN en a plusieurs par exemple), et modifier les scripts de RC Context en conséquence.

Un autre défi consiste à trouver un moyen de contourner les *LevelPathl* dans les modèles ou d'implanter des *LevelPath* dans les tables attributaires, potentiellement via un script Python intégré à VBET par exemple.

De manière plus globale, une des principales étapes pour permettre aux outils de fonctionner correctement et de produire des résultats justes, après avoir continué l'adaptation des modèles aux données françaises et résolu les problèmes évoqués précédemment, consiste en la calibration des modèles sur le contexte français et drômois. Cela pourrait se faire via des études de terrain notamment, sur l'un des sous-bassins de la Drôme par exemple.

5.3.1 BRAT

En raison de contraintes de temps, l'adaptation et l'application de BRAT sur le bassin versant de la Drôme n'ont pas pu être réalisées dans le cadre de ce stage. Cependant, BRAT a tout de même fait l'objet d'une analyse critique, de réflexions quant aux possibilités de son adaptation, et l'ensemble des données a priori nécessaires à son application sur le bassin versant de la Drôme sont prêtes et regroupées dans les différents projets créés sur le dit bassin.

Ainsi, les étapes nécessaires à l'application de ce modèle sont déjà globalement définies.

Il a été décidé de tester l'outil avec les divers jeux de données relatifs à la végétation et à l'occupation du sol qui ont été regroupés au sein du projet national, découpés selon l'emprise spatiale du bassin versant de la Drôme, ainsi qu'avec les couches créées spécialement pour l'occasion. L'objectif sera alors de tester ces divers jeux de données sur un petit sous-bassin versant, afin de comparer les résultats obtenus. Ces différents résultats pourront ensuite être évalués par rapport à la réalité du terrain, soit par photo-interprétation d'orthophotographies, par exemple, soit par la création d'une couche de végétation via télédétection, utilisée comme donnée en entrée du modèle, de manière similaire à ce qu'ont fait Korn et Wohl en 2020 (Kornse et Wohl 2020). Ainsi, les résultats issus de ce dernier test seront les plus fiables et pourront être mis en regard de ceux obtenus via les autres jeux de données disponibles. Selon le contexte de la suite du projet, il pourrait même être intéressant de réaliser des relevés de terrain sur ce sous-bassin versant. Ceux-ci, en complément de la télédétection, permettraient de cartographier avec précision la végétation, d'effectuer des tests supplémentaires et de déterminer les couches de données géographiques publiques nationales donnant les résultats les plus réalistes.

En fonction des choix réalisés concernant les jeux de données de végétation les plus adaptés, une classification hiérarchique (de favorisé à inadapté) des catégories ou espèces végétales de ces couches devra être réalisée, de manière similaire à celle utilisée pour les jeux de données Landfire aux États-Unis. Cette classification devra se faire sur la base de la littérature disponible quant à l'alimentation de *C.fiber*, ou à défaut de *C.canadensis*, et servira à estimer la capacité d'une unité de segmentation à supporter une population de castor. Si cela est jugé pertinent par les personnes qui poursuivront le projet, cette classification pourra être adaptée en fonction de l'espace géographique considéré, des sylvoécocorégions, de la répartition d'espèces végétales favorables aux castors ou non, etc. Par exemple, des espèces végétales considérées comme peu favorables dans un espace donné pourraient voir leur aptitude augmentée dans des espaces où les ressources alimentaires sont moins abondantes, et inversement. En effet, les castors tendent à modifier leurs habitudes alimentaires selon la disponibilité de telle ou telle essence, et se rabattent sur des espèces moins favorisées d'ordinaire si leurs ressources alimentaires favorites ne sont pas disponibles.

Concernant le seuil de surface drainée maximale, au-delà duquel les cours d'eau font en moyenne plus de 20 mètres de large et sont donc considérés comme n'accueillant pas de barrages de castors, ce dernier pourra, dans un premier temps, être régionalisé, via photo-interprétation, de manière similaire à ce qui a été fait pour l'équation liant surface drainée et largeur à pleins bords. Il est également possible d'adapter cette largeur maximale en se référant à la littérature existante sur *C.fiber*.

L'un des principaux problèmes de l'adaptation de la méthode BRAT au contexte drômois (et français) réside dans les équations hydrologiques régressives régionalisées utilisées aux États-Unis pour prédire les débits maximaux de période de retour deux ans (une chance sur deux de se produire chaque année) et le débit dépassé 80 % du temps sur le mois présentant les plus faibles débits. Ce débit est également déterminant pour la construction de barrages et la survie d'une population de castors. Il est possible, pour le contexte français, d'utiliser des équations régionalisées similaires existantes. L'INRAE a produit un travail de régionalisation de ce type (Organde et al. 2013). Ce travail a été repris et amélioré sur le bassin versant du Rhône par l'Agence de l'Eau RMC. Il va donc falloir modifier l'outil pour s'adapter à ces équations, qui ne prévoient pas exactement les mêmes types de débits que celles utilisées aux États-Unis. Il sera éventuellement possible de le faire avec l'aide de la littérature relative à *C.fiber* en France.

Une autre solution, plus chronophage, pourrait être de mettre au point des modèles hydrologiques régionalisés, notamment de type débit-débit, et donc de produire nos propres équations régionalisées. Ce

type de modèle établit une relation entre la surface drainée et les débits d'un bassin versant jaugé, qu'il est alors possible d'extrapoler à des bassins versants analogues non jaugés situés à proximité (Lebecherel et al. 2015). Ce type de modèle présente de nombreuses limites, mais le bassin versant de la Drôme est relativement bien équipé en stations de jaugeage. Il existe aussi des modèles pluie-débits, de type GR4J. Ces derniers établissent également des relations entre surface drainée et débits via des débits jaugés sur des bassins versants, mais en prenant également en compte les précipitations et l'évapotranspiration, données à disposition dans le projet national (Lebecherel et al. 2015).

5.3.2 RCAT

Concernant RCAT, il pourrait être possible d'appliquer une logique inverse à celle que mène l'outil actuellement. En effet, il serait possible d'adapter les scripts afin de produire une nouvelle couche de données, sorte de couche « inversée » de « *vegetation departure* ». Cette dernière pourrait, à partir des données de végétation du 19^e siècle et d'aujourd'hui, décrire les gains de végétation sous forme de raster, et de la même manière produire un raster de changements d'occupation du sol. Ainsi, l'outil pourrait permettre d'identifier les secteurs ayant connu les plus grandes améliorations, ainsi que ceux ayant connu les améliorations les moins flagrantes. Ces résultats pourraient donc permettre de prioriser les actions de conservation et de restauration. L'un des principaux problèmes posés par cette solution est le manque d'harmonisation de la BD Carto EM à l'échelle française. En revanche, il existe une version scannée et géoréférencée des cartes de l'état-major qui peut potentiellement être utilisée (avec une classification automatique par exemple).

Enfin, l'une des perspectives à long terme du projet pourrait consister à appliquer ces modèles à des contextes tels que ceux des territoires ultra-marins français. Les modèles du RC ont été pensés et développés spécifiquement pour le contexte américain, et dans une moindre mesure pour des espaces à climat tempéré au sens large. Ainsi, l'adaptation de ces modèles à des espaces au climat tropical ou équatorial constituerait un véritable défi, qui nécessiterait de repenser en profondeur la construction des modèles et leur logique, voire la création de nouveaux modèles. Les castors ne sont a priori pas une espèce présente en Guyane française, et ne le seront probablement pas dans le futur, ce qui remet en question l'existence de BRAT. RCAT devrait aussi être profondément repensé et adapté aux essences et contextes locaux. Chaque territoire d'outre-mer étant généralement très différent des autres, La Réunion n'ayant a priori que peu de choses en commun avec la Guadeloupe, cela nécessiterait ainsi une version spécifique des modèles pour chaque territoire.

5.4 Réflexions quant à l'enrichissement des modèles (ROE, Carhab, Syrah-ce)

5.4.1 Syrah-ce et ROE

Le projet Syrah-CE a été développé sur soixante-neuf mille cinq cents tronçons hydrographiques issus de la BD Carthage de l'IGN. Sur chacun des tronçons, considérés comme homogènes d'un point de vue géomorphologique, divers indicateurs relatifs aux pressions hydrogéomorphologiques (taux de rectification, urbanisation, etc.) et aux ouvrages transversaux (seuils, barrages, etc.), ainsi qu'aux continuums, ont été évalués. Cela a permis d'estimer de manière cohérente les pressions et altérations géomorphologiques des cours d'eau, et donc, par conséquent, les altérations de leurs fonctionnements physiques et écologiques sur l'ensemble du territoire français. Ces indicateurs de pression ont été construits en grande partie à l'aide de la BD Topo de l'IGN (Van Looy et al. 2014).

Les indicateurs relatifs aux aménagements transversaux quantifient, par exemple, la création de retenues en amont (milieux lentiques), les modifications de débit ou le taux d'étagement. Les indicateurs relatifs au continuum se basent notamment sur la végétation, dont les informations sont issues de la BD Topo. Elles concernent la composition de la végétation (arborée, arbustive, herbacée, etc.), et son agencement spatial (largeur et continuité, ou non). De trop nombreuses ruptures dans la continuité de la végétation autour des cours d'eau déclassent par exemple ces indices et traduisent une altération de la continuité de la végétation riparienne (Van Looy et al. 2014).

Si le projet Syrah-CE est basé sur une représentation simplifiée du réseau hydrographique réel ainsi que sur des données de végétation relativement imprécises issues de la BD Topo, il permet toutefois une quantification des pressions et altérations hydrogéomorphologiques. Il constitue ainsi une base de données relativement rare, dont les équivalents dans d'autres pays sont peu nombreux. Son intégration aux modèles du Riverscape Consortium ne pourrait être que bénéfique. Des taux de rectification, d'urbanisation faibles, une bonne continuité et un fort taux de couvert des ripisylves ainsi que la rareté des voies de communication sont souvent associés à un meilleur fonctionnement écologique et à la présence de niches écologiques favorables à des espèces telles que la loutre ou le castor (et accessoirement à une moindre occurrence des conflits d'usages et spatiaux avec les activités humaines)(Van Looy et al. 2014).

Autre jeu de données intéressant, le référentiel des obstacles à l'écoulement pourrait également être intégré à certains modèles du RC. Ce référentiel recense tous les ouvrages anthropiques faisant obstacle à la continuité longitudinale, comme les barrages ou les seuils, et il présente l'avantage d'être disponible sur l'ensemble du réseau hydrographique. Cet aspect est important puisque les poissons sont adaptés à devoir migrer au cours de leur vie, même pour les espèces longtemps considérées comme n'étant pas migratrices. En effet, cela leur permet de s'adapter continuellement aux perturbations, aux ressources notamment alimentaires et spatiales, etc. Les individus sont donc en mouvement perpétuel entre les patches d'habitats au sein d'un système, créés par des processus et flux divers que nous avons amplement détaillés dans l'introduction. Ainsi, des ruptures dans la continuité d'un hydrosystème ont des conséquences importantes pour les populations piscicoles, dont les mouvements sont entravés, ce qui peut potentiellement mener à leur disparition(Fausch et al. 2002). Sans parler de l'impact des barrages sur les régimes des débits, qui modifient parfois profondément les conditions et les habitats d'un cours d'eau. Ce jeu de données pourrait même permettre de calculer différentes métriques, comme le taux d'étagement, les hauteurs de chutes, les densités d'ouvrages par kilomètre, etc.

5.4.2 Modélisation de la dispersion

Lors de la constitution de la base de données utilisable pour l'adaptation des modèles au contexte français, des données relatives aux populations de castor et à leur répartition en France ont également été recueillies. Ces données sont issues d'autre part des données de l'Office Français de la Biodiversité, via les données recueillies par le réseau castor. Ce dernier existe depuis 1987 et a pour objectifs principaux le suivi de l'aire de répartition du Castor d'Europe, la gestion des conflits d'usages avec les activités humaines et la surveillance de l'arrivée potentielle du castor américain(INPN 2024). Dans le cadre du suivi de la colonisation de cette espèce, ce réseau dispose d'un ensemble de données d'observation issues de prospections réalisées selon un protocole national standardisé basé sur la présence ou le constat d'absence d'indices de présence de l'espèce. Ces données servent notamment à la publication d'une cartographie de cette colonisation(INPN 2024). Le fichier Excel de ces données (au nombre de 1 922) a été téléchargé.

L'Inventaire National du Patrimoine Naturel (plateforme nationale du Système d'Information de l'Inventaire du Patrimoine Naturel) met également à disposition, via son portail français d'accès aux données d'observation sur les espèces OpenObs, les données d'observation par espèces recueillies par diverses organisations et études (bureaux d'étude, associations, collectivités, établissements publics, services déconcentrés, etc.) et validées par des contrôles de l'INPN. Ces données de présence sont au nombre de 39 818 pour le castor fiber en France métropolitaine, et ont également été téléchargées.

La plupart de ces données d'observation disposent d'une information spatiale, au mieux via des coordonnées géographiques précises, au pire via une information sur la commune, l'EPCI ou le département d'observation. Elles possèdent également de très nombreuses autres informations, telles que la date d'observation, le type d'indice, la fiabilité de la donnée, l'observateur, le cadre d'acquisition, etc., permettant des tris poussés.

À partir de ces données, certes non exhaustives mais tout de même relativement fournies, il est possible de modéliser les potentialités de dispersion en prenant en compte la connectivité au sein du réseau hydrographique. Il s'agit de la connectivité structurelle, estimée avec la contiguïté des tronçons et divers paramètres favorables ou défavorables aux castors, voire possiblement avec les résultats traditionnellement fournis par BRAT (Van Looy et al. 2014). Il est aussi possible de prendre en compte le comportement de dispersion du castor, c'est-à-dire la connectivité fonctionnelle ou dynamique, qui tient compte de la variabilité

de la vitesse de dispersion du castor. Pour un pas de temps t , un modèle de ce type estime le voisinage théoriquement accessible par l'espèce depuis les tronçons habités à un pas de temps $t-1$, tout en indiquant les facteurs explicatifs de la colonisation ou de la non-colonisation (végétation, pressions anthropiques, etc.) (Van Looy et al. 2014). Les données de Syrah-CE ou des données équivalentes, telles que les taux de rectification, d'urbanisation, les modes d'occupation du sol, etc., peuvent également être utilisées dans ce type de modèles.

Cette modélisation de la dispersion à partir des données d'observation et de répartition (et d'autres indicateurs liés à la végétation et aux pressions anthropiques, etc.) peut, en théorie, être facilement intégrée à BRAT. Cela pourrait se faire en mettant en place des indices de continuité ou de dispersion, ou encore des scores par tronçons similaires aux résultats produits actuellement par BRAT. Ces résultats permettraient d'évaluer l'état actuel des réseaux écologiques et de prioriser les secteurs à conserver et ceux à restaurer pour permettre une dispersion optimale de l'espèce.

Cette possibilité n'a pas été explorée plus en détail dans le cadre de ce stage, par manque de ressources et de temps. Toutefois, son application a été discutée et reste tout à fait envisageable à l'avenir.

5.4.3 Anthropogenic context

Cet outil pourrait potentiellement être amélioré en France. La BD Topo met par exemple à disposition une couche couvrant l'intégralité du territoire national et décrivant chaque bâtiment construit. La proximité où la densité de bâtiments dans le fond de vallée pourrait par exemple servir de nouvelle métrique. Nous avons d'ores et déjà intégré cette couche au Projet National. De manière similaire, les couches relatives aux transports que nous avons ajoutées au projet national (aéroports, équipements de transport, etc.) pourraient être utilisées.

De manière générale, l'enrichissement des modèles afin de les adapter au mieux au contexte français et aux données disponibles sur cet espace, et plus largement la réflexion quant à la collaboration avec des projets similaires en France, pourrait tout à fait faire l'objet de plusieurs sujets de stages similaires à celui ayant donné naissance au présent document, voire à un possible sujet de thèse.

5.4.4 Occupation du sol

Si la France manque de jeux de données spatiales harmonisées relatifs à la végétation, ceux relatifs à l'occupation du sol sont beaucoup plus nombreux et précis. Les produits Corine Land Cover sont nombreux, certains avec une résolution spatiale très fine et un nombre de classes élevé dans les zones à enjeux comme les grands corridors fluviaux. Théia dispose d'un niveau de précision relativement important, et l'IGN travaille à la production d'un jeu de données OCS GE.

L'OCS GE est un jeu de données en développement qui vise à considérablement améliorer la connaissance de la couverture du sol, ainsi que de ses usages et de la consommation de l'espace. Ainsi, par exemple, la végétation est classée en sept types de couverts, mais 15 types d'usages. Des usages comme l'agriculture, la sylviculture, etc. sont distingués du type de couverture, ce qui pourrait s'avérer très intéressant pour les modèles du RC (IGN 2018b).

La couche « *imperviousness* » de Copernicus pourrait également être intégrée aux données.

5.5 Prospectives de recherche et recommandations

L'une des principales difficultés rencontrées durant le déroulement de ce stage a concerné l'absence de certaines données utilisées dans les modèles américains, notamment en ce qui concerne la végétation. Les données utilisées aux États-Unis, bien qu'elles ne soient pas toujours très représentatives et présentent parfois des erreurs, comportent un nombre de classes largement supérieur à n'importe quel jeu de données relatif à cette thématique disponible sur l'ensemble du territoire français. Comme évoqué précédemment, certains papiers montrent une appétence des castors eurasiens pour certaines espèces arborées ou arbustives comme *Populus nigra* (le Peuplier noir), *Salix alba* (le Saule blanc) ou encore *Fraxinus angustifolia* (le Frêne à feuilles étroites). J. Fustec et al. ont par exemple démontré le rôle important de ces espèces dans la dispersion et le maintien des populations de castors. La longueur des sauleraies dominées par ces deux

premières espèces ressort dans cet article comme le meilleur indicateur statistique permettant de prédire l'étendue spatiale de la répartition de l'espèce dans un espace donné (Fustec et al. 2001). Ainsi, l'intérêt d'avoir un jeu de données décrivant précisément les communautés végétales semble essentiel pour permettre la modélisation de la distribution de l'espèce ou la capacité des tronçons, ce qui n'est pas le cas à l'heure actuelle.

Ainsi, ce projet appelle à être poursuivi. Il conviendrait sans nul doute à un éventuel deuxième stage, voire à un doctorat. Ce stage ou doctorat pourrait par exemple être réalisé à la fois en France et aux États-Unis, au laboratoire ETAL de l'université d'État de l'Utah, et être complété par des études de terrain en France sur des bassins versants tests, afin d'améliorer au maximum la version française des modèles.

Pour aller plus loin, et cette partie n'engage que ma personne, il pourrait être pertinent de désigner et recruter une ou plusieurs personnes pour mener un projet collaboratif international entre le laboratoire ETAL et d'autres parties prenantes potentiellement intéressées en France. comme l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, voire même l'UMR 53600 Environnement-Ville-Société à l'origine de la Fluvial Corridor Toolbox (FCT) dont nous avons déjà parlé ici, et qui est actuellement en train de développer un projet intitulé Map d'O, similaire en certains points aux projets du RC. En effet, un stagiaire ou doctorant travaillant à plein temps sur un tel projet pourrait faciliter la diffusion des méthodes, données, compétences et connaissances entre les différents projets similaires menés conjointement sur le bassin versant du Rhône, mais qui sont actuellement sans réelles interactions ou échanges. La FCT devait par exemple, à l'origine, être intégrée aux modèles et à la Waterfall du Riverscape Consortium en la rendant compatible avec les standards et exigences de ce dernier. Mais cela n'a jamais abouti, personne n'ayant été recruté ou désigné pour travailler à plein temps sur le projet. Inversement, certains modèles et méthodes du Riverscape Consortium (notamment leurs versions françaises développées durant ce stage, ou encore BRAT et RCAT qui n'ont à ma connaissance pas d'équivalent en France) pourraient techniquement être intégrés à Map d'O ou à la FCT, moyennant certaines adaptations et réflexions techniques.

Conclusion

À l'issue de cette période de stage, quatre des huit modèles de la série « Waterfall » du Riverscapes Consortium, modèles de *grade production*, ont été appliqués avec succès sur le contexte français, plus précisément sur le bassin de la Drôme, moyennant quelques compromis techniques. Ces modèles ont été adaptés dans le but de produire de véritables versions françaises, tant dans leur logique que dans la manière dont leurs résultats sont visualisables. Les différents scripts ont été largement modifiés, traduits (notamment les noms des variables et les informations de log), et adaptés pour fonctionner avec les données françaises.

Ces quatre premiers modèles présentent l'avantage d'être dans la partie supérieure de la cascade, permettant donc de fournir les données nécessaires aux autres modèles, et de disposer de logiques relativement simples, et facilement transposables sur le contexte français, en adaptant les modèles pour fonctionner avec les données disponibles, et éventuellement en modifiant légèrement leur logique.

À présent, un projet national, base de données regroupant un ensemble de jeux de données géospatiaux publics, gratuits, couvrant l'ensemble du territoire français et nécessaires à l'exécution des modèles, est prêt à être mis en ligne sur le Data Exchange, et tout est en place pour pouvoir bientôt disposer de versions françaises automatisées des modèles du Riverscapes Consortium. Cela permettra aux projets créés sur le bassin versant de la Drôme d'être visualisables et téléchargeables sur le Data Exchange, avec leurs propres données et leur propre symbolologie. Les jeux de données disposant d'API, comme l'IGN pour certains de ses jeux de données par exemple, pourront alors être supprimés du projet national et directement appelés via ces API lors de l'exécution des modèles.

Concernant la suite des modèles, une réflexion poussée quant à la logique même des modèles devra être menée. Certains modèles, comme BRAT par exemple, demanderont probablement une certaine réflexion afin d'être adaptés, tout comme RCAT qui devra être entièrement repensé (sans compter les modifications nécessaires pour exécuter les modèles avec les données disponibles). Ils pourront être enrichis si besoin, grâce à de la bibliographie française (comportements de *C.fiber* par exemple), ou des études de terrain. Si

certains modèles sont pertinents pour l'adaptation, comme Anthropogenic context qui pourrait théoriquement être applicable même si les données utilisées sont complètement différentes, puisqu'il fournit principalement des indices de pression anthropique, d'autres devront faire l'objet d'adaptation plus poussées quant à leur logique comme BRAT, et d'autres encore pourront potentiellement être abandonnés pour l'adaptation des modèles en France, comme RCAT. En effet, l'absence de données équivalentes, les différences de contexte et l'existence de modèles similaires en France remettent fortement en cause la pertinence de son adaptation.

Néanmoins, les modèles déjà appliqués permettent la caractérisation, la priorisation de la gestion, de la restauration et de la conservation à de larges échelles, sur des bassins versants entiers, via des données publiques et gratuites faciles d'accès. Le projet, largement entamé grâce au stage à l'origine du présent document, doit être poursuivi. Comme évoqué précédemment, une large réflexion concernant l'adaptation et la pertinence de l'adaptation des modèles suivants reste à mener, sans parler de la modification des modèles en tant que telle. Il reste également à automatiser les différents modèles déjà appliqués sur le contexte français, bien que cela soit en théorie plutôt rapide à mettre en œuvre, les divers fichiers XML, Business Logics, architectures de projets, etc., ayant déjà été adaptés. Une autre grande étape concerne également la calibration des modèles, les résultats actuels étant largement inexacts et donc inexploitable en l'état. Il conviendra pour cela de mener des études de terrain, ou par télédétection par exemple.

Dans la continuité du projet, une collaboration entre le Riverscapes Consortium et des organisations françaises serait également bénéfique et envisageable, favorisant la diffusion des savoirs, méthodes et techniques entre les organisations de recherche, mais aussi avec les gestionnaires.

Bibliographie

- Alber, Adrien, et Hervé Piégay. 2011. « Spatial disaggregation and aggregation procedures for characterizing fluvial features at the network-scale: Application to the Rhône basin (France) ». *Geomorphology* 125 (3): 343-60. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.09.009>.
- Anderson, Hal E. 1982. « Aids to determining fuel models for estimating fire behavior ». *The Bark Beetles, Fuels, and Fire Bibliography*, 143.
- Bastidas Osejo, Breiner, Teresita Betancur Vargas, et John Alejandro Martinez. 2019. « Spatial Distribution of Precipitation and Evapotranspiration Estimates from Worldclim and Chelsa Datasets: Improving Long-Term Water Balance at the Watershed-Scale in the Urabá Region of Colombia ». *International Journal of Sustainable Development and Planning* 14 (02): 105-17. <https://doi.org/10.2495/SDP-V14-N2-105-117>.
- Beechie, Tim, et Hiroo Imaki. 2014. « Predicting Natural Channel Patterns Based on Landscape and Geomorphic Controls in the Columbia River Basin, USA ». *Water Resources Research* 50 (1): 39-57. <https://doi.org/10.1002/2013WR013629>.
- Beechie, Timothy J., David A. Sear, Julian D. Olden, George R. Pess, John M. Buffington, Hamish Moir, Philip Roni, et Michael M. Pollock. 2010. « Process-based Principles for Restoring River Ecosystems ». *BioScience* 60 (3): 209-22. <https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.3.7>.
- Biron, Pascale M., Thomas Buffin-Bélanger, Marie Larocque, Guénoles Choné, Claude-André Cloutier, Marie-Audray Ouellet, Sylvio Demers, Taylor Olsen, Claude Desjarlais, et Joanna Eyquem. 2014. « Freedom Space for Rivers: A Sustainable Management Approach to Enhance River Resilience ». *Environmental Management* 54 (5): 1056-73. <https://doi.org/10.1007/s00267-014-0366-z>.
- BLM. 2017. « BLM National SMA Surface Management Agency Area Polygons ». 2017. <https://www.arcgis.com/sharing/rest/content/items/6bf2e737c59d4111be92420ee5ab0b46/info/metadata/metadata.xml?format=default&output=html>.
- Bravard, J.-P., et G. E. Petts. 1996. « Human Impacts on Fluvial Hydrosystems ». In *The Fluvial Hydrosystems*, édité par G. E. Petts et C. Amoros, 242-62. Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-009-1491-9_11.
- Brazier, Richard E., Alan Puttock, Hugh A. Graham, Roger E. Auster, Kye H. Davies, et Chrissy M. L. Brown. 2021. « Beaver: Nature's Ecosystem Engineers ». *WIREs Water* 8 (1): e1494. <https://doi.org/10.1002/wat2.1494>.
- BRGM. 2024. « Cartes géologiques départementales à 1/50 000 (Bd Charm-50) ». <https://infoterre.brgm.fr/formulaire/telechargement-cartes-geologiques-departementales-150-000-bd-charm-50>.
- Carbonneau, Patrice, Mark A. Fonstad, W. Andrew Marcus, et Stephen J. Dugdale. 2012. « Making Riverscapes Real ». *Geomorphology* 137 (1): 74-86. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.09.030>.
- Copernicus Land Monitoring Service. 2018. « Product user manual – ID 2018, IBU 2018 and ID Change 2015-2018 ». <https://land.copernicus.eu/en/technical-library/hrl-imperviousness-2018-user-manual/@@download/file>.
- Copernicus Land Monitoring Service 2020. « Product user manual – Grassland 2018 and Grassland Change 2015-2018 ». <https://land.copernicus.eu/en/technical-library/hrl-grassland-2018-product-user-manual/@@download/file>.
- Copernicus Land Monitoring Service 2021a. « Product user manual – DLT, FT and TCD 2018 and DLT, FT and TCD Changes ». <https://land.copernicus.eu/en/technical-library/hrl-forest-2018/@@download/file>.
- Copernicus Land Monitoring Service 2021b. « Product user manual – Small Woody Features 2018 and Small Woody Features Change 2015-2018 ». <https://land.copernicus.eu/en/technical-library/high-resolution-layer-small-woody-features-2018-product-user-manual/@@download/file>.
- Copernicus Land Monitoring Service 2023. « Product user manual – Riparian Zones Land Cover/Land Use 2012 and 2018 and Land Cover/Land Use Change 2012-2018 ». <https://land.copernicus.eu/en/technical-library/product-user-manual-riparian-zones-land-cover-land-use-2012-and-2018-and-land-cover-land-use-change-2012-2018/@@download/file>.
- Crutzen, P. J. 2002. « The "Anthropocene" ». *Journal de Physique IV (Proceedings)* 12 (10): 1-5. <https://doi.org/10.1051/jp4:20020447>.

- Daly, Christopher, Michael Halbleib, Joseph I. Smith, Wayne P. Gibson, Matthew K. Doggett, George H. Taylor, Jan Curtis, et Phillip P. Pasteris. 2008. « Physiographically Sensitive Mapping of Climatological Temperature and Precipitation across the Conterminous United States ». *International Journal of Climatology* 28 (15): 2031-64. <https://doi.org/10.1002/joc.1688>.
- David Tarboton. 2015. « David Tarboton: Hydrology Research Group-Terrain Analysis Using Digital Elevation Models (TauDEM) Version 5 ». 2015. <https://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5/index.html>.
- Dunham, Jason B., Paul L. Angermeier, Shelley D. Crausbay, Amanda E. Cravens, Hannah Gosnell, Jamie McEvoy, Max A. Moritz, Nejem Raheem, et Todd Sanford. 2018. « Rivers Are Social–Ecological Systems: Time to Integrate Human Dimensions into Riverscape Ecology and Management ». *WIREs Water* 5 (4): e1291. <https://doi.org/10.1002/wat2.1291>.
- EEA. 2009. « DMEER: Digital Map of European Ecological Regions ». Figure. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/dmeer-digital-map-of-european-ecological-regions>.
- EPA. 2013. « Level IV Ecoregions of the Conterminous United States ». 2013. https://gaftp.epa.gov/EPADDataCommons/ORD/Ecoregions/us/Eco_Level_IV_US.html.
- European Forest Fire Information System (EFFIS). 2017. « European Fuel Map ». <https://forest-fire.emergency.copernicus.eu/about-effis/technical-background/fuels>.
- Fan, Ye, Yan Liu, Shaowen Wang, David Tarboton, Ahmet Yildirim, et Nancy Wilkins-Diehr. 2014. « Accelerating TauDEM as a Scalable Hydrological Terrain Analysis Service on XSEDE ». In *Proceedings of the 2014 Annual Conference on Extreme Science and Engineering Discovery Environment*, 1-2. XSEDE '14. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/2616498.2616510>.
- Faticchi, Simone, Enrique R. Vivoni, Fred L. Ogden, Valeriy Y. Ivanov, Benjamin Mirus, David Gochis, Charles W. Downer, et al. 2016. « An overview of current applications, challenges, and future trends in distributed process-based models in hydrology ». *Journal of Hydrology* 537 (juin):45-60. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.03.026>.
- Fausch, Kurt D., Christian E. Torgersen, Colden V. Baxter, et Hiram W. Li. 2002. « Landscapes to Riverscapes: Bridging the Gap between Research and Conservation of Stream Fishes: A Continuous View of the River is Needed to Understand How Processes Interacting among Scales Set the Context for Stream Fishes and Their Habitat ». *BioScience* 52 (6): 483-98. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2002\)052\[0483:LTRBTG\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0483:LTRBTG]2.0.CO;2).
- Fick, Stephen E., et Robert J. Hijmans. 2017. « WorldClim 2: New 1-Km Spatial Resolution Climate Surfaces for Global Land Areas ». *International Journal of Climatology* 37 (12): 4302-15. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>.
- Fustec, J., T. Lode, D. Le Jacques, et J. P. Cormier. 2001. « Colonization, Riparian Habitat Selection and Home Range Size in a Reintroduced Population of European Beavers in the Loire ». *Freshwater Biology* 46 (10): 1361-71. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2001.00756.x>.
- García, J. Horacio, Alfredo Ollero, Askoa Ibisate, Ian C. Fuller, Russell G. Death, et Hervé Piégay. 2021. « Promoting fluvial geomorphology to “live with rivers” in the Anthropocene Era ». *Geomorphology* 380 (mai):107649. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107649>.
- Gilbert, Jordan, William Macfarlane, et Joseph Wheaton. 2016. « The Valley Bottom Extraction Tool (V-BET): A GIS tool for delineating valley bottoms across entire drainage networks ». *Computers & Geosciences* 97 (juillet):1-16. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.07.014>.
- Classic, Hayley, Kenneth, Kenneth McGwire, William Macfarlane, Cashe Rasmussen, Nick Bouwes, Joseph Wheaton, et Robert Al-Chokhachy. 2024. « From pixels to riverscapes: How remote sensing and geospatial tools can prioritize riverscape restoration at multiple scales », février. <https://doi.org/10.1002/wat2.1716>.
- Hansen, M. C., P. V. Potapov, R. Moore, M. Hancher, S. A. Turubanova, A. Tyukavina, D. Thau, et al. 2013. « High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change ». *Science* 342 (6160): 850-53. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>.
- Hijmans, Robert J., Susan E. Cameron, Juan L. Parra, Peter G. Jones, et Andy Jarvis. 2005. « Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas ». *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society* 25 (15): 1965-78.
- Horton, John D., Carma A. San Juan, et Douglas B. Stoesser. 2017. « The state geologic map compilation (SGMC) geodatabase of the conterminous United States ». US Geological Survey. <https://pubs.usgs.gov/publication/ds1052>.

- IGN. 2018a. « BD Forêt® Version 2.0 - Descriptif de contenu ».
- IGN 2018b. « Comparatif de la végétation dans les produits IGN ».
- IGN 2018c. « RGE ALTI® Version 2.0 - Descriptif de contenu ».
- IGN 2023a. « BD CARTO® État-major Version 1.0 - Descriptif de contenu et de livraison ».
- IGN 2023b. « RPG Version 2.0 - Descriptif de contenu et de livraison ».
- IGN 2024. « BD TOPO® Version 3.4 - Descriptif de contenu ».
- IGN, OFB, et Sandre. 2020. « Document de présentation - DESCRIPTION DU REFERENTIEL HYDROGRAPHIQUE (BD TOPAGE®) ».
- Inglada, Jordi, Arthur Vincent, Marcela Arias, Benjamin Tardy, David Morin, et Isabel Rodes. 2017. « Operational High Resolution Land Cover Map Production at the Country Scale Using Satellite Image Time Series ». *Remote Sensing* 9 (1): 95. <https://doi.org/10.3390/rs9010095>.
- INPN. 2024. « Réseau Castor ». Le portail technique de l'OFB. 2024. <https://professionnels.ofb.fr/fr/reseau-castor>.
- Jones, Clive G., John H. Lawton, et Moshe Shachak. 1994. « Organisms as Ecosystem Engineers ». *Oikos* 69 (3): 373-86. <https://doi.org/10.2307/3545850>.
- Jones, Kimberly A., Lily S. Niknami, Susan G. Buto, et Drew Decker. 2022. « Federal standards and procedures for the national watershed boundary dataset (wbd): chapter 3 of section a, federal standards, book 11, collection and delineation of spatial data ». US Geological Survey. <https://pubs.usgs.gov/publication/tm11A3>.
- Junk, Wolfgang J., Peter B. Bayley, et Richard E. Sparks. 1989. « The flood pulse concept in river-floodplain systems ». *Canadian special publication of fisheries and aquatic sciences* 106 (1): 110-27.
- Karger, Dirk Nikolaus, Olaf Conrad, Jürgen Böhner, Tobias Kawohl, Holger Kreft, Rodrigo Wilber Soria-Auza, Niklaus E. Zimmermann, H. Peter Linder, et Michael Kessler. 2017. « Climatologies at High Resolution for the Earth's Land Surface Areas ». *Scientific Data* 4 (1): 170122. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.122>.
- Kornse, Zachary, et Ellen Wohl. 2020. « Assessing Restoration Potential for Beaver (*CASTOR CANADENSIS*) in the Semiarid Foothills of the Southern Rockies, USA ». *River Research and Applications* 36 (9): 1932-43. <https://doi.org/10.1002/rra.3719>.
- La Puma, Inga. 2023. « LANDFIRE Technical Documentation ». 2023-1045. *Open-File Report*. U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/ofr20231045>.
- Landon, Norbert, et Hervé Piégay. 1994. « L'incision d'affluents méditerranéens du Rhône : la Drôme et l'Ardèche / The incision of two sub-mediterranean tributaries of the Rhône : the Drôme and the Ardèche ». *Géocarrefour* 69 (1): 63-72. <https://doi.org/10.3406/geoca.1994.4239>.
- Lebecherel, Laure, Vazken Andréassian, Bénédicte Augéard, Eric Sauquet, et Clotaire Catalogne. 2015. « Connaître les débits des rivières: quelles méthodes d'extrapolation lorsqu'il n'existe pas de station de mesures permanentes? » <https://agris.fao.org/search/en/providers/122439/records/6474719b79cbb2c2c1b1daac>.
- Leopold, Luna B., et Maura O'Brien Marchand. 1968. « On the Quantitative Inventory of the Riverscape ». *Water Resources Research* 4 (4): 709-17. <https://doi.org/10.1029/WR004i004p00709>.
- Lindsay, John B. 2016. « The Practice of DEM Stream Burning Revisited ». *Earth Surface Processes and Landforms* 41 (5): 658-68. <https://doi.org/10.1002/esp.3888>.
- Macfarlane, William, Sara Bangen, Margaret Hallerud, Braden Anderson, Chalese Hafen, Micael Albonico, Chad Garlick, et al. 2020. *California Beaver Restoration Assessment Tool - Building Realistic Expectations for Partnering with Beaver in Conservation and Restoration Recommended Citation*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20316.00644>.
- Macfarlane, William W., Joseph M. Wheaton, Nicolaas Bouwes, Martha L. Jensen, Jordan T. Gilbert, Nate Hough-Snee, et John A. Shvik. 2017. « Modeling the Capacity of Riverscapes to Support Beaver Dams ». *Geomorphology* 277 (janvier):72-99. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.11.019>.
- Malavoi, Jean-René, et Jean-Paul Bravard. 2011. « Éléments d'hydromorphologie fluviale. Édité par l'Onema (Office national de l'eau et des milieux aquatiques), 2010, 224 p.En ligne sur : <http://www.onema.fr/hydromorphologie-fluviale>. » *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*, n° Volume 5 (janvier), 1. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.1532>.

- Maria, Bobrowski, et Schickhoff Udo. 2017. « Why Input Matters: Selection of Climate Data Sets for Modelling the Potential Distribution of a Treeline Species in the Himalayan Region ». *Ecological Modelling* 359 (septembre):92-102. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.05.021>.
- Mazoyer, Marcel, et Laurence Roudart. 2017. *Histoire des agricultures du monde. Du néolithique à la crise contemporaine*. Média Diffusion. https://books.google.com/books?hl=fr&lr=&id=YGkmDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT7&dq=histoire+de+s+agricultures+du+monde&ots=M8QNZrk01e&sig=noZixAh_RcmwbB5irD1_gfXHS7k.
- Moore, Richard B., Lucinda D. McKay, Alan H. Rea, Timothy R. Bondelid, Curtis V. Price, Thomas G. Dewald, et Craig M. Johnston. 2019. « User's Guide for the National Hydrography Dataset plus (NHDPlus) High Resolution ». 2019-1096. *Open-File Report*. U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/ofr20191096>.
- Nobre, A. D., L. A. Cuartas, M. Hodnett, C. D. Rennó, G. Rodrigues, A. Silveira, M. Waterloo, et S. Saleska. 2011. « Height Above the Nearest Drainage – a hydrologically relevant new terrain model ». *Journal of Hydrology* 404 (1): 13-29. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.051>.
- Nolte, Christoph. 2020. « High-resolution land value maps reveal underestimation of conservation costs in the United States ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117 (47): 29577-83. <https://doi.org/10.1073/pnas.2012865117>.
- Olson, David M., Eric Dinerstein, Eric D. Wikramanayake, Neil D. Burgess, George V. N. Powell, Emma C. Underwood, Jennifer A. D'Amico, et al. 2001. « Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth: A new global map of terrestrial ecoregions provides an innovative tool for conserving biodiversity ». *BioScience* 51 (11): 933-38. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0933:TEOTWA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0933:TEOTWA]2.0.CO;2).
- Organde, D., P. Arnaud, J. A. Fine, C. Fouchier, N. Folton, et J. Lavabre. 2013. « Régionalisation d'une méthode de prédétermination de crue sur l'ensemble du territoire français : la méthode SHYREG ». *Revue des Sciences de l'Eau / Journal of Water Science* 26 (1): 65. <https://doi.org/10.7202/1014920ar>.
- Petts, G. E., et C. Amoros. 1996. « The Fluvial Hydrosystem ». In *The Fluvial Hydrosystems*, édité par G. E. Petts et C. Amoros, 1-12. Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-009-1491-9_1.
- Piégay, Hervé. 1996. « Représentation de la biodynamique fluviale: la forêt alluviale de la moyenne Ardèche ». *Mappemonde* 43 (3): 15-22. <https://doi.org/10.3406/mappe.1996.1239>.
- Piégay, Hervé, Fanny Arnaud, Barbara Belletti, Mélanie Bertrand, Simone Bizzi, Patrice Carbonneau, Simon Dufour, Frédéric Liébault, Virginia Ruiz-Villanueva, et Louise Slater. 2020. « Remotely sensed rivers in the Anthropocene: state of the art and prospects » *Earth Surface Processes and Landforms* (45): 157-88.
- Piégay, Hervé, Desmond E. Walling, Norbert Landon, Qiping He, Fred Liébault, et Robert Petiot. 2004. « Contemporary changes in sediment yield in an alpine mountain basin due to afforestation (the upper Drôme in France) ». *CATENA, Geomorphic Impacts of Rapid Environmental Change*, 55 (2): 183-212. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(03\)00118-8](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(03)00118-8).
- Potapov, Peter, Xinyuan Li, Andres Hernandez-Serna, Alexandra Tyukavina, Matthew C. Hansen, Anil Komareddy, Amy Pickens, et al. 2021. « Mapping Global Forest Canopy Height through Integration of GEDI and Landsat Data ». *Remote Sensing of Environment* 253 (février):112165. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112165>.
- PRISM. 2024. « Descriptions of PRISM Spatial Climate Datasets for the Conterminous United States ». 2024. https://prism.oregonstate.edu/documents/PRISM_datasets.pdf.
- Ries, Kernell G., et J. B. Atkins. 2007. *The national streamflow statistics program: A computer program for estimating streamflow statistics for ungaged sites*. DIANE Publishing. <https://books.google.com/books?hl=fr&lr=&id=ZXPTC-SpKIYC&oi=fnd&pg=PA1&dq=The+National+Streamflow+Statistics+Program:+A+Computer+Program+for+Estimating+Streamflow+Statistics+for+Ungaged+Sites&ots=qEjPMH4nAp&sig=R0uJ1LmLvH5Huwi7dPxjz9VoFbQ>.
- Riverscapes Consortium. 2024a. « Anthropogenic Context ». 2024. <https://tools.riverscapes.net/anthro/>.
- Riverscapes Consortium. 2024b. « Channel Area ». 2024. <https://tools.riverscapes.net/channelarea/>.
- Riverscapes Consortium. 2024c. « Cloud Engine for Automating Riverscapes Models ». 2024. <https://developer.riverscapes.net/dev-tools/cyber-castor/>.

- Riverscapes Consortium. 2024d. « Merging Projects ». 2024. <https://developer.riverscapes.net/merging-projects/>.
- Riverscapes Consortium. 2024e. « Riverscapes Context Tool ». 2024. <https://tools.riverscapes.net/rscontext/>.
- Riverscapes Consortium. 2024f. « Riverscapes Report Card - Channel Area 1.1.1 ». 2024. https://tools.riverscapes.net/channelarea/reportcard_1_1_1/.
- Riverscapes Consortium. 2024g. « Riverscapes Report Card - TauDEM 1.0.2 ». 2024. https://tools.riverscapes.net/taudem/reportcard_1_0_2/.
- Riverscapes Consortium. 2024h. « Riverscapes Standards and How to Comply with Them ». 2024. <https://developer.riverscapes.net/standards/>.
- Riverscapes Consortium. 2024i. « Riverscapes Viewer ». 2024. <https://viewer.riverscapes.net/>.
- Riverscapes Consortium. 2024j. « Terrain Analysis Using Digital Elevation Models (TauDEM) ». 2024. <https://tools.riverscapes.net/taudem/>.
- Riverscapes Consortium. 2024k. « Tool Standards Explained ». 2024. <https://developer.riverscapes.net/MIGRATED/Tools/toolStandards/>.
- Roux, Clément, Adrien Alber, Mélanie Bertrand, Lise Vaudor, et Hervé Piégay. 2015. « “FluvialCorridor”: A new ArcGIS toolbox package for multiscale riverscape exploration ». *Geomorphology, Geomorphology in the Geocomputing Landscape: GIS, DEMs, Spatial Analysis and statistics*, 242 (août):29-37. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.04.018>.
- Sandre. 2014. « Dictionnaire des données - Référentiel Masses d'eau ». <https://www.sandre.eaufrance.fr/urn.php?urn=urn:sandre:dictionnaire:MDO:FRA::ressource:1.3:::pdf>.
- Sandre 2023. « Scénario d'échange géographique du référentiel hydrographique (BD Topage) ». https://www.sandre.eaufrance.fr/ftp/documents/fr/scn/topage/2.1/sandre_scenario_geo_topage_v2.1.pdf.
- Schumm, S. A. 1977. *The Fluvial System*. <https://agris.fao.org/search/en/providers/122621/records/6473a5212437ad1e5b922a62>.
- Sørensen, R., U. Zinko, et J. Seibert. 2006. « On the Calculation of the Topographic Wetness Index: Evaluation of Different Methods Based on Field Observations ». *Hydrology and Earth System Sciences* 10 (1): 101-12. <https://doi.org/10.5194/hess-10-101-2006>.
- Stanford, J. W. J., et James V. Ward. 1983. « The serial discontinuity concept of lotic ecosystems ». *Ann Arbor Science Publishers*. https://www.researchgate.net/profile/Andriy-Kovalchuk-3/post/Effecting_the_dams_construction_in_branch_rivers_and_canals_on_amount_of_water_in_reservoir_of_downstream/attachment/60168b471fe03f00010f73e7/AS%3A985991842123777%401612090182976/download/Ward+%26+Stanford_1983The_Serial_Discontinuity_Concept_Of_Lotic_Ecosystems.pdf.
- Thoms, Martin, Murray Scown, et Joseph Flotemersch. 2018. « Characterization of River Networks: A GIS Approach and Its Applications ». *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 54 (4): 899-913. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12649>.
- Torgersen, Christian E., David M. Price, Hiram W. Li, et Bruce A. McIntosh. 1999. « Multiscale Thermal Refugia and Stream Habitat Associations of Chinook Salmon in Northeastern Oregon ». *Ecological Applications* 9 (1): 301-19. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1999\)009\[0301:MTRASH\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1999)009[0301:MTRASH]2.0.CO;2).
- U.S Census Bureau. 2023. « TIGER/Line Shapefiles and TIGER/Line Files Technical Documentation ». <https://www.census.gov/programs-surveys/geography/technical-documentation/complete-technical-documentation/tiger-geo-line.html>.
- USGS. 2024a. « National Elevation Dataset (NED) ». <https://gdg.sc.egov.usda.gov/Catalog/ProductDescription/NED.html>.
- USGS 2024b. « National Elevation Dataset (NED) ». 2024. <https://gdg.sc.egov.usda.gov/Catalog/ProductDescription/NED.html>.
- Van Looy, Kris, Thierry Tormos, Jérémy Piffady, et Yves Souchon. 2014. « Le corridor fluvial : des trames déjà en place à renforcer et à protéger ». *Sciences Eaux & Territoires* Numéro 14 (2): 30-35. <https://doi.org/10.3917/set.014.0030>.
- Vannote, Robin L., G. Wayne Minshall, Kenneth W. Cummins, James R. Sedell, et Colbert E. Cushing. 1980. « The River Continuum Concept ». *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 37 (1): 130-37. <https://doi.org/10.1139/f80-017>.

- Wheaton, Joseph. 2019. « Riverscapes Consortium to Leverage Advances in Other Regions in your Regionalization ». <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11404.46727>.
- Wheaton, Joseph 2024. « Healthy Riverscapes for All ». février 1. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12177.40806>.
- Wheaton, Joseph, Fanny Arnaud, Barbara Belletti, Samuel Dunesme, et Hervé Piégay. 2022. *Opérationnalisation des Webservices du Consortium Riverscapes*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28446.20802>.
- Wheaton, Joseph, Stephen Bennett, Nick Bouwes, Jeremy Maestas, et Scott Shahverdian. 2019. *Low-Tech Process-Based Restoration of Riverscapes: Design Manual. Version 1.0*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19590.63049/2>.
- Wilkinson, Mark D., Michel Dumontier, IJsbrand Jan Aalbersberg, Gabrielle Appleton, Myles Axton, Arie Baak, Niklas Blomberg, et al. 2016. « The FAIR Guiding Principles for Scientific Data Management and Stewardship ». *Scientific Data* 3 (1): 160018. <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18>.

Table des illustrations

<i>Figure 1 : Cartographie des indicateurs de pressions dominants sur les cours d'eau à l'échelle globale.....</i>	<i>5</i>
<i>Figure 2 : Caractérisation des corridors fluviaux et pressions anthropiques</i>	<i>8</i>
<i>Figure 3 : Hierarchisation des échelles utilisées pour la planification des actions de gestion.....</i>	<i>11</i>
<i>Figure 4 : Cadre général des études en géomorphologie fluviale</i>	<i>12</i>
<i>Figure 5 : Principes FAIR</i>	<i>14</i>
<i>Figure 6 : Complexe de C.canadensis dans l'Utah.....</i>	<i>16</i>
<i>Figure 7 : Emprise spatiale des 80000 projets existants du Riverscape Consortium</i>	<i>17</i>
<i>Figure 8 : Fonctionnement en cascade des modèles du Riverscapes Consortium.....</i>	<i>20</i>
<i>Figure 9 : Fonctionnement schématique du Riverscapes Viewer.....</i>	<i>21</i>
<i>Figure 10 : Principaux objets géographiques caractérisés par VBET.....</i>	<i>30</i>
<i>Figure 11 : Classification des types de végétation selon les préférences alimentaires de C.canadensis.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure 12 : Illustrations des données en entrée du modèle de capacité de BRAT</i>	<i>33</i>
<i>Figure 13 : Carton de localisation et présentation du contexte hydrographique du bassin versant drômois.</i>	<i>39</i>
<i>Figures 14 et 15 : Echantillonnage de la largeur des tronçons en fonction de la surface drainée 1&2.....</i>	<i>50</i>

Sommaire

1. Introduction.....	4
1.1 Etat d'altération des hydrosystèmes, de la nécessité d'actions.....	4
1.2 Quelles sont les réponses apportées à ces altérations ?.....	5
1.2.1 Des approches trop longtemps centrées sur les petites ou grandes échelles spatiotemporelles, et pas assez sur les échelles intermédiaires.....	6
1.2.2 De nouvelles approches et échelles.....	6
1.3 Qu'est-ce qu'un <i>Riverscape</i> , ou corridor fluvial.....	8
1.4 L'émergence et développement de la géomatique.....	9
1.4.1 Rôle de la géomatique dans le développement des nouvelles approches des corridors fluviaux... 9	
1.4.3 La caractérisation.....	10
1.4.5 Sectorisation, agrégation et discrétisation.....	10
1.4.6 Modélisations et son importance dans les sciences de l'eau.....	10
1.4.7 Le transfert à la gestion.....	11
1.4.8 La priorisation.....	12
1.5 Limites actuelles de la géomatique et du partage de données.....	13
1.5.1 Limites de la géomatique.....	13
1.5.2 Partage des données.....	13
1.6 Notions et concepts essentiels pour la suite du rapport.....	14
1.6.1 Le Valley Bottom, ou « fond de vallée ».....	14
1.6.2 Castors.....	15
2. Objectifs et cadre du stage.....	17
2.1Présentation et contexte de l'étude.....	17
2.1.1 Le Riverscape Consortium.....	17
2.1.2 Objectifs et cadre du stage.....	17
2.1.3 Problématique.....	18
2.1.4 Hypothèses.....	18
2.2 Fonctionnement général des outils du Riverscapes Consortium.....	18
2.2.1 Principe des projets.....	19
2.2.2 Standards et compatibilité.....	19
2.2.3 Business Logic.....	19
2.2.4 La Waterfall.....	20
2.2.5 RC Viewer, QRiS et Data Exchange : les Applications du Riverscape Consortium.....	20
2.3 Données utilisées aux Etats-Unis.....	21
2.3.1 Données hydrologiques.....	22
2.3.1.1 National Hydrographic Dataset Plus High Resolution.....	22
2.3.1.2 Les bassins versants.....	22
2.3.1.3 National Streamflow Statistics.....	23

2.3.2 Données topographiques	23
2.3.3 Données anthropiques.....	23
2.3.3.1 Transports.....	23
2.3.3.2 Foncier	24
2.3.3.2.1 Régime de propriété.....	24
2.3.3.2.2 Valeur foncière	24
2.3.3.3 Frontières administratives et politiques.....	24
2.3.4 Données climatiques.....	24
2.3.5 Données relatives à la végétation et l'occupation du sol	24
2.3.6 Données géologiques.....	26
2.3.7 Ecorégions.....	26
2.4 Les modèles.....	26
2.4.1 Riverscapes Context.....	27
2.4.2 Channel Area Tool	27
2.4.3 Terrain Analysis Using Digital Elevation Models (TauDEM).....	28
2.4.4 Valley Bottom Extraction Tool (VBET)	29
2.4.5 Anthropogenic context.....	30
2.4.6 Beaver Restoration Assessment Tool	31
2.4.7 Riparian condition assessment tool RCAT.....	34
3. Analyse critique et réflexion quant à l'application des outils du Riverscape Consortium sur le contexte français.....	34
3.1 Généralités.....	34
3.2 Outil par outil.....	35
3.2.1 Riverscapes Context.....	35
3.2.2 Channel Area Tool	35
3.2.3 TauDEM	35
3.2.4 VBET.....	36
3.2.5 Anthropogenic Context	36
3.2.6 BRAT.....	37
3.2.7 RCAT.....	37
3.3 Comparaison avec des modèles existants, différences architecturales et de construction.....	38
4. Etude de cas et application sur le bassin versant de la Drôme.....	39
4.1 Site et contexte.....	39
4.2 Constitution de la base de donnée utilisée.....	40
4.2.1 Recherche des données et formation du « National Dataset ».....	40
4.2.2 Données hydrologiques.....	41
4.2.3 Topographie.....	42
4.2.4 Végétation et occupation du sol	42
4.2.5 Transports	44

4.2.6 Frontières administratives	45
4.2.7 « Foncier »	45
4.2.8 Géologie	46
4.2.9 Ecorégions.....	46
4.2.10 Climat	46
4.2.11 Géotraitement.....	47
4.3 Protocole suivi pour adapter les modèles	47
4.3.1 Constitution du Riverscape Context Project pour le bassin versant de la Drôme.....	47
4.3.2 Traitement des données sur le bassin versant de la Drôme et modification de certains paramètres.	48
4.3.2.1 Surface drainée.....	48
4.3.2.2 Equation hydrologique de pleins bords	49
4.3.4 Modifications des scripts communes à tous les modèles	50
4.3.4.1 Modification des scripts python	50
4.3.4.2 Modification des configurations et de la description des couches.....	51
4.3.5 Modifications spécifiques aux modèles	52
4.3.5.1 Channel Area Tool (C.A.T.).....	52
4.3.5.2 TauDEM.....	52
4.3.5.3 VBET.....	52
4.3.6 Business logics et symbologies, créations de nouveaux types de projets français.....	53
4.4 Résultats	53
5. Limites, recommandations et discussions.....	54
5.1 Limites générales des modèles.....	54
5.2 Limites de l'adaptation des modèles au contexte français	56
5.3 Prospectives du projet	56
5.3.1 BRAT.....	57
5.3.2 RCAT	58
5.4 Réflexions quant à l'enrichissement des modèles (ROE, Carhab, Syrah-ce).....	58
5.4.1 Syrah-ce et ROE.....	58
5.4.2 Modélisation de la dispersion	59
5.4.3 Anthropogenic context.....	60
5.4.4 Occupation du sol.....	60
5.5 Prospectives de recherche et recommandations.....	60
Conclusion	61
Bibliographie	63
Table des illustrations	68
Annexes	73

Annexes

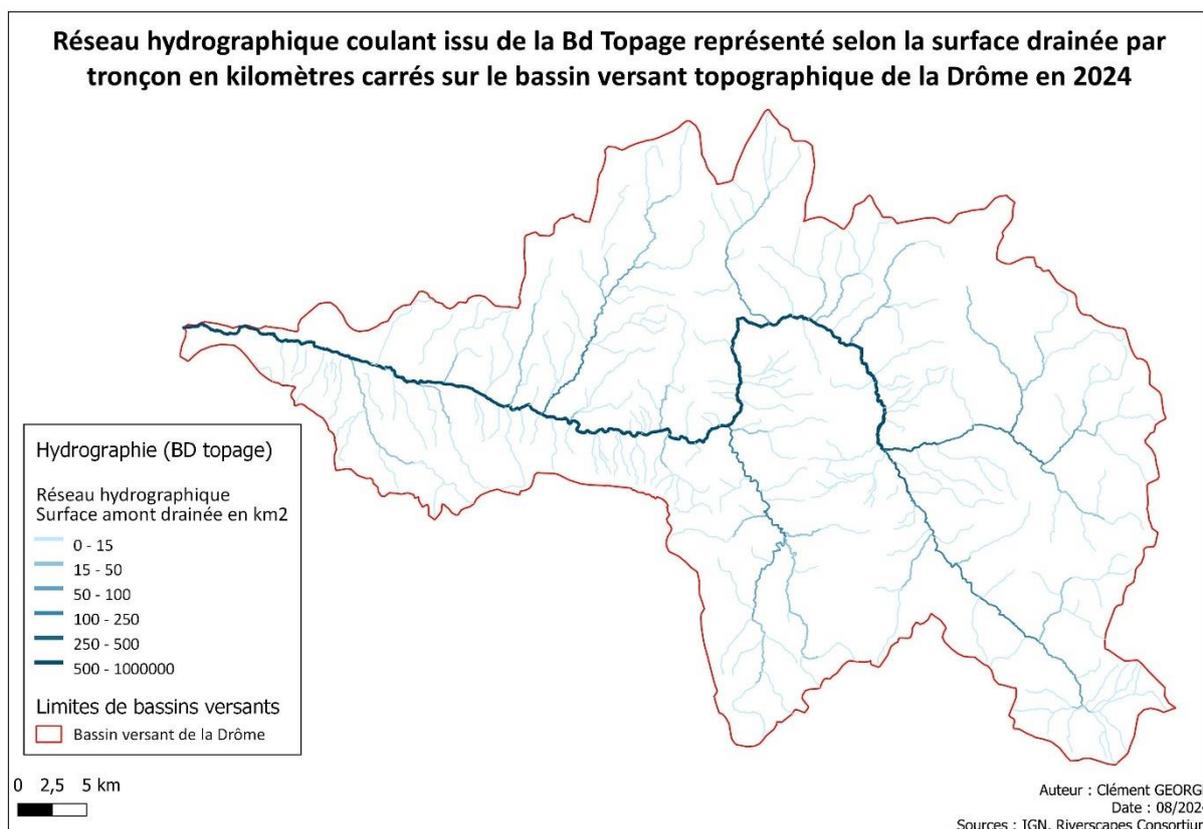
[Annexe 1](https://drive.google.com/drive/folders/19HjjZbQOVV4Y7DK3GxOW_BDJxjJ3o0hM?usp=sharing) : Lien vers une version stockée sur Google Drive du répertoire contenant les versions françaises des modèles en l'état. Dans le sous-dossier Workspaces, puis Data, se trouvent les projets pour le bassin versant de la Drôme et ses 9 sous-bassins versants : https://drive.google.com/drive/folders/19HjjZbQOVV4Y7DK3GxOW_BDJxjJ3o0hM?usp=sharing

[Annexe 2](https://www.riverscapes.net/) : Lien vers le site internet du Riverscapes Consortium : <https://www.riverscapes.net/>

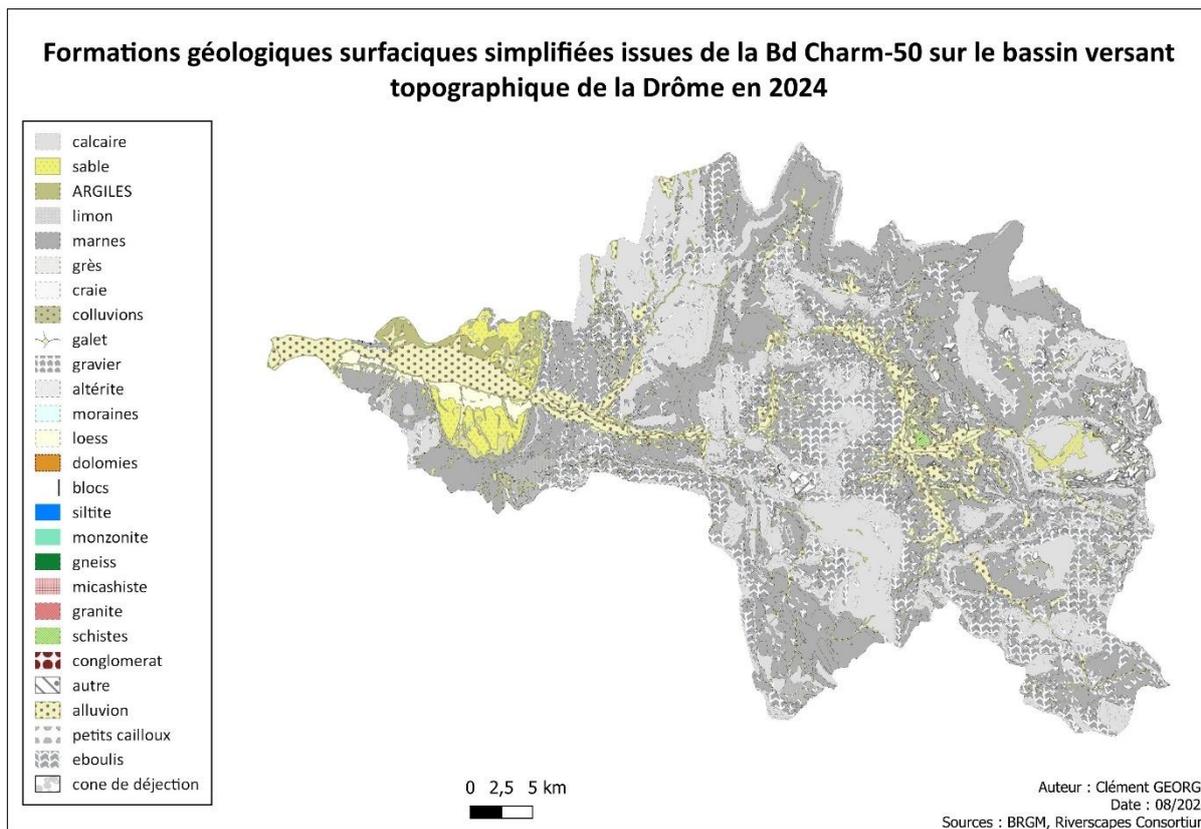
[Annexe 3](https://data.riverscapes.net/) : Lien vers le *Data Exchange* : <https://data.riverscapes.net/>

[Annexe 4](https://github.com/Riverscapes/riverscapes-tools) : Répertoire GitHub contenant l'ensemble des scripts relatifs aux modèles du R.C : <https://github.com/Riverscapes/riverscapes-tools>

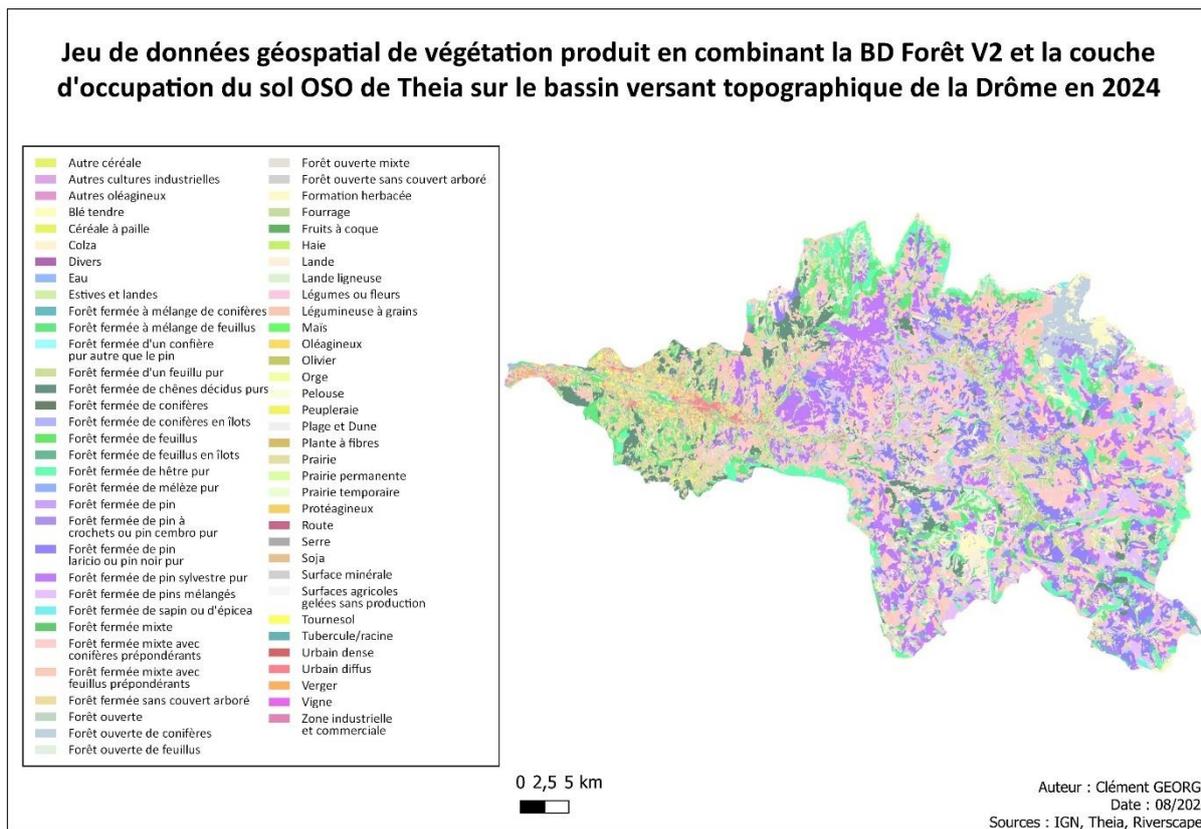
[Annexe 5](#) : Réseau hydrographique coulant issu de la Bd Topage représenté selon la surface drainée par tronçon en kilomètres carrés sur le bassin versant topographique de la Drôme en 2024



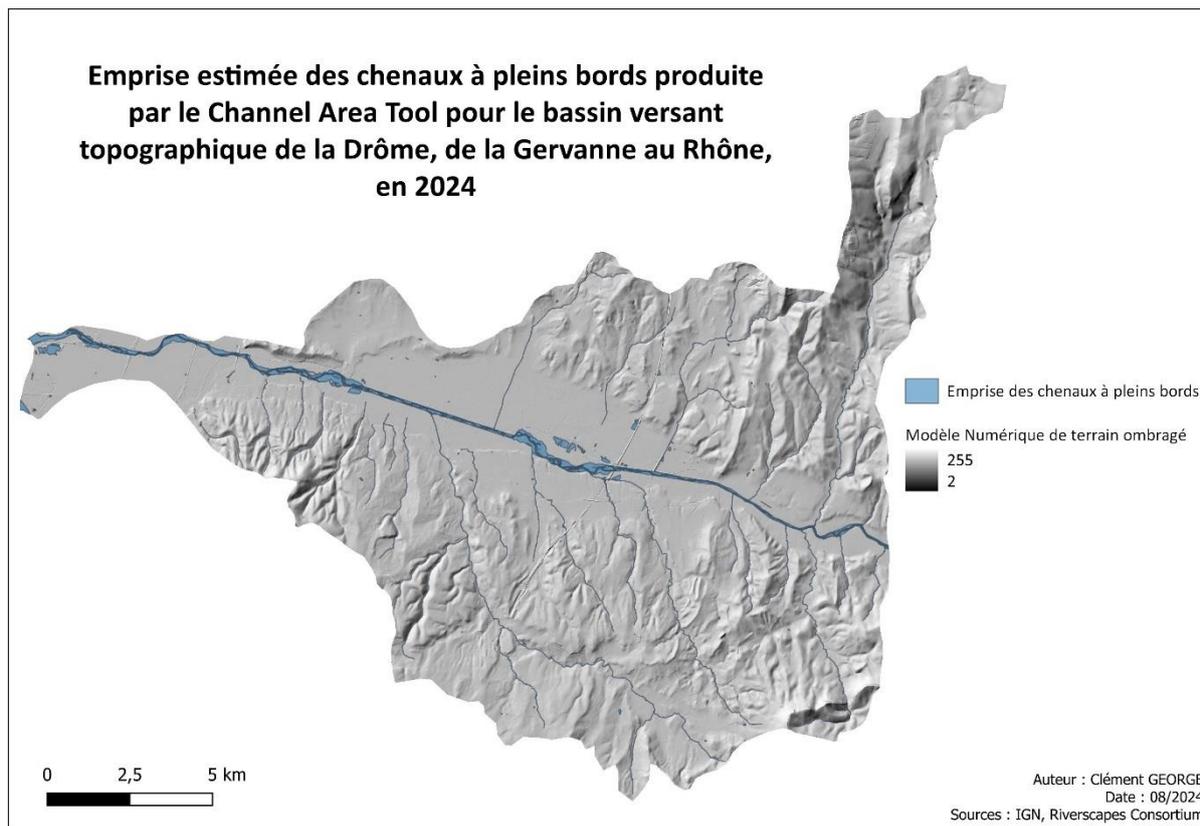
Annexe 6 : Formations géologiques surfaciques simplifiées issues de la Bd Charm-50 sur le bassin versant topographique de la Drôme en 2024



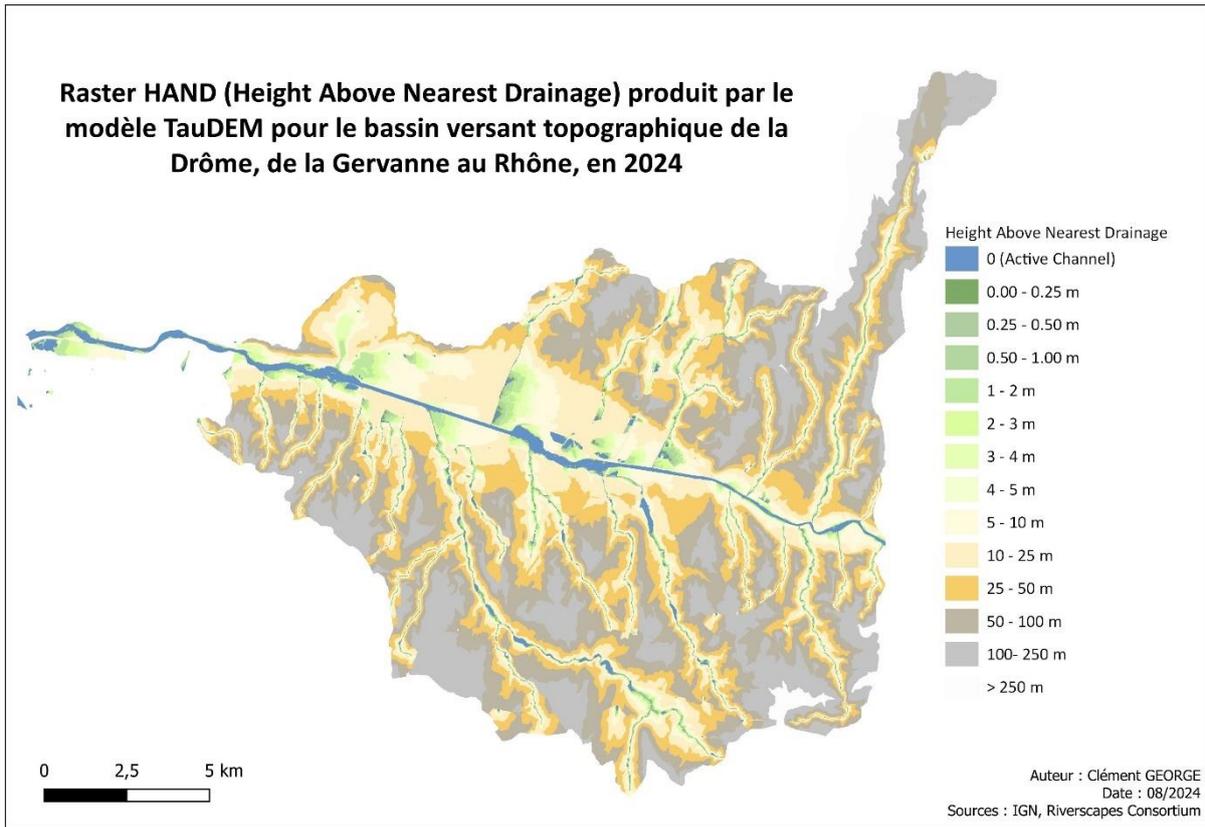
Annexe 7 : Jeu de données géospatial de végétation produit en combinant la BD Forêt V2 et la couche d'occupation du sol OSO de Theia sur le bassin versant topographique de la Drôme en 2024



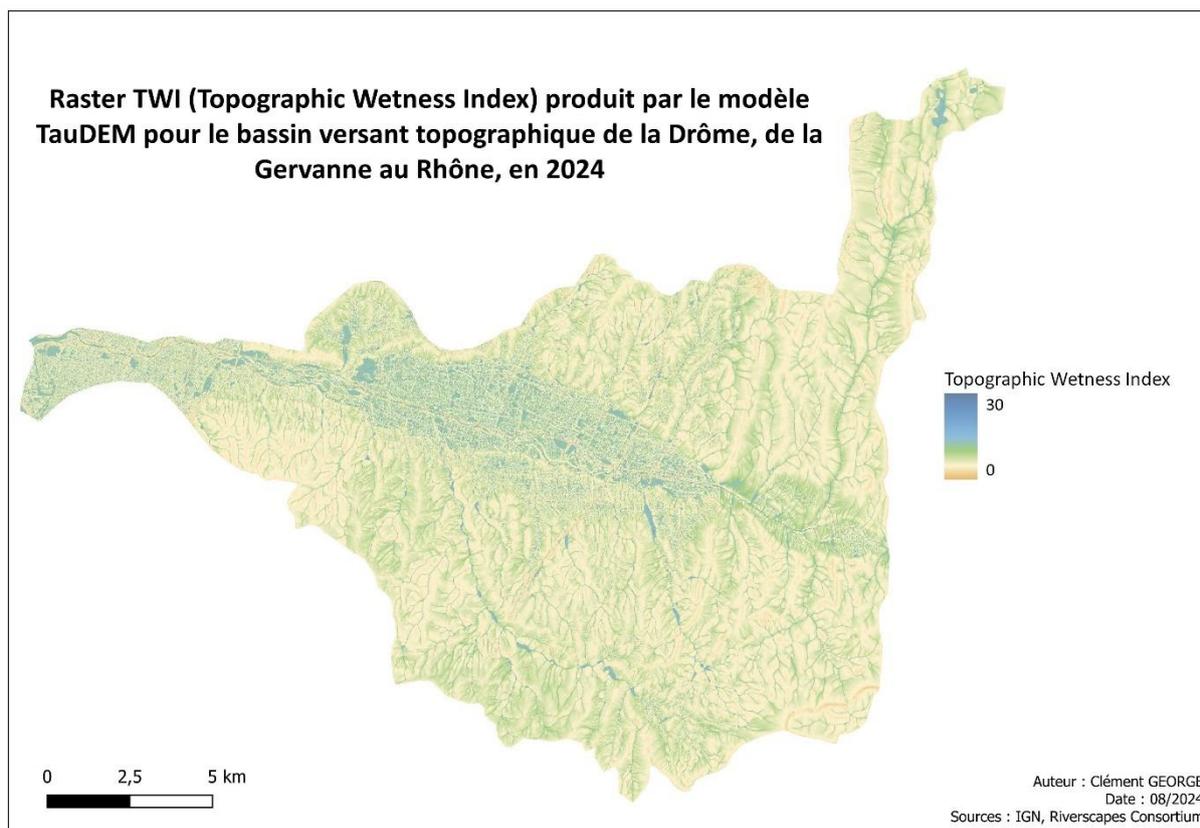
Annexe 8 : Emprise estimée des chenaux à pleins bords produite par le Channel Area Tool pour le bassin versant topographique de la Drôme, de la Gervanne au Rhône, en 2024



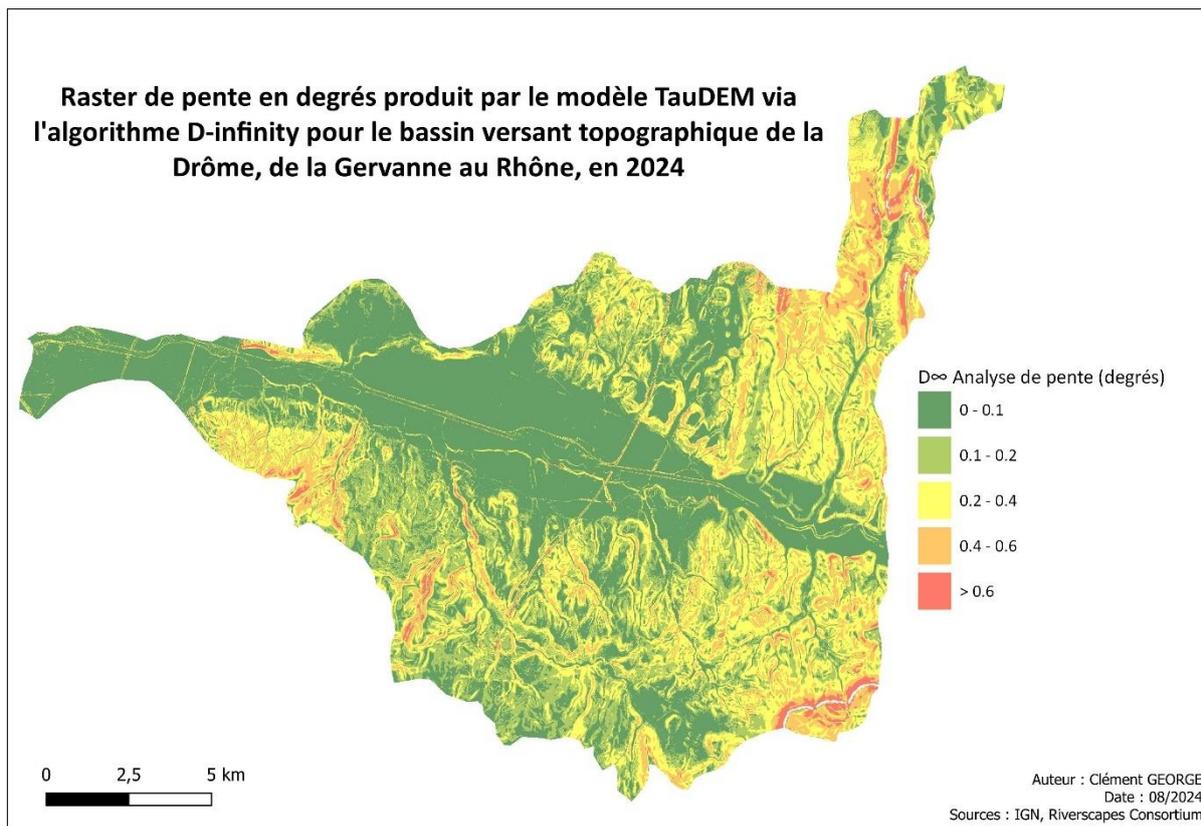
Annexe 9 : Raster HAND (Height Above Nearest Drainage) produit par le modèle TauDEM pour le bassin versant topographique de la Drôme, de la Gervanne au Rhône, en 2024



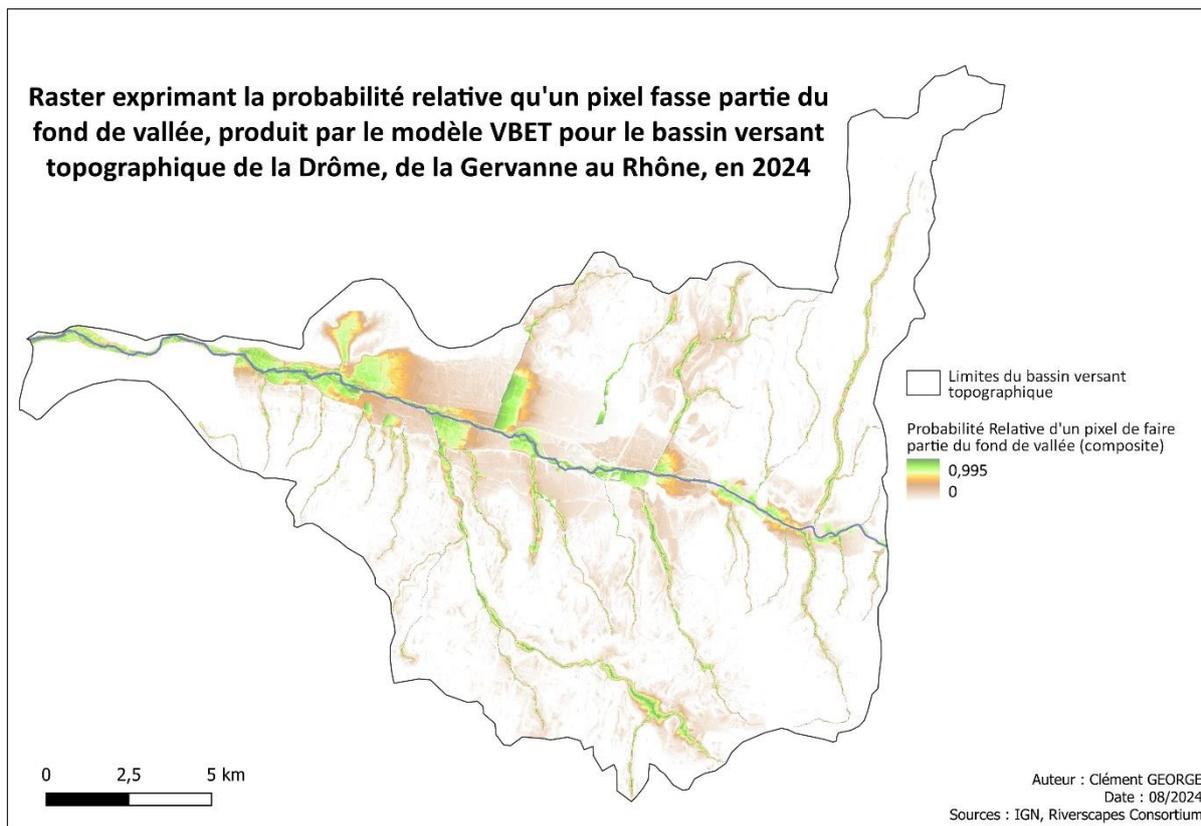
Annexe 10 :Raster TWI (Topographic Wetness Index) produit par e modèle TauDEM pour le bassin versant topographique de la Drôme, de la Gervanne au Rhône, en 2024



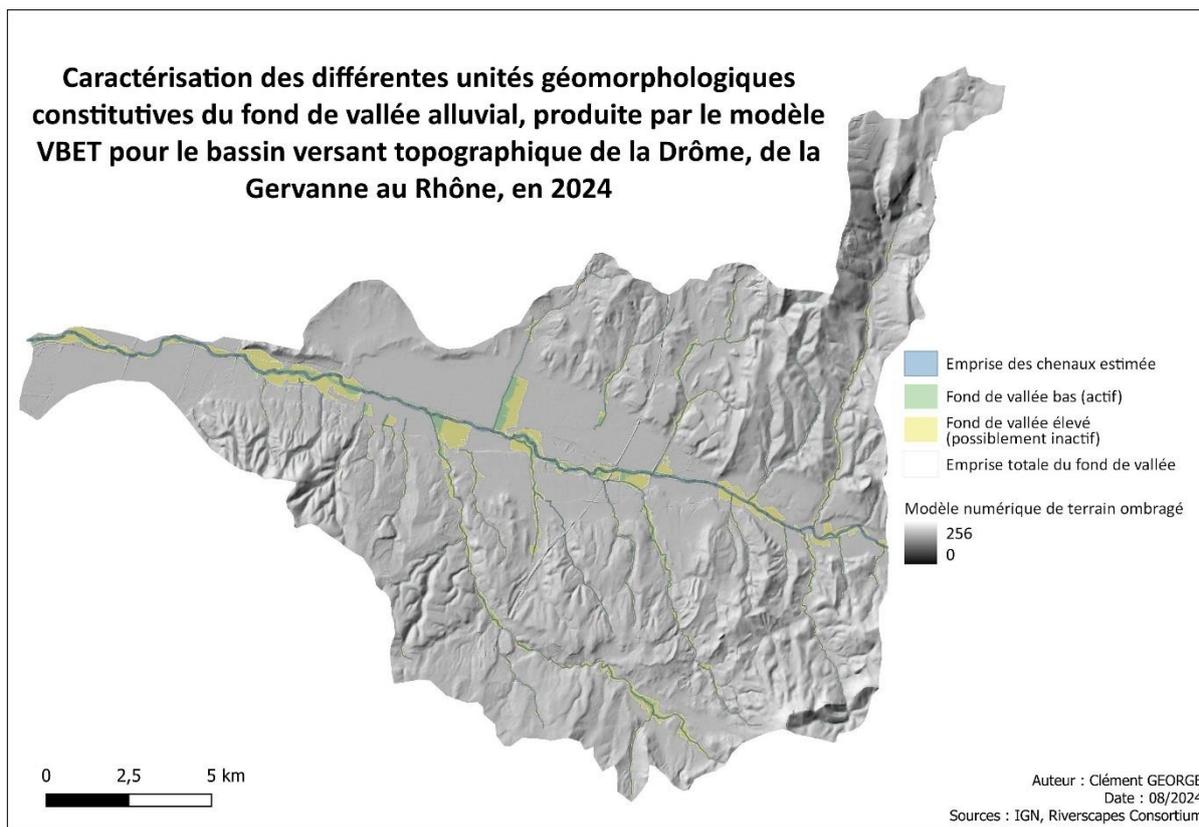
Annexe 11 : Raster de pente en degrés produit par le modèle TauDEM via l'algorithme D-infinity pour le bassin versant topographique de la Drôme, de la Gervanne au Rhône, en 2024



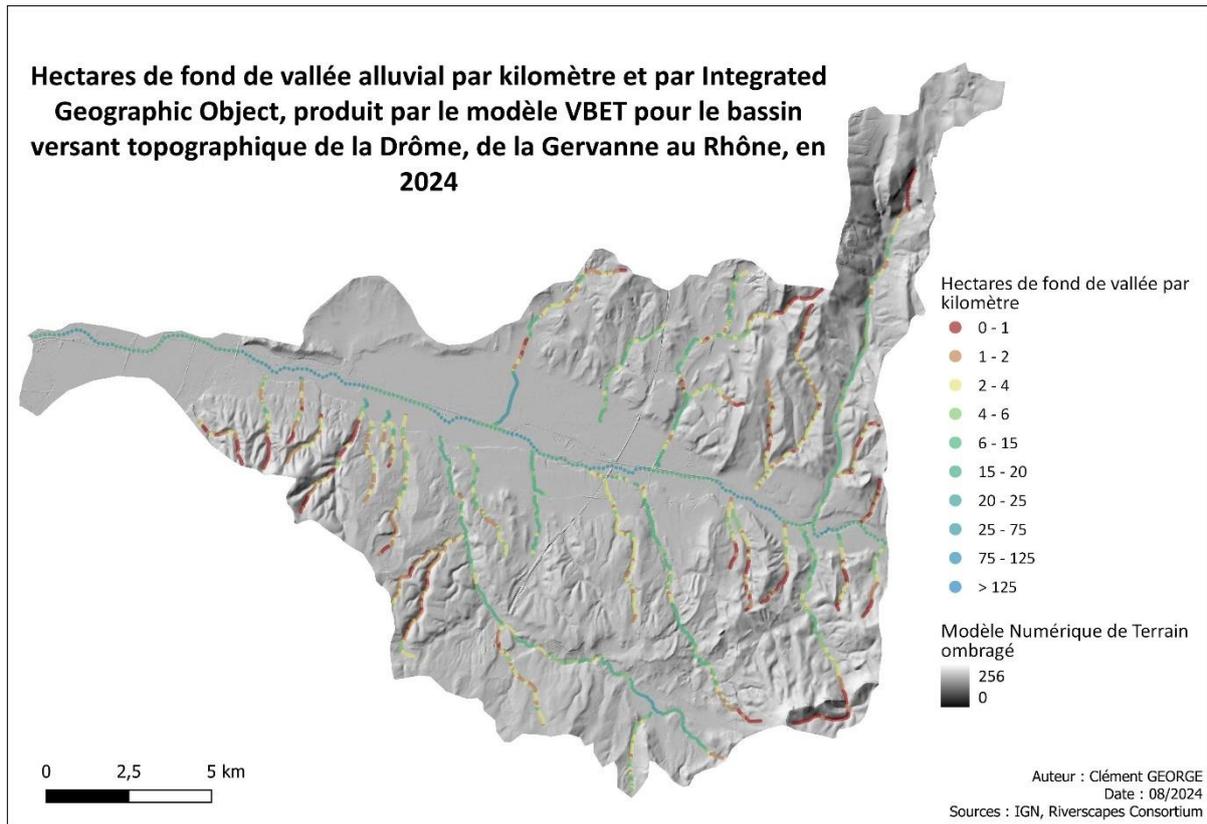
Annexe 12 : Raster exprimant la probabilité relative qu'un pixel fasse partie du fond de vallée, produit par le modèle VBET pour le bassin versant topographique de la Drôme, de la Gervanne au Rhône, en 2024



Annexe 13 : Caractérisation des différentes unités géomorphologiques constitutives du fond de vallée alluvial, produite par le modèle VBET pour le bassin versant topographique de la Drôme, de la Gervanne au Rhône, en 2024



Annexe 14 : Hectares de fond de vallée alluvial par kilomètre et par Integrated Geographic Object, produit par le modèle VBET pour le bassin versant topographique de la Drôme, de la Gervanne au Rhône, en 2024



Annexe 15 : Proportion du fond de vallée élevé (potentiellement inactif) par Discrete Geographic Object, produit par le modèle VBET pour le bassin versant topographique de la Drôme, de la Gervanne au Rhône

