

Rapport de stage individuel

4^{ème} Année

Modélisation de la trame turquoise

Syndicat de rivière Brévenne Turdine
117 Rue Pierre Passemard, 69210 L'Arbresle



Tutrice entreprise :
Betty Cachot
Directrice

Tuteur académique :
⁴⁷
Vincent Rotge

Cédric Debrabant
[Étudiant]
IMA
2022-2023

Table des matières

Table des figures	2
Table des tableaux	2
Table des équations	2
1. Présentation de la structure d'accueil	3
2. Contexte de la mission	3
3. Mission confiée	4
4. Matériels et sources de données	5
4.1 Logiciels	5
4.2 Données	5
5. Pré-traitement	5
5.1 Création de la carte d'occupation du sol	6
5.1.1 Création des couches individuelles	6
5.1.2 Hiérarchisation des couches	7
5.1.3 Fusion des couches d'occupation du sol et rastérisation	9
5.1.4 Critique des données	9
5.2 Choix des espèces cibles	10
5.2.1 Définition	10
5.2.2 Première sélection	11
5.2.3 Seconde sélection	11
5.3 Calcul des coefficients de friction	12
5.3.1 Définition	12
5.3.2 Création des classes de perméabilité	13
5.3.3 Calcul du coefficient de résistance minimal et maximal	13
5.3.4 Calcul des coefficients de résistance pour chaque classe de milieu	14
5.3.5 Classement des occupations du sol dans les classes de perméabilité	15
5.4 Rastérisation et création des cartes de friction avec Biodispersal	16
6. Modélisation des dispersions et calcul des métriques	18
6.1 Paramétrage des taches d'habitats	18
6.1.1 Définition	18
6.1.2 Type de connexité topologique	18
6.1.3 Quels habitats pour les taches	18
6.1.4 Taille minimale des habitats	19
6.1.5 Capacité des habitats	19
6.2 Paramétrage du jeu de liens	20
6.2.1 Modes de calcul des liens	20
6.2.2 Type de topologie	20
6.3 Paramétrage du graphe	21
6.4 Choix des métriques de connectivité et paramètres	22
7. Résultats des graphes et métriques	24
7.1 Les modélisations qui n'ont pas pu être réalisées	24
7.2 Les modélisations ayant fonctionné	25
7.2.1 Résultats des métriques BC, IF et dPC	26
7.2.2 Métrique « ajout de tache »	28
7.2.3 Pertinence des cartes de résultat	29
8. Conclusion	31
Bibliographie	33

Annexes	36
Annexe 1 : Précisions concernant les données utilisées	36
Annexe 2 : Explications précises des modifications des couches d'occupation du sol	38
Annexe 3 : Espèces cible choisies et toute leurs caractéristiques	40
Annexe 4 : Précisions concernant les étapes de modélisation sous Biodispersal.....	41
Annexe 5 : description précise de chaque métrique utilisée dans Graphab.....	42
Annexe 6 : Carte montrant les espaces à protéger du bassin versant, en lien avec la trame turquoise, sortante de la modélisation du Bufo bufo.....	45
Annexe 7 : Carte montrant les espaces à protéger du bassin versant, en lien avec la trame turquoise, sortante de la modélisation du Triturus cristatus.	46
Annexe 8 : Résultat de la métrique « ajout de tache » pour le Triturus cristatus	47
Annexe 9 : Problèmes rencontrés et solutions apportées	0

Table des figures

Figure 1: Schéma explicatif du choix de hiérarchisation des couches d'occupation du sol	8
Figure 2: Couche finale d'occupation du sol	9
Figure 3: Exemple d'un cours d'eau souterrain (donnée issue d' l'IGN) par comparaison avec l'image de référence (©2023 Google maps) 10	
Figure 4: Etapes de modélisation sous Biodispersal, pour la rasterisation de la couche d'occupation du sol et la création des cartes de friction	17
Figure 5: Représentation des deux types de connexité pour la création des taches d'habitats : la connexité 4 (A), et la connexité 8 (B) (C.Gaber, 2019).....	18
Figure 6: Exemple de cours d'eau discontinu	19
Figure 7: Type de déplacement par distance de coût cumulé (C. gaber, 2021).....	20
Figure 8: Illustration des deux types de topologie : La topologie planaire (A) et complète (B).	20
Figure 9: Exemple du résultat de dispersion du Bufo bufo	21
Figure 10: Exemple d'un graphe des tâches d'habitats selon leur capacité, ici pour le Bufo bufo, sur la communauté de communes de l'Ouest Rhodanien (A) en comparaison avec la carte d'occupation des sols (B)	22
Figure 11: Exemple de différence entre tache d'habitat et polygones créés pour les résultats de dPC du Bufo bufo	27
Figure 12: Echantillon de la carte de résultat de la métrique dPC pour le Bufo bufo.....	27
Figure 13: Grille vecteur de résolution 50x50 utilisée pour la métrique "ajout de tache"	28
Figure 14: Résultats de la métrique "ajout de tache"	29
Figure 15: Exemple de routes bloquantes (avant (A) et après (B) application de tampons), et de routes traversables (C).	38
Figure 16: Exemple d'un schéma présentant une tache avec une grande valeur B.C. (Clauzel et al., 2020)	42
Figure 17: Exemple de la signification des valeurs de la métrique I.F. (Clauzel et al., 2020)	42

Table des tableaux

Tableau 1: Tableau récapitulatif des avantages et inconvénients des sources de données utilisées.....	5
Tableau 2: Occupation du sol et leurs sources de données	6
Tableau 3: Modifications apportée aux couches d'occupation du sol.....	7
Tableau 4: Espèces utilisables dans le cadre d'une étude sur la trame turquoise	11
Tableau 5: Espèces cibles choisies et leurs caractéristiques	12
Tableau 6: Coefficients de résistance minimal et maximal pour chaque espèce cible	14
Tableau 7: Coefficient de friction et distance maximale de chaque espèce et milieu	15
Tableau 8: Classement des perméabilités des occupations du sol pour chaque espèce cible.....	16
Tableau 9: Coefficients de frictions pour chaque occupation du sol, pour chaque espèce	17
Tableau 10: Distance maximale, en coût, pour chaque espèce cible, pour chaque zone d'étude.....	21
Tableau 11: Présentation des métriques utilisées	23
Tableau 12: Classes de contribution des taches d'habitats à la connexité globale pour la métrique dPC.....	26
Tableau 13: Caractéristiques des 4 espèces cibles choisies	40
Tableau 14: Récapitulatif des problèmes majeurs rencontrés et des solutions apportées	0

Table des équations

Équation 1: Algorithme d'accumulation de coûts	12
Équation 2: Distance maximale de déplacement d'une espèce	13

1. Présentation de la structure d'accueil

Mon stage s'est effectué au sein du Syndicat de Rivières Brévenne Turdine (SYRIBT), situé dans l'ouest Lyonnais, à l'Arbresle. Créé en 2006, le SYRIBT est un syndicat mixte, regroupant des Établissements Publics de Coopération Intercommunales. Sous la direction de Mme Betty Cachot, l'équipe du SYRIBT a pour mission la gestion solidaire et concertée des cours d'eau de son périmètre d'intervention : le bassin versant des rivières Brévenne et Turdine. Cette équipe est composée de six membres ayant chacun ses compétences propres : Mme Ribon, chargée de mission Gestion des inondations, Mme Garcia, chargée de mission gestion quantitative, Mr Chazal et Mr Richard, techniciens de rivière, Mme Generet, assistante de direction et Mme Cachot, directrice. Ils coordonnent ainsi leurs compétences pour mener des actions dans plusieurs domaines :

- Le pilotage, suivi et évaluation des programmes d'actions : Contrat de rivières, Programme d'Actions de Prévention des Inondations, Plan de Gestion de la Ressource en Eau...
- La mise en œuvre d'opérations thématiques : gestion solidaire et concertée de l'eau, restauration et entretien de la végétation des bords de cours d'eau, travaux de restauration d'aménagement et de gestion écologique et piscicole, travaux de gestion d'inondations.
- La direction d'études pour une meilleure connaissance des rivières du territoire, abordant les thèmes de l'hydrologie (débit des cours d'eau et fonctionnement à l'étiage et en crue), de l'hydraulique (transport sédimentaire et continuité des milieux aquatiques) ainsi que de l'état écologique (qualité physico-chimique de l'eau, population piscicole).
- La sensibilisation des populations et différents acteurs locaux aux enjeux de l'eau : communication liée aux programmes d'actions, informations sur le fonctionnement, la protection et la gestion des milieux aquatiques, animations pédagogiques.

L'équipe du syndicat m'a donc accueilli, aiguillé et aidé pour la réalisation de ma mission, et m'a partagé ses savoirs et compétences afin d'enrichir mes connaissances.

1. Contexte de la mission

Le paysage d'un territoire se compose d'un ensemble d'habitats, formant des réseaux de continuités écologiques terrestres et aquatiques. Ceux-ci s'inscrivent dans ce qu'on appelle les trames **vertes** et **bleues**, concepts définis dans les années 1980 – 1990 en France, visant à l'amélioration de l'état des espaces naturels, des espèces et des masses d'eau. Alors que jusqu'à récemment ces deux trames étaient les principales étudiées (la trame verte concernant les réseaux terrestres et la trame bleue aquatiques), une nouvelle trame, la trame **turquoise**, a récemment été étudiée. L'étude des corridors entre les milieux terrestres et aquatiques sont essentiels, notamment pour la préservation des espèces utilisant ces deux types de milieux au cours de leur cycle biologique. Ainsi, la trame turquoise étudie ces corridors et constitue alors un sous-ensemble à l'interface des trames vertes et bleues.

De manière plus générale, la trame turquoise est un concept élaboré par l'AERMC (Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse) pour définir un espace nécessaire au développement de la biodiversité aquatique et humide. La trame turquoise est composée d'espaces naturels

humides (cours d'eau, pelouses humides, prairies humides, forêt alluviale...) ainsi que des formations végétales linéaires ou ponctuelles (haies, ripisylve, bosquets...). Elle lie des ensembles d'habitats nécessaires au bon accomplissement des cycles biologiques des espèces liées à l'eau et leur permet de circuler entre ces différents habitats de vie (habitat de reproduction, d'alimentation, d'hivernage, de repos, etc.).

Dans un contexte de volonté de protection de la biodiversité, les autorités publiques ont un besoin d'informations concernant la trame turquoise : il leur est important d'identifier les espaces sensibles humides et secs. En effet, les espèces ayant besoins de milieux humides et secs sont bien souvent menacées. Par exemple, les amphibiens sont le groupe d'espèces le plus menacé au monde d'après l'AERMC. Après définition de l'enveloppe de la trame turquoise, une analyse permet alors l'identification des fonctionnalités des milieux qui la composent ainsi que leur connectivité. Ces informations permettent alors aux autorités publiques de guider les choix pour les futurs projets et aménagements, et de fixer des objectifs de restauration et de préservation. Le concept de trame turquoise étant relativement récente, les informations et études à son sujet sont peu nombreuses, et nécessitent d'être réalisés sur l'ensemble du territoire français.

2. Mission confiée

Sur le territoire du SYRIBT, c'est-à-dire les bassins versants Brévenne et Turdine, les travaux sur la trame turquoise n'ont pas encore été effectués. Il y a donc un réel besoin des autorités publiques, notamment du SYRIBT, d'avoir les résultats d'une analyse de cette trame pour diriger les plans de protection et de restauration écologiques.

L'objectif du stage est donc de réaliser une étude de la trame turquoise sur l'ensemble des bassins versants Brévenne et Turdine, afin de produire une cartographie des fonctionnalités des milieux et des espaces clés pour les espèces du bassin. Cette étude se basera sur des modélisations des dispersions d'espèces cibles choisies de manière à représenter le plus d'espèces possibles, dispersions qui seront par la suite analysées selon des théories des graphes en identifiant des espaces majeurs de dispersion d'espèces et en analysant leurs connectivités. Le déroulement du stage se fait alors en cinq étapes :

- La production d'une couche SIG précise des occupations du sol des bassins versants étudiés ;
- Le choix motivé et pertinent de plusieurs espèces cibles dites « parapluies », permettant de représenter le plus grand nombre d'espèces présentes sur le territoire ;
- La modélisation des dispersions de ces espèces au sein du domaine d'étude avec l'extension Biodispersal du logiciel Qgis et Graphab ;
- L'analyse des dispersions, à l'aide de théories de graphes du logiciel Graphab ;
- La production de la cartographie livrable.

Cette cartographie sera ensuite mise à disposition des autorités publiques et permettra d'identifier les espaces à restaurer et préserver, et servira de document d'appui pour des choix concernant des projets d'aménagement du territoire.

3. Matériels et sources de données

3.1 Logiciels

Pour la réalisation de la mission, plusieurs logiciels ont été utilisés et sont présentés ci-dessous.

- Qgis : Le logiciel Qgis est un logiciel de traitement SIG permettant la gestion d'informations géographiques et la création de cartographie. Il a notamment permis la création de la couche d'occupation des sols utilisée pour les modélisations, et a servi de support pour l'utilisation d'une de ses extensions : Biodispersal.
- Biodispersal : Biodispersal est une extension gratuite de Qgis, ayant été créée pour répondre à un besoin de développer un outil SIG libre et gratuit à destination des acteurs de la TVB (Trame Verte et Bleue), émis par le Centre de ressources Trame verte et bleue (Chailloux, 2020). Il a permis la rastérisation des couches SIG d'occupation du sol, et la création de carte de friction, en utilisant des informations liées aux caractéristiques des espèces et à l'occupations du sol.
- Graphab : Le logiciel Graphab permet de modéliser les réseaux écologiques à partir de la théorie des graphes. Il a permis, à partir des données d'occupation du sol et de friction, de modéliser les dispersions des espèces et de représenter par des graphes les réseaux d'habitats et de connectivité des milieux.

3.2 Données

Les différentes étapes des modélisations ont suscité l'utilisation de nombreuses données, résumées dans le tableau récapitulatif ci-dessous. Des informations complémentaires pour chaque source de donnée sont fournies en annexe 1.

Tableau 1: Tableau récapitulatif des avantages et inconvénients des sources de données utilisées

Sources	CORINE LAND COVER	IGN	OSCOM	INRAE	RPG	INPN	Données PLU
Avantages	Contient toutes les occupations du sol	Données récentes (2020-2021) et mises à jour	Données extrêmement précises sur l'ensemble des occupations du sol	Données très précises concernant les zones humides	Données très précises concernant les zones de cultures	Données très précises sur la biodiversité et régulièrement mises à jour	Données précises locales sur le réseau hydrographique
Inconvénients	Données très peu précises	Données souvent imprécises	Données anciennes (2013)	Données anciennes (2014)	Dernière mise à jour en 2021		Les autres données présentent des erreurs SIG

4. Pré-traitement

Afin de préparer les modélisations de dispersions, plusieurs étapes sont nécessaires, pour obtenir toutes les informations et données nécessaires à celles-ci.

5.1 Création de la carte d'occupation du sol

5.1.1 Création des couches individuelles

La première étape du pré-traitement, c'est-à-dire la préparation des outils et données qui seront utilisés pour les modélisations, est la création de la couche d'occupation du sol. Celle-ci est primordiale : elle sera le support de base des modélisations de dispersion. Le but est alors d'utiliser les différentes données à disposition présentées ci-dessus pour créer une carte précise, fiable, et adaptée à des modélisations de dispersion (ce qui se traduit notamment par la hiérarchisation des éléments du sol, qui sera présentée plus bas). Toute la création de cette couche d'occupation du sol est effectuée sur le logiciel Qgis.

Pour commencer, il est important d'établir la zone d'étude dans laquelle les modélisations auront lieu. Cette zone d'étude permettra alors de découper les différentes couches d'occupation du sol pour ne garder que les informations nécessaires. Cette zone d'étude concerne donc **l'ensemble du bassin versant Brévenne-Turdine ainsi qu'un tampon d'un kilomètre autour de celui-ci**, afin d'intégrer à l'étude les différents corridors et interactions entre le bassin versant et les territoires à ses limites.

Pour commencer, il a d'abord été nécessaire de produire une couche en format vecteur (formée de polygones et autres entités géométriques) pour chaque occupation du sol en prenant en compte toutes les données disponibles pour celles-ci présentées en partie 4.2.1. Une réflexion a été menée pour chaque couche vecteur, par rapport à la sélection des données utilisées pour celle-ci. En effet, les différentes sources de données disponibles donnent souvent les mêmes types d'informations, mais à des précisions différentes. Par exemple, la couche CORINE Land Cover permet d'avoir une vision globale sur la répartition des occupations du sol sur le territoire national, mais manque parfois de précision. A l'inverse, les données des PLU donnent des données à beaucoup plus faible échelle (échelle communale) mais beaucoup plus précises. Le principe est donc de croiser les sources de données pour optimiser la précision de chaque couche. Chaque couche créée ainsi que les données utilisées sont ainsi présentées ci-dessous.

Tableau 2: Occupation du sol et leurs sources de données

	Forêt	Routes	Haies	Réseau hydrographique	Zones humides	Zones urbanisées	Prairies	Cultures annuelles
Données utilisées	CORINE Land Cover et BD TOPO 2020	OSCOM 2013 et ROUTE 500® édition 2021 de la BD CARTO®	BD TOPO 2020	BD TOPO 2020 et PLU	INRAE 2014	OSCOM 2013	Espaces qui n'appartiennent à aucune autre occupation du sol	RPG 2021

Cependant, certaines couches ont été sujets à des modifications pour une meilleure précision et utilisation lors des modélisations. Ces modifications sont résumées dans le tableau 3 ci-dessous. Cependant, tous les choix et explications précises sont présentés en annexe 2.

Tableau 3: Modifications apportée aux couches d'occupation du sol

	Routes	Cours d'eau	Zones humides	Zones urbanisées	Haies	Forêts
Modification apportée n°1	Séparation en deux couches: - Les routes traversables qui permettent le passage des espèces (routes communales) - Les routes bloquantes qui ne permettent pas le passage d'espèces (autoroutes, nationales...)	Application d'un tampon proportionnel à la largeur du cours d'eau	Répartition en trois couches : - Les plans d'eau de plus de 600m ² (surface limite d'habitat pour le triton crêté, l'une des espèces cible (OFB, 2023)). - Les plans d'eau de moins de 600m ² . - Toutes les autres zones humides (ripisylve, prairie humide...).	Répartition en deux couches: - Les zones urbanisées péri-urbaines, comprenant des maisons avec jardins - Les centres-villes, ou zones urbanisées sans végétation.	Application d'un tampon de 2,5 mètres (donc créations de haies de 5,0 mètres de large)	Application d'un tampon de 2,5 mètres.
Raison	Permettre, lors des modélisation de dispersion, le passage des espèces ou non selon le type de route	Donner une largeur aux cour d'eau, étant à l'origine en format de ligne	Pouvoir différencier les plans d'eau des autres ZH, et ceux accessibles par le triton crêté.	différencier les zones urbanisées traversables par certaines espèces, notamment par le biais des jardins, des zones urbanisées bloquantes, sans végétation, telles que les centres-villes.	Donner une largeur aux haies, étant à l'origine en format de ligne	Créer une couche de lisière, en bordure de forêt
Modification apportée n°2	Application d'un tampon proportionnel à la largeur de la route	Suppression de tous les cours d'eau temporaires				
Raison	Donner une largeur aux routes, étant à l'origine en format de ligne	Eviter le blocage des espèces par des cours d'eau n'existant qu'une partie de l'année lors des dispersions				
Modification apportée n°3	Suppression des éléments routiers pouvant être évités (ponts, viaducs, tunnels).					
Raison	Assurer le passage des espèces par-dessus/dessous la route lorsque cela est possible					

5.1.2 Hiérarchisation des couches

Après définition et fabrication des différentes couches d'occupation du sol, la dernière étape est de les fusionner afin d'en produire une couche unique. Cependant, avant cette fusion, il est important de hiérarchiser les éléments afin d'éviter toutes les erreurs de géométries pouvant être générées par la fusion. La hiérarchisation s'est effectuée de manière à garder visibles les éléments les plus importants altérant la dispersion des espèces. Par exemple, lorsqu'au sein d'un même espace se chevauchent un élément de la couche « prairie » et un élément de la couche « cours d'eau », il est important que cette dernière soit hiérarchisée au-dessus de la couche prairie pour que le cours d'eau chevauché ne soit pas supprimé lors de la fusion. Ainsi, les différents éléments d'occupation du sol ont été hiérarchisés comme suit :

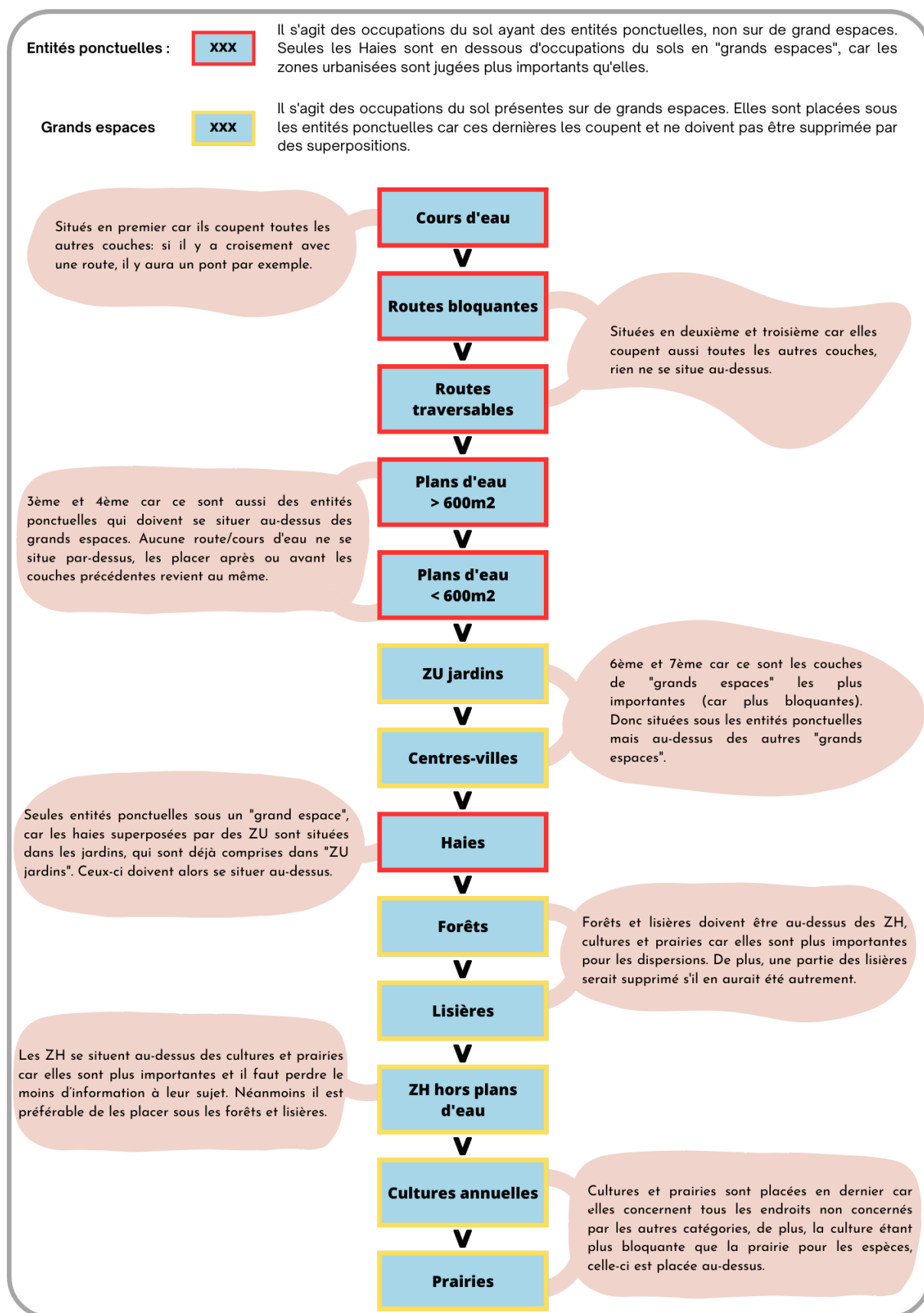


Figure 1: Schéma explicatif du choix de hiérarchisation des couches d'occupation du sol

5.1.3 Fusion des couches d'occupation du sol et rastérisation

Après hiérarchisation, les couches d'occupation du sol ont été fusionnées, puis la géométrie de la couche fusionnée a été travaillée. Les erreurs observées ont ensuite été résolues dans les couches d'occupation du sol concernées avant une nouvelle fusion. Après cette fusion, la couche sortante a ensuite été enregistrée sous format shapefile et sa symbologie a été travaillée (voir *figure 2*). La couche était alors fin prête pour la seconde étape du projet, à savoir l'utilisation de Biodispersal.

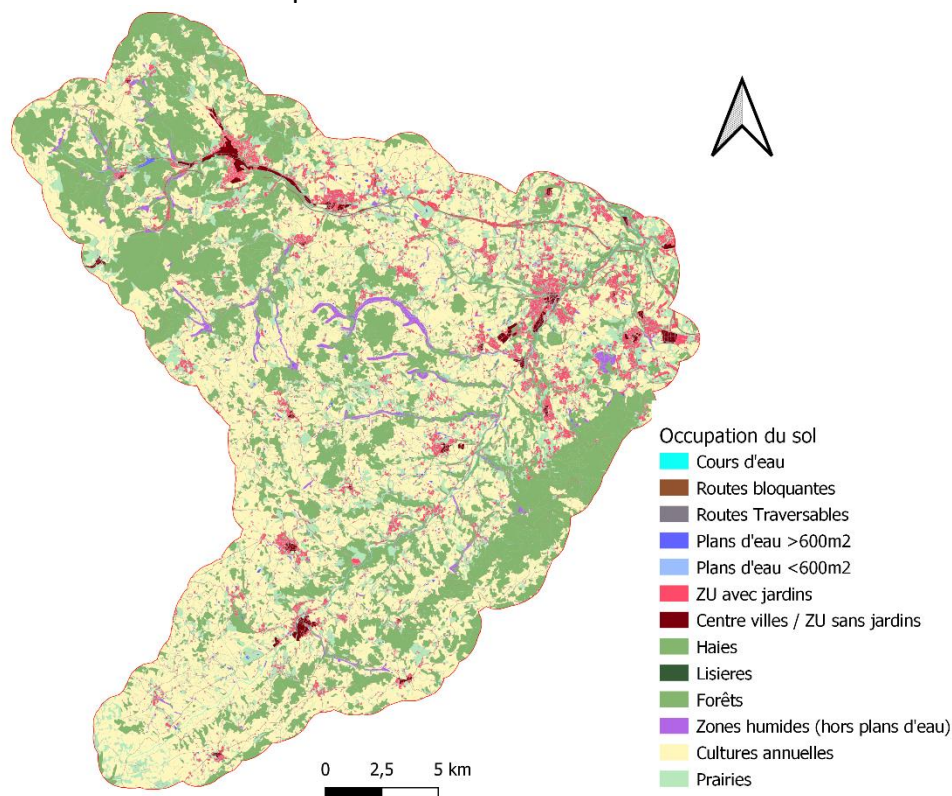


Figure 2: Couche finale d'occupation du sol

5.1.4 Critique des données

La couche d'occupation du sol est maintenant terminée, mais elle n'est pas parfaite. De nombreuses imprécisions et erreurs peuvent rendre son utilisation discutable à une certaine échelle de précision. Bien que sa précision actuelle soit assez bonne pour les modélisations prévues, les résultats finaux du projet pourront être discutés, notamment par rapport à ces limites :

Tout d'abord, les sources de données principales pour la couche d'occupation du sol sont les couches CORINE Land Cover et OSCOM. Mais celles-ci sont souvent imprécises. Bien que plusieurs couplages avec des sources de données plus précises aient été effectués, plusieurs imprécisions persistent : des zones urbanisées classifiées en prairies / forêts, des imprécisions de différenciation entre prairies et cultures, et surtout une évolution temporelle qui peut apporter beaucoup de modifications par rapport à la couche (les sources de données datant de 2018 et 2013 respectivement, beaucoup de changements se sont produits depuis).

De même, les données recueillies auprès de l'IGN sont parfois très imprécises. Dans les couches de données de voirie et de réseau hydrographique, nombreux/ses sont les routes et cours d'eau parfois incomplets, coupés, ou manquants (spécifiquement les petit(e)s, comme les voiries communales et les ruisseaux). De plus, certains cours d'eau apparaissent sur la couche, mais pas sur la donnée de référence de comparaison (ici Google satellite), cela est dû à la représentation de réseau hydrographique souterrain, ou de cours d'eau temporaires par exemple, faussant les résultats (voir figure 3). De nombreuses modifications manuelles ont été effectuées pour pallier ces imprécisions, mais il est impossible de garantir une résolution totale de celles-ci à l'échelle d'un bassin versant.

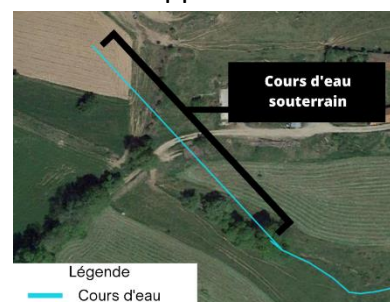


Figure 3: Exemple d'un cours d'eau souterrain (donnée issue d' l'IGN) par comparaison avec l'image de référence (©2023 Google maps)

La couche d'occupation du sol finale produite est néanmoins dans l'ensemble très précise à l'échelle d'un bassin versant. Les modélisations qui s'effectueront par la suite seront ainsi pertinentes et les résultats exploitables. Pour des modélisations futures, la couche pourra par ailleurs être retravaillée avec des données plus récentes et/ou plus précises.

5.2 Choix des espèces cibles

5.2.1 Définition

La seconde partie du pré-traitement est le choix des espèces cibles qui seront utilisées pour la modélisation. Le choix doit se baser sur plusieurs critères, de manière à obtenir des modélisations pertinentes sur l'ensemble du bassin versant.

Tout d'abord, il faut que l'espèce soit présente dans les milieux humides. La trame turquoise se basant sur les espèces utilisant les milieux terrestres et aquatiques/humides dans leur cycle de vie, il n'est pas pertinent d'utiliser des espèces terrestres ou aquatiques strictement. Ensuite, les espèces se doivent d'être présentes sur l'ensemble du bassin versant, ou une majeure partie. Une modélisation à l'échelle du bassin versant utilisant une espèce qui n'est présente que sur peu de communes n'est pas pertinente. Il faut également que les différentes espèces choisies aient des exigences écologiques ainsi que des caractéristiques de dispersion différentes. L'objectif est en effet de produire des modélisations représentant un maximum de chemins de dispersion sur le territoire.

Enfin, il faut choisir des espèces dites « parapluies ». Une espèce parapluie est une espèce dont les besoins écologiques encapsulent ceux de nombreuses autres espèces, moins exigeantes écologiquement (Lambeck, 1997). Sa définition exacte est « une espèce dont la conservation confère un parapluie protecteur à de nombreuses espèces coexistantes » (Fleishman *et al.*, 2000). Dans le cadre d'une étude de dispersion des espèces selon les facteurs écologiques liés aux habitats rencontrés, le choix d'espèces parapluies comme espèces cibles permet alors des modélisations pouvant être applicables à de nombreuses autres espèces.

5.2.2 Première sélection

Le travail de choix des espèces a déjà en grande partie été fait par Mme Maricourt, la stagiaire précédente. Cette dernière a ainsi réalisé un travail avec des données naturalistes relatives aux espèces présentes sur le bassin versant, ainsi que leur localisation par commune. Elle a ensuite fait une première sélection des espèces, en éliminant les espèces présentes surtout en milieux secs, ou sur des milieux trop divers, et en faisant une sélection selon le critère de **l'espèce parapluie**.

Elle présente ainsi une sélection de 13 espèces utilisables dans le cadre de la trame turquoise en donnant également leurs caractéristiques pertinentes pour l'étude (leur besoin en milieu humide, leurs distance moyenne de dispersion, leurs menaces...). La première sélection est ainsi la suivante :

Tableau 4: Espèces utilisables dans le cadre d'une étude sur la trame turquoise

	Amphibiens	Mammifères	Insectes	Oiseaux
Espèces	<i>Alytes obstetricans</i>	<i>Lutra lutra</i>	<i>Coenagrion mercuriale</i>	<i>Alcedo atthis</i>
	<i>Bombina variegata</i>	<i>Myotis daubentonii</i>	<i>Lycaena dispar</i>	
	<i>Bufo Bufo</i>	<i>Pipistrellus nathusii</i>	<i>Oxygastra curtisii</i>	
	<i>Lissotriton helveticus</i>			
	<i>Rana dalmatina</i>			
	<i>Triturus cristatus</i>			

5.2.3 Seconde sélection

A l'aide des données naturalistes récoltées par Mme Maricourt, un tableau a d'abord été érigé, représentant le nombre de communes de présence de chaque espèce au sein du bassin versant. Le but est donc de choisir les espèces les plus présentes comme potentielles espèces cible et éliminer celles trop peu présentes.

De plus, une liste de critères caractérisant les espèces parapluies (Fleishman *et al.*, 2000 ; Caro & O'Doherty, 1999 ; Andelman & Fagan, 2000) a été utilisée afin de comparer chaque espèce retenue selon sa capacité à représenter d'autres espèces. Seules les espèces ayant des caractéristiques se rapprochant le plus de ces critères ont ainsi été retenues.

Également, une attention particulière a été portée à choisir des espèces cibles ayant des caractéristiques de dispersion différentes comme précisées ci-dessus. On distingue donc 4 classes différentes parmi les espèces retenues (amphibiens, mammifères, insectes et oiseaux), ainsi que trois catégories de rayons de dispersion (SRCE Picardie, 2013) :

- Les grands rayons de dispersion (>10km), concernant par exemple les grands mammifères ou les espèces volantes
- Les rayons de dispersion moyen (1- 10km), concernant par exemple divers odonates et reptiles
- Les petits rayons de dispersion (<1km), concernant alors des espèces à faible mobilité comme les mollusques ou certains insectes.

Le but est donc de choisir un set d'espèces cibles appartenant à des catégories de rayons de dispersions et classes différentes, pour obtenir des modélisations applicables au plus grand nombre d'espèces. Après application de ces derniers critères, 4 espèces ont été retenues pour la modélisation du projet (plus d'informations sur elles en annexe 3) :

Tableau 5: Espèces cibles choisies et leurs caractéristiques

Espèce	<i>Bufo Bufo</i>	<i>Triturus cristatus</i>	<i>Coenagrion mercuriale</i>	<i>Myotis daubentonii</i>
Photographie				
Distance de dispersion	3 km	1 km	1 km	10 km

Attention, la valeur de distance de dispersion de la *Myotis daubentonii* n'est pas la valeur originale. Théoriquement, selon l'INPN, cette espèce a une dispersion de l'ordre de quelques kilomètres jusqu'à un maximum de 20km. Cependant, la valeur de 20km est une valeur beaucoup trop élevée qui a rendu les modélisations (présentées en partie 6 de ce rapport) impossibles : le nombre de chemins de dispersion rendu possible par une telle distance nécessitait une puissance de calcul que le matériel informatique accessible était loin de posséder. Etant donné que la dispersion moyenne de la *Myotis daubentonii* n'est que de « quelques kilomètres » et que la valeur de 20km n'est que la valeur maximale, il a été préféré de baisser cette valeur de manière pertinente, à 10km, rendant possible les modélisations.

5.3 Calcul des coefficients de friction

5.3.1 Définition

Le coefficient de friction correspond à la résistance qu'un milieu oppose face à la dispersion d'une espèce. Bien sûr, ce coefficient varie en fonction de la physiologie des espèces et de leurs capacités de dispersions. Ces coefficients permettront de calculer les « chemins de moindres coûts » (C. Clauzel et al, 2018 ; C. Clauzel et al, 2020 ; C. Gaber, 2019 ; J.C. Foltête et al, 2012)

Le principe de la modélisation de la dispersion est d'imaginer que l'espèce étudiée part d'un point zéro (son habitat naturel), et dispose d'une « barre de vie » avec un certain nombre de points de vie. Lors de la modélisation de sa dispersion avec la couche raster, l'espèce va se déplacer de pixel en pixel, chaque pixel ayant un milieu attribué (couche d'occupation du sol). Chacun de ces milieux a un coefficient de friction, plus ou moins élevé selon sa perméabilité par rapport à l'espèce, qui va retirer des points de vie à celle-ci lors de son passage sur le pixel (on parle alors de **coûts**). De manière plus générale, on parle de déplacements potentiels calculés avec un algorithme d'accumulation de coûts (SRCE Picardie, 2013) :



$$\text{Coût}_{AB} = p \times \frac{\text{Coût}_A + \text{Coût}_B}{2}$$

p = taille de la cellule
Coût_A = valeur de coût de la cellule A

Équation 1: Algorithme d'accumulation de coûts

Par exemple, une espèce peut perdre plus de « points de vie » en traversant 1 pixel de zone urbanisée ayant une forte résistance, que 4 pixels de prairie ayant une grande perméabilité.

5.3.2 Création des classes de perméabilité

La première étape est alors de créer des classes de perméabilité, dans lesquelles seront classées les occupations du sol. En effet, il n'est pas pertinent d'attribuer un coefficient de friction différent pour chaque occupation du sol, pour chaque espèce. Il est alors préférable de créer des classes de perméabilité, regroupant les occupations du sol de même « préférences » pour chaque espèce, afin de leur attribuer des coefficients de friction communs.

Le nombre de classes choisies est alors défini selon sa pertinence par rapport aux données du projet : nombre d'occupation du sol, possibilité/facilité de différencier clairement les différentes classes (quelle différence entre un milieu très perméable et perméable par exemple)... Pour ce projet, il a été choisi de garder 7 classes de perméabilité présentées ci-dessous :

- **Les milieux structurants** (milieux d'origine de l'espèce)
- **Les milieux très perméables** (très aimé de l'espèce mais ne constituant pas un habitat)
- **Les milieux perméables** (l'espèce n'a pas de problèmes à les traverser)
- **Les milieux de déplacements peu fréquents** (l'espèce s'y rend occasionnellement)
- **Les milieux résistants** (l'espèce a des difficultés à les traverser)
- **Les milieux très résistants** (l'espèce a beaucoup de difficultés à les traverser)
- **Les milieux bloquants** (l'espèce ne peut pas les traverser).

5.3.3 Calcul du coefficient de résistance minimal et maximal

Il est maintenant nécessaire de calculer les coefficients de friction pour chacune de ces classes. La première étape du calcul est de trouver les coefficients minimal et maximal, correspondant respectivement à la résistance des milieux structurants et bloquants pour l'espèce. Bien que le milieu structurant ne semble pas représenter de résistance pour l'espèce, sa valeur de coefficient est de **1** (par convention), car il faut partir du principe que tout déplacement représente un coût pour l'animal, quel que soit le milieu traversé. De son côté, le coefficient de résistance maximal dépend de trois variables :

$$d = p * \frac{(U_1 + U_7)}{2}$$

Équation 2: Distance maximale de déplacement d'une espèce

Avec **d** la capacité de déplacement de l'espèce (sa plage de dispersion, voir tableau 5), **U₁** le coefficient de résistance minimal (égal à 1), **U₇** ici le coefficient de friction maximal (de la septième classe) et **p** la taille des cellules du raster (résolution des pixels, voir ci-dessous).

En effet, par la suite les cartes d'occupation du sol et les cartes de frictions seront **rasterisées**. Dans le jargon SIG, la rasterisation signifie la transformation de couches SIG

contenant des entités géométriques (polygones, points, lignes...) en couches contenant des **pixels**. Ces couches, appelées **raster**, sont définies par une **résolution** (taille des pixels), et par l'information contenue dans chaque pixel.

Pour ce projet, une résolution de 2.0 mètres a été choisie, ce qui signifie que chaque pixel carré mesurera 2*2m. Bien que les sources de données utilisées n'aient pas toutes une résolution aussi élevée, il ne faut pas oublier que la carte d'occupation du sol de ce projet contient des ruisseaux et autres cours d'eau de très faible largeur (souvent moins d'un mètre dans la réalité). Il a donc fallu choisir une résolution de pixels de sorte que ceux-ci ne disparaissent pas lors de la rasterisation, c'est-à-dire choisir une résolution plus petite que la largeur des cours d'eau les plus fins (dans un contexte de trame turquoise, chaque ruisseau est important). Initialement, les ruisseaux concernés mesuraient 1.0m de large. Le choix s'était alors porté sur une résolution de 0.5m, mais le matériel informatique accessible n'était pas assez performant pour modéliser à cette résolution. **Il a donc été choisi de réduire cette résolution à 2.0 mètres**, en exagérant la largeur des ruisseaux à 5.0 mètres et des autres cours d'eau affluents à 6.0 mètres de large (voir partie 5.1.1) pour ne pas les voir disparaître lors de la rasterisation.

Connaissant **p** (égal à 2.0m), **U₁** (égal à 1) et **d** (égal à 1000m pour le *Triturus cristatus*, 3000m pour le *Bufo bufo*, 1000m pour le *Coenagrion mercuriale* et 10 000m pour la *Myotis daubentonii*) on déduit alors facilement la valeur de **U₇** pour chaque espèce cible :

Tableau 6: Coefficients de résistance minimal et maximal pour chaque espèce cible

Espèce cible	<i>Bufo bufo</i>	<i>Triturus cristatus</i>	<i>Coenagrion mercuriale</i>	<i>Myotis daubentonii</i>
Coef minimal	1	1	1	1
Coef maximal	2 999	999	999	9 999

Par exemple, lors de sa dispersion, le *Bufo bufo*, ayant un capital de déplacement de 3 000m (sa « barre de vie, voir partie 5.3.1), perdra 1 « point de vie » à chaque fois qu'il traversera un pixel d'un milieu structurant, et 2 999 lorsqu'il s'agira d'un milieu bloquant (donc tous ses points de vie, l'empêchant ainsi de traverser des milieux bloquants).

5.3.4 Calcul des coefficients de résistance pour chaque classe de milieu

Maintenant que les coefficients maximal et minimal des milieux structurants et bloquants sont calculés (**U₁** et **U₇**), il s'agit alors de calculer les coefficients des autres classes de perméabilité (**U₂**, **U₃**..., **U₆**). La méthode utilisée ici est celle de la régression exponentielle. Il s'agit alors de calculer une courbe de régression exponentielle (grâce au logiciel de calcul Excel) pour chaque espèce à partir des deux valeurs connues **U₁** et **U₇**. On utilise alors l'équation extraite de la courbe comme base de calcul pour les autres coefficients.

On part alors du principe qu'à partir des coefficients calculés **U₁** et **U₇**, on peut deviner les autres de telle sorte que les coefficients évoluent de manière exponentielle selon la perméabilité du milieu. Ainsi, l'écart de coefficient sera faible entre un milieu structurant et un milieu très perméable, tandis qu'il sera très élevé entre un milieu très résistant et un milieu totalement bloquant par exemple.

Après calcul des différents coefficients de frictions, on peut alors calculer la distance maximale pouvant être parcourue par l'espèce dans chacun de ces milieux selon le coefficient calculé. Le coefficient de friction correspondant au nombre de « points de vie » perdus par l'espèce s'il traverse un pixel dans le milieu associé, il suffit alors de diviser son capital de points de vie (i.e. sa distance maximale de dispersion) par le coefficient pour obtenir le nombre de pixels traversables, puis de multiplier par la taille des pixels pour avoir la valeur en mètres.

Par exemple, les milieux très perméables ont un coefficient de friction de 4 pour le *Bufo bufo*. Ayant un capital de déplacement de 3 000m, il peut se déplacer au maximum sur 750m dans ces milieux car $3\,000 / 4 = 750$.

Tableau 7: Coefficient de friction et distance maximale de chaque espèce et milieu

Espèces cibles	<i>Bufo bufo</i>		<i>Triturus cristatus</i>		<i>Coenagrion mercuriale</i>		<i>Myotis daubentonii</i>	
	Coefficient	Distance max (m)	Coefficient	Distance max (m)	Coefficient	Distance max (m)	Coefficient	Distance max (m)
Milieux structurants	1	3 000	1	1 000	1	1 000	1	10 000
Milieux très perméables	4	750	3	333	3	333	5	2 000
Milieux perméables	14	214	10	100	10	100	22	455
Milieux de déplacements peu fréquents	55	55	32	31	32	31	100	100
Milieux résistants	208	14	100	10	100	10	464	22
Milieux très résistants	789	4	316	3	316	3	2153	5
Milieux bloquants	2 999	1	999	1	999	1	9999	1

5.3.5 Classement des occupations du sol dans les classes de perméabilité

L'objectif est maintenant de classer chaque occupation du sol dans une classe de perméabilité. Le classement est alors fait indépendamment pour chaque espèce, selon ses caractéristiques. Cependant, il est très compliqué et subjectif de classer les différentes occupations du sol dans ces classes de perméabilité. Le classement requiert de nombreuses données concernant les espèces, notamment par rapport à leurs préférences et besoins. Malgré de nombreuses recherches bibliographiques pour récolter ces données, celles-ci ont été souvent infructueuses. Pour le classement, une écologue professionnelle a donc été consultée : Mme Bertolini a ainsi eu la gentillesse de nous accompagner dans les réflexions sur ces classements, et nous a aiguillé avec ses connaissances. Elle a d'ailleurs transmis les résultats de nos réflexions à une collègue pour avoir un avis supplémentaire, permettant d'avoir des classifications de perméabilités les plus pertinentes possibles.

Les réflexions se sont basées sur de nombreux critères. Il a fallu réfléchir selon différents points de vue, afin que les classements soient pertinents. Il a ainsi fallu :

- Prendre en compte les besoins et préférences des espèces
- Prendre en compte les distances maximales des espèces dans les milieux (par exemple, le *Bufo bufo* ayant une distance maximale d'un mètre dans les « milieux résistants », classer les cours d'eau dans cette classe permettrait de rendre les ruisseaux de moins d'un mètre de large traversables, mais pas les cours d'eau supérieurs à cette largeur)
- Prendre en compte la perméabilité des autres occupations du sol pour l'espèce (par exemple, si l'on classe, pour une espèce, les cultures en « très résistants » et les routes traversables en « résistants », cela veut dire que lors de la modélisation de la dispersion, l'espèce préférera longer la culture en restant sur la route plutôt que de la traverser)

Les classements finaux d'occupations du sol en classes de perméabilités pour chaque espèce cible sont ainsi présentés ci-dessous.

Tableau 8: Classement des perméabilités des occupations du sol pour chaque espèce cible

	<i>Bufo bufo</i>	<i>Triturus cristatus</i>	<i>Coenagrion mercuriale</i>	<i>Myotis daubentonii</i>	
Cours d'eau					
Routes bloquantes					Milieux structurants
Routes traversables					Très perméables
Plan d'eau > 600m2					Perméables
Plan d'eau < 600m2					déplacements peu fréquents
Zones urbanisées avec jardins					résistants
Centre villes / ZU sans jardins					très résistants
Haies					bloquants
Forêts					
Lisières					
ZH hors plans d'eau					
Cultures annuelles					
Prairies					

5.4 Rastérisation et création des cartes de friction avec Biodispersal

L'étape suivante est celle de la rastérisation des cartes d'occupation du sol et création des cartes de friction avec l'extension Biodispersal de Qgis.

Pour poursuivre le projet, il est donc nécessaire de rastériser la couche d'occupation des sols, de manière à ce que chaque pixel contienne l'information de l'occupation du sol. La

rastérisation et la création des cartes de friction s'effectuent alors au travers de 7 étapes de Biodispersal résumées ci-dessous, et expliquées plus précisément en annexe 4.



Figure 4: Etapes de modélisation sous Biodispersal, pour la rastérisation de la couche d'occupation du sol et la création des cartes de friction

Ainsi, pour chaque sous-trame, donc chaque espèce, Biodispersal crée une couche d'occupation du sol rastérisée (bien que dans notre cas ce sont les mêmes car la hiérarchisation était la même pour toutes les espèces), et une couche de friction rastérisée.

Tableau 9: Coefficients de frictions pour chaque occupation du sol, pour chaque espèce

class	code	class_descr	BufoBufo	TriturusCristatus	CoenagrionMercuriale	MyotisDaubentonii ▼
OsFusionnee_Plans d'eau plus 600	13		1	100	100	5
OsFusionnee_Haies	12		1	10	3	5
OsFusionnee_Plans eau moins 600	11		1	1	32	1
OsFusionnee_ZU Jardins	10		55	316	316	22
OsFusionnee_ZH hors plans eau	9		4	3	1	22
OsFusionnee_Route Bloquante	8		2999	999	999	2153
OsFusionnee_Lisieres	7		1	10	3	1
OsFusionnee_Forets	6		1	32	100	1
OsFusionnee_Prairies	5		55	32	3	22
OsFusionnee_Cours Eau	4		789	32	1	1
OsFusionnee_Culture Annuelle	3		208	316	100	464
OsFusionnee_Centre Ville	2		208	999	999	100
OsFusionnee_Route Traversable	1		208	100	32	5

Notre utilisation de Biodispersal s'arrête ainsi ici. Ainsi, grâce aux cartes d'occupation du sol et de friction, il est maintenant nécessaire de passer à l'utilisation de Graphab pour la suite du projet.

5. Modélisation des dispersions et calcul des métriques

Afin de produire les cartographies finales du projet, il est nécessaire d'utiliser les outils de Graphab. Dans un premier temps, le logiciel permet de simuler les dispersions des espèces en utilisant les informations issues de Biodispersal, puis, dans un second temps, il permet la création de graphes et l'application de métriques sur les dispersions modélisées.

6.1 Paramétrage des taches d'habitats

6.1.1 Définition

La première étape du travail à effectuer sur Graphab est la modélisation des dispersions des espèces. Pour cela, il faut d'abord créer des « taches d'habitats ». Il s'agit de regrouper les pixels des habitats de structures qui sont adjacents en « taches » afin d'identifier les zones de départ / arrivée des dispersions. Ainsi, tous les pixels représentant une forêt donnée forment une seule et unique tache, même si la forêt est très grande par exemple. Néanmoins, le modèle doit être paramétré et plusieurs choix s'offrent à l'opérateur.

6.1.2 Type de connexité topologique

Le type de connexité topologique d'abord, permet le paramétrage de la manière dont les taches seront produites à partir des pixels d'habitats. Il y a deux types de connexité topologique : la connexité 4, qui considère un ensemble de pixels comme tache d'habitat seulement lorsque tous les pixels sont reliés par un côté (fig 5A), et la connexité 8, qui considère un ensemble de pixels comme tache lorsque tous les pixels sont reliés par un côté ou un sommet (fig 5B). Ainsi, sur l'exemple présent sur les figures 5A et 5B, une connexité 4 identifiera 3 taches d'habitats alors qu'une connexité 8 n'en identifiera qu'une. Dans notre cas d'étude, c'est la connexité 8 qui a été choisie. En effet, ayant de nombreuses entités de faible largeur sur la carte d'occupation du sol (tels que les ruisseaux, haies ou lisières), celles-ci sont souvent rasterisées comme une ligne de pixels, uniquement reliés par un côté lorsque la ligne est horizontale ou verticale, ou par un sommet lorsqu'elle est en diagonale. Ainsi, choisir une connexité 8 permet de créer une unique tache d'habitat par haies / ruisseau / lisière avec certitude.

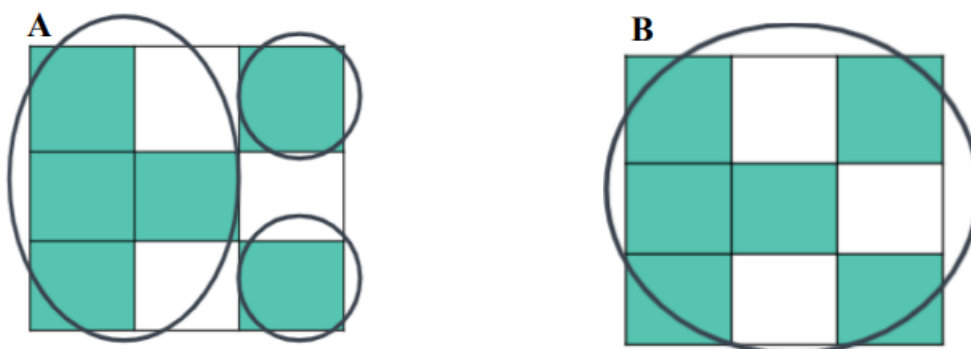


Figure 5: Représentation des deux types de connexité pour la création des taches d'habitats : la connexité 4 (A), et la connexité 8 (B) (C.Gaber, 2019)

6.1.3 Quels habitats pour les taches

Ensuite, il faut choisir quels milieux constitueront les taches d'habitats, c'est-à-dire les milieux qui constitueront les zones de départ et d'arrivée des chemins de dispersions, les

autres milieux étants alors les milieux de passage. Inclure ou non un habitat aura alors beaucoup d'impact concernant les modélisations, et affectera grandement le nombre de taches d'habitats. Dans cette étude, et pour chaque espèce, les milieux choisis sont les milieux de « structure » de l'espèce qui ont été choisis (voir tableau 8), sauf lorsque ces milieux sont de taille trop élevée et donc non pertinent pour les taches d'habitat (comme les forêts et lisières par exemple). Pour le *Bufo bufo*, on choisit les plans d'eau et les haies, pour le *Triturus cristatus*, on choisit les plans d'eau de moins de 600m² et les zones humides, pour le *Coenagrion mercuriale*, on choisit les cours d'eau et les zones humides, et enfin pour la *Myotis daubentonii*, on choisit les cours d'eau, les haies et les plans d'eau de plus de 600m².

6.1.4 Taille minimale des habitats

Un autre paramètre qu'il est possible de modifier est la taille minimale des habitats. Elle permet d'ignorer les taches d'habitats inférieures à une surface prédéfinie. Dans cette étude, cette surface a été laissée à 0 ha, car comme expliqué précédemment, certaines entités de faible largeur de la carte d'occupation des sols ont été rastérisées sous forme de ligne. En outre, ces « lignes » de pixels ont parfois été formées de manière discontinues, surtout dans les espaces ou les entités étaient en diagonales (voir figure 6), il est donc préférable de laisser la valeur de surface minimale des taches à 0 ha, pour être certain qu'aucun pixel de ces entités ne soit ignoré.

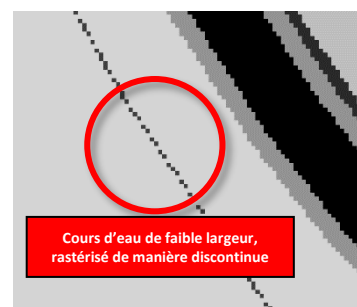


Figure 6: Exemple de cours d'eau discontinu

6.1.5 Capacité des habitats

Enfin, il est possible de modifier la définition de la capacité d'habitat. En effet, chaque tache d'habitat aura une certaine « capacité » à accueillir des individus. Par défaut, la capacité d'une tache d'habitat est définie par sa surface : plus une tache est grande, plus elle a une capacité d'accueillir un grand nombre d'individus. Cependant, ceci n'est pas applicable à toutes les espèces. Par exemple, la capacité d'habitat de deux des espèces cibles choisies (*Triturus cristatus* et *Coenagrion mercuriale*) n'est pas définie par la surface des mares ou des cours d'eau dans lesquelles on peut les trouver. En effet leur cycle de vie ne se résume pas à la reproduction dans ces endroits, ils passent une grande partie de ce cycle dans les habitats alentours. Le *Coenagrion mercuriale* a besoin d'avoir des prairies à proximité de son lieu de reproduction (ce sont ses sites de maturation) (Puissauve *et al.*, 2015), et le *Triturus cristatus* utilise uniquement les habitats terrestres qui sont à proximité de plans d'eaux (Puissauve *et al.*, 2015).

Ainsi un plan d'eau de grande surface situé au milieu de cultures aura une capacité à accueillir les individus beaucoup plus faible qu'une mare de plus faible surface ayant des habitats voisins favorables. Il s'agit alors, pour ces espèces, de définir la capacité des taches d'habitat selon les habitats voisins. Pour cela, l'option « surface de voisinage » peut être utilisée.

Concernant le Murin de daubenton, la surface de la tache reste le critère de définition des capacités. En effet, le Murin de daubenton ayant une capacité de déplacement de 10km, il n'est pas vraiment dépendant de la qualité des habitats voisins de ses habitats de structure, et n'hésite pas à se déplacer s'ils ne lui conviennent pas. De plus, bien que les zones humides constituent ses lieux de chasse principaux, il peut aussi chasser directement dans les milieux forestiers si besoin est (Puissauve *et al.*, 2015). Enfin, concernant le *Bufo bufo*, celui-ci ne

rejoint les plans d'eau que pour sa reproduction, et passe le restant de sa vie dans divers habitats terrestres dont il n'est pas très pointilleux (Corolla *et al.*, 2013). En effet, la plupart des habitats terrestres lui conviennent, et c'est pour cela que la capacité des tâches sera définie par la surface pour cette espèce (plus un plan d'eau est grand, plus il pourra accueillir de Bufo bufo pour leur reproduction).

6.2 Paramétrage du jeu de liens

La deuxième étape à effectuer sur Graphab est le paramétrage du jeu de liens. Ce dernier représentera les liens entre les différentes tâches d'habitats, modélisés dans le cas de ce projet comme les dispersions des espèces cibles.

6.2.1 Modes de calcul des liens

Le premier paramètre à choisir est le mode de calcul des liens. Deux modes existent : le premier est le mode « distance euclidienne ». Il génère des liens correspondants au chemin le plus court entre deux tâches, mais ne prend pas en compte les éléments du paysage. Le second est le mode « coût cumulé ». Dans ce mode, les liens sont créés par un mode de fonctionnement semblable à un jeu-vidéo : le personnage (ici l'espèce cible), commence, au début de la modélisation, avec un nombre défini de points de vie (ici égaux à la capacité maximale de déplacement de l'espèce). A chaque pixel traversé lors de sa dispersion, il perdra un nombre de points de vie proportionnellement au coefficient de friction de l'occupation du sol du pixel. Le but de la modélisation est alors de trouver les chemins entre les tâches d'habitats dépensant le moins de points de vie possible (on parle donc d'algorithme de distance de coût cumulé, voir figure 7). C'est donc ce deuxième mode qui a été choisi pour les modélisations du projet, en utilisant les cartes de friction créées sur Biodispersal pour intégrer les « coûts ».

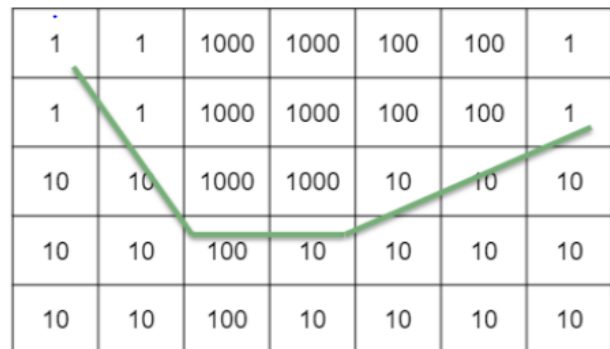


Figure 7: Type de déplacement par distance de coût cumulé (C. gaber, 2021)

6.2.2 Type de topologie

Ensuite, un deuxième paramètre à choisir est celui du type de topologie souhaité pour le jeu de liens. Deux types existent : la topologie planaire (voir figure 8a), qui crée pour chaque tâche d'habitat des liens uniquement avec les tâches voisines (cela rend le temps de calcul moins long mais moins réaliste), et la topologie complète, qui permet la création de liens entre toutes les tâches (voir figure 8b). Dans le cas de ce projet, c'est la topologie complète qui a été choisie, car elle est plus réaliste. De plus, certaines métriques nécessaires présentés dans les parties suivantes ne sont réalisables qu'avec des topologies complètes.

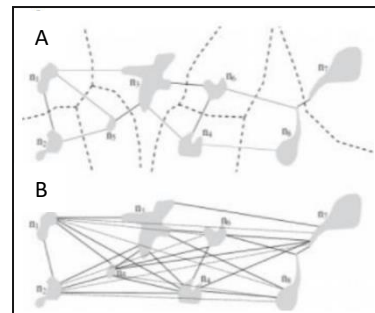


Figure 8: Illustration des deux types de topologie : La topologie planaire (A) et complète (B).

Une fois tous les paramètres choisis, il est alors possible de générer, pour chaque espèce cible, la carte des taches d'habitats ainsi que les chemins de dispersions (voir figure 9).

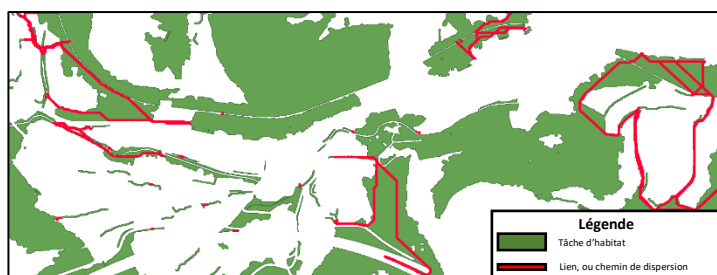


Figure 9: Exemple du résultat de dispersion du *Bufo bufo*

6.3 Paramétrage du graphe

L'étape suivante à effectuer sur Graphab est la création de graphes, où chaque sommet représente une tache d'habitat dont la largeur dépend de sa capacité à accueillir des individus. Ces graphes seront alors une base pour construire d'autres graphes selon certaines métriques.

Pour créer ces graphes, un paramètre important doit être renseigné, celui de la distance maximale, **en coût**. La distance maximale en mètre a déjà été renseignée pour la création des chemins de dispersions dans la partie précédente, cependant pour la création de graphes le logiciel a besoin de cette même distance maximale, mais en unité de coûts. Cette distance maximale permet d'élaguer le graphe et de l'ajuster aux capacités de déplacement de l'espèce cible. Pour calculer cette valeur, il suffit alors d'utiliser l'outil « conversion distance » de Graphab, et en y inscrivant la distance maximale de l'espèce en mètre (3 000m pour le *Bufo bufo* par exemple). Grâce à une conversion par régression linéaire de tous les chemins à moindres coûts modélisés dans la distance renseignée, la distance maximale en **coût** est alors calculée par le logiciel. Ce coût de dispersion maximal est alors utilisé pour créer les graphes, et sera utilisé plus tard pour le calcul des métriques. Tous les coûts de dispersion maximums sont ainsi présentés dans le tableau 10 ci-dessous (la raison des valeurs non acquises, ou NA, est expliquée plus loin en partie 7.1).

Tableau 10: Distance maximale, en coût, pour chaque espèce cible, pour chaque zone d'étude

Espèces	Bufo bufo	Triturus cristatus	Coenagrion mercuriale	Myotis daubentonii
Distance maximale en coûts	2173,15	2716,34	NA	NA

Grâce à ce paramètre, les graphes sont alors créés pour chaque espèce, pour chaque zone d'étude (voir figure 10).

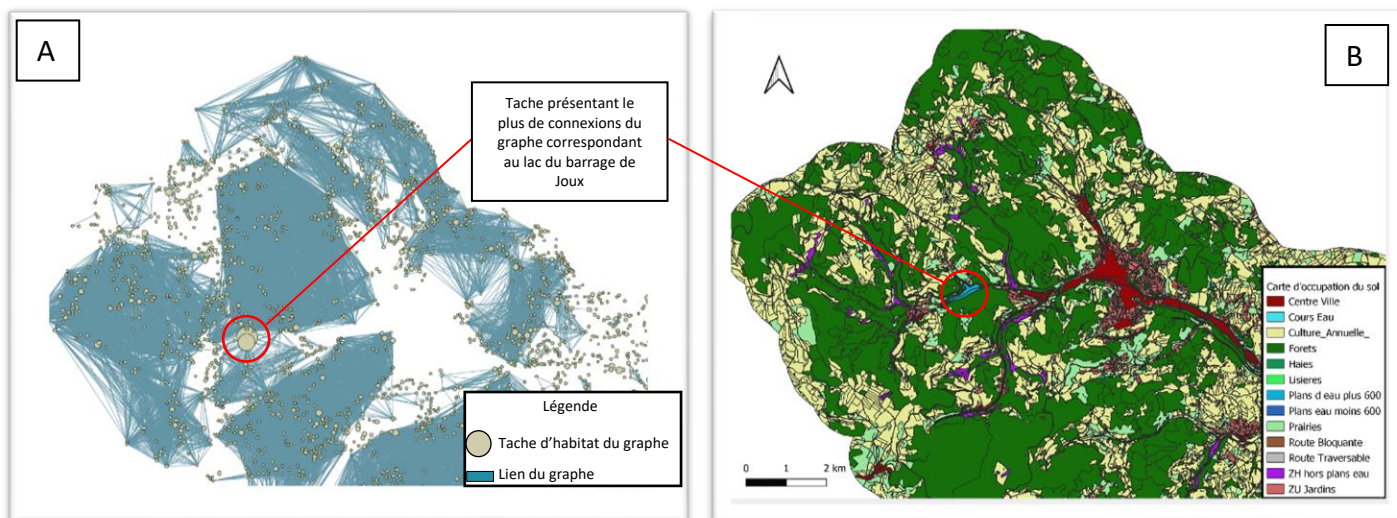


Figure 10: Exemple d'un graphe des tâches d'habitats selon leur capacité, ici pour le *Bufo bufo*, sur la communauté de communes de l'Ouest Rhodanien (A) en comparaison avec la carte d'occupation des sols (B)

Par exemple, dans l'extrait du graphe de la modélisation pour le *Bufo bufo* ci-dessus, on voit clairement toutes les taches d'habitats, représentées par des ronds gris, dont la taille est proportionnelle aux nombres de liens reliant la tache aux autres. On remarque alors que ces liens, aussi appelés chemins de dispersions, se regroupent majoritairement en formes polygones. Après comparaison avec la carte d'occupation des sols (figure 10B), ces regroupements sont alors situés précisément au travers des habitats de structure du *Bufo bufo*, notamment des zones de forêts, et sont inexistantes dans les zones non favorables au *Bufo bufo* comme les zones de centre-ville. Le graphe est alors cohérent : les crapauds communs, lors de leurs dispersions, vont favoriser les déplacements au travers de leurs habitats les plus favorables, et éviter ceux qui ne le sont pas. De plus, la tache présentant le plus de connexion du graphe (indiquée sur la figure 10 A), représente en réalité le plan d'eau de grandes dimensions du barrage de Joux. Etant alors un lieu de reproduction parfait pour les crapauds, et pouvant accueillir un grand nombre d'entre eux au vu de sa superficie, il est alors cohérent que ce plan d'eau soit le plus connecté du bassin versant (il est par ailleurs le plus grand plan d'eau de celui-ci). On peut donc valider la pertinence des graphes créés.

6.4 Choix des métriques de connectivité et paramètres

L'existence de nombreuses métriques fait du logiciel Graphab un outil relativement complet dans l'étude des connectivités écologiques. C'est d'ailleurs grâce à celles-ci qu'il a pu être le support de nombreuses études et travaux effectués sur ce sujet (C.Gaber, 2019 ; J-C Foltête *et al.*, 2012). Il n'est cependant pas pertinent de toutes les appliquer dans le cadre de notre projet. Il est alors préférable de choisir quelques métriques intéressantes, choisies selon nos besoins. Dans le cas de ce projet, le but est d'identifier les points stratégiques de la trame turquoise à protéger, et les zones favorables à une restauration et/ou création de milieu. Les métriques choisies permettent alors d'apporter des informations pertinentes pour ces objectifs. Ces dernières sont ainsi présentées rapidement dans le tableau ci-dessous, mais expliquées plus en détail dans l'Annexe 3.

Tableau 11: Présentation des métriques utilisées

Métrique	Type	Description	But
Betweenness Centrality (BC)	Locale	Evalue la capacité des tâches à être des habitats relais.	Identifier les habitats importants pour les corridors écologiques
Flux d'interaction (IF)	Locale	Indique les interactions potentielles entre chaque tâche étudiée et les autres	Identifier les zones d'interactions importantes entre les habitats
Delta P.C. décomposé (dPC)	Locale	Simule la suppression d'une tâche et évalue les différences de connectivités globale entre l'avant et l'après.	Identifier les habitats qui contribuent le plus à une bonne connectivité globale, afin de cibler les protections d'habitats.
Ajout de tâche	Globale	Simule l'ajout de tâches, calcule une métrique (PC ou EC, voir ci-dessous) pour analyser la différence avant/après, puis présente les tâches ayant engendré le plus de changements dans la connectivité globale d'après la métrique	Identifier les endroits les plus propices pour des restaurations (création de mares, plantation de haies...)
Probabilité de connectivité (PC)	Globale	Métrique utilisée lors de l'ajout de tâche. Calcule la probabilité que deux individus aléatoires de la zone d'étude entrent en contact. Elle est utilisée lorsque les capacités des tâches sont déterminées selon leur surface (ici pour le Bufo bufo et la Myotis Daubentonii)	Calculer les différences dans la connectivité globale de la zone d'étude, engendrées par l'ajout de la tâche considérée
Connectivité équivalente (EC)	Globale	Métrique utilisée lors de l'ajout de tâche. Calcule la quantité d'habitats atteignables autour de la tâche considérée. Elle est utilisée lorsque la capacité des tâches d'habitats n'est pas définie par la surface de la tâche mais par les habitats voisins (Clauzel <i>et al.</i> , 2020) (ce qui est le cas pour le Triturus cristatus, le Bufo bufo et le Coenagrion mercuriale).	Calculer les différences dans la connectivité globale de la zone d'étude, engendrée par l'ajout de la tâche considérée

Précision : les métriques **locales** caractérisent la connectivité d'un élément du graphe (un nœud, une valeur) tandis que les métriques **globales** caractérisent la connectivité du **graphe entier** (un graphe, une valeur).

Concernant les variables utilisées pour les métriques, il en existe deux, utilisées pour chaque métrique : la distance « d » maximale de l'espèce, en unité de coût (calculée précédemment, voir tableau 10), ainsi que la **probabilité de dispersion « a »**. Cette dernière peut avoir deux valeurs :

- **0.5**, ou « dispersion moyenne ». Cela signifie que 50% des déplacements des individus s'effectuent en-dessous de la distance maximale « d », et 50% au-delà de cette distance.
- **0.05**, ou « dispersion maximale ». Cela signifie que 95% des déplacements des individus s'effectuent en-dessous de la distance maximale « d », et 5% au-delà de cette distance.

Etant donné que les valeurs des distances « d » des espèces cibles correspondent à leur distance de dispersion maximale selon l'INPN, il est préférable de garder une probabilité de dispersion maximale ($a = 0.05$) pour les trois espèces : Bufo bufo, Coenagrion mercuriale et Triturus cristatus. Concernant la Myotis daubentonii, étant donné que la valeur de sa dispersion a été réduite par rapport à sa valeur maximale théorique (voir partie 5.2.3) il a alors

été décidé de choisir une probabilité de dispersion de 0.5 pour cette espèce. En effet il sera rare que les 3 premières espèces effectuent des déplacements au-delà de leur distance maximale de dispersion, mais il est tout à fait possible que la *Myotis daubentonii* effectue de manière ponctuelle des déplacements au-delà de 10km.

6. Résultats des graphes et métriques

7.1 Les modélisations qui n'ont pas pu être réalisées

Malheureusement, certaines modélisations n'ont pas pu être réalisées. En effet, bien que de nombreux essais ait été effectués, les modélisations concernant la *Myotis daubentonii* et le *Coenagrion mercuriale* n'ont pas été possible dans le temps imparti du stage. La décision de l'abandon des modélisations pour ces espèces a été profondément réfléchi, et découle de plusieurs choses : de discussions avec des professionnels (notamment Mr Chazal, technicien de rivière au sein du SYRIBT et Mme Gaber, écologue professionnelle), de réflexions par rapport aux données et matériels à disposition, et du temps restant du stage.

Concernant la *Myotis daubentonii* le problème est que les cours d'eaux ont été classés comme habitat de structure (voir tableau 8). En effet, ceux-ci étant les milieux de chasse principaux de l'espèce, il semblait pertinent de les considérer comme habitat de structure pour celle-ci, et de les inclure dans les taches d'habitat pour les modélisations.

Cependant, après plusieurs modélisations tests, il a été remarqué que puisque tous les cours d'eau présents sur le bassin versant **sont tous reliés** (chaque cours d'eau présent est un affluent de la Brévenne) l'entièreté de ces cours d'eau ne représente au final qu'une seule tache d'habitat lors des modélisations sur Graphab. De ce fait, les graphes et métriques issus des modélisations ne représentent pas la connectivité de tel tronçon de cours d'eau avec tel plan d'eau par exemple, mais de l'entièreté du réseau hydrographique avec ce plan d'eau, ce qui n'est pas pertinent (C. Gaber, août 2023).

Le principe des modélisations est d'identifier les connexions entre les taches d'habitat, de sorte de pouvoir analyser les tronçons hydrographiques ou les plans d'eau à protéger ou restaurer (dans le cas de la *Myotis*, car ce sont les deux occupations du sol prises en compte pour les taches d'habitat pour cette espèce, voir partie 6.1.3). Les modélisations effectuées ne sont alors pas pertinentes, car il est impossible d'étudier les connexions d'un cours d'eau, ou d'un tronçon, indépendamment du reste du réseau hydrographique.

Après discussion avec Mme Gaber, il a été réfléchi que la meilleure solution serait la suppression des cours d'eau et plans d'eau en tant que tache d'habitat pour la *Myotis daubentonii*, mais cette solution engendrerait obligatoirement la modification de la carte d'occupation du sol en incluant certains détails plus précis. En effet, bien que les cours d'eau et les plans d'eau soient l'habitat de chasse principal de l'espèce, ceux-ci ne sont des lieux de déplacements et non de gîtes ou de points clefs du réseau (C. Gaber, août 2023). Pour les modélisations, il semblerait alors plus pertinent d'identifier les chemins de dispersions entre les différents gîtes potentiels et autres gîtes temporaires utilisés pour les temps de chasse (gros arbres morts/creux, mines, gîtes anthropiques potentiels...).

L'inclusion de ces gîtes au sein des modélisations nécessite alors leur inclusion au sein de la carte d'occupation des sols. Pour la continuité de la mission, la question sera alors de savoir s'il est possible d'obtenir des cartographies incluant ce type de données précises à l'échelle du bassin versant de manière pertinente. Une autre question qu'il faut se poser, est celle de la pertinence des modélisations pour la *Myotis daubentonii* dans le contexte de la trame turquoise. En effet, si l'on retire les cours d'eau et les plans d'eau des modélisations pour cette espèce, il n'y aurait plus d'occupation du sol en lien direct avec la trame turquoise prise en compte les modélisations (car les gîtes de l'espèce se trouvent principalement en forêt et en milieux anthropiques). Les connexions modélisées ne prendront plus forcément en compte des zones humides ce qui pose la question de leur pertinence.

Le problème concernant le *Coenagrion mercuriale* est le même que pour la *Myotis daubentonii* : il utilise les cours d'eau comme tache d'habitat sur Graphab (bien que à l'inverse de la *Myotis daubentonii*, le *Coenagrion* n'utilise pas uniquement les cours d'eau pour se nourrir mais ils constituent son habitat de vie principal).

Pour cette espèce, le problème est même au-delà du fait que tous les cours d'eau ne constituent qu'une seule tache d'habitat dans le logiciel Graphab. Il vient aussi du fait que **tous les cours d'eau ne constituent pas un habitat pour cette espèce**. En effet celle-ci a des besoins particuliers en termes d'habitats : milieux lotiques de faible importance, eaux claires et bien oxygénées, besoin de formations à hélrophytes.... (Puissauve *et al.*, 2015). Cependant, pour réaliser les modélisations de cette espèce de manière pertinente et résoudre le problème de la tache unique de cours d'eau dans Graphab, la solution serait alors de différencier les différents types de cours d'eau selon les besoins de l'espèce (cours d'eau lotiques, lenthiques, présence ou non de végétation rivulaire (C. Gaber, août 2023)...). Le problème, c'est que cela n'est pas vraiment possible. Des informations SIG de cette précision à cette échelle n'existent pas encore, ou n'ont pas été trouvées. La seule source de donnée différenciant les cours d'eau selon ces critères est l'occupation des sols CORINE LAND COVER, mais comme expliqué dans la partie 4.2, celle-ci manque cruellement de précision et a des données anciennes. Les modélisations sur Graphab du *Coenagrion mercuriale* ne sont donc pas possibles à ce jour.

7.2 Les modélisations ayant fonctionné

Les différentes métriques utilisées peuvent être réparties en deux groupes. Les métriques dont le but est d'identifier les zones importantes de la trame turquoise, par leur grande connexité ou importance au sein des graphes par exemple. Ce sont les milieux à **protéger**, identifiés grâce aux métriques BC, IF, et dPC. Enfin, les métriques PC et EC, affiliées à la métrique « ajout de tache », permet l'identification des espaces à **restaurer**. Bien que les modélisations pour la *Myotis daubentonii* et le *Coenagrion mercuriale* n'aient pas été possible, celles du *Bufo bufo* et du *Triturus cristatus* ont fonctionné, et leurs résultats vont maintenant être analysés.

7.2.1 Résultats des métriques BC, IF et dPC

7.2.1.1 Comprendre les résultats

Tout d'abord, il faut savoir que la métrique dPC est en réalité l'addition de 3 sous-métriques (voir annexe 5). Parmi ces trois sous-métriques, une contient les mêmes informations que la métrique BC, et une autre les mêmes que la métrique IF. Pour l'analyse des milieux à protéger, c'est donc uniquement les résultats de la métrique dPC qui seront analysés, bien que les résultats des métriques BC et IF pourront être utilisés pour vérification des résultats. Les valeurs de dPC correspondent au taux d'importance d'une tache dans la connexité globale. Par exemple, si une tache ayant une valeur de dPC de 0.025 était supprimée, la connexité globale diminuerait de 2.5%. Pour plus de facilité de lecture, toutes les valeurs de dPC ont été multipliées par 100 pour obtenir des résultats en pourcentage. Les mêmes classes de valeurs ont été utilisées pour les deux espèces modélisées. Ainsi, Les plus fortes valeurs correspondent à des taches d'habitat qui, si elles disparaissent, entraînerait la plus forte perte de connectivité.

Les résultats de la métrique dPC se présentent sous la forme d'une couche vecteur de type polygone, contenant toutes les taches d'habitats prises pour l'espèce étudiée. Dans la table attributaire, chaque tache possède une valeur pour chacune des trois sous métriques (dpCflux, dpcConnector et dpC area, voir annexe 5). La première étape est alors de créer un nouveau champ, additionnant les résultats de ces trois sous métriques, pour obtenir les valeurs totales de dPC pour chaque tache.

7.2.1.2 Classes de valeurs et polygones

La deuxième étape est alors de créer des classes de valeurs, dans lesquelles seront rangées toutes les valeurs de dPC. Pour la création de ces classes, plusieurs choses sont à prendre en compte. D'abord, il faut savoir que de manière générale, chaque résultat des métriques de Graphab doit être interprété par rapport aux autres résultats de la même métrique et non de manière isolée (une tache X ayant une valeur de dPC de 0,453 ne veut pas dire grand-chose, mais savoir que cette tache X a une valeur 3 fois plus élevée qu'une autre tache Y est beaucoup plus pertinent) (Clauzel *et al.*, 2020). De plus, les cartes finales de projets réalisés par la créatrice du logiciel Graphab ont aussi été utilisées pour observer comment cette dernière crée ses classes de valeurs (Clauzel, Girardet, 2018). Les classes de valeurs ont ainsi pu être créées (voir tableau 12).

Tableau 12: Classes de contribution des taches d'habitats à la connexité globale pour la métrique dPC

Classe de contribution des taches d'habitat à la connexité globale (valeurs en %)	
Classes	Valeurs
Pas de contribution	0 – 0.05
Faible contribution	0.05 – 0.1
Moyenne contribution	0.1 – 0.5
Haute contribution	0.5 – 1
Très haute contribution	> 1

Une fois les classes de valeurs créées, il faut commencer à réfléchir à la manière de présenter les résultats. Pour cela, il est important de prendre quelque chose en compte, la précision des résultats. En effet, les modélisations effectuées et les résultats obtenus sont très imprécis. Cela est dû à de nombreux biais tout au long du projet, affectant tous la précision des résultats finaux (imprécisions des données d'occupation du sol, informations incomplètes obtenues sur les espèces cibles, impossibilité de prendre en compte certaines occupation du sol dans les modélisations sur Graphab,...). Les résultats obtenus des modélisations montrent, dans le cas du dPC, l'importance d'entités très ponctuelles (haies, plans d'eau, zones humides...), qui sont d'ailleurs souvent imprécises (en particulier les haies : dans la carte d'occupation du sol, beaucoup de haies sont comptées comme forêts et inversement, beaucoup n'existent plus lors de comparaisons avec des vues satellites très récentes). Produire des cartes de résultats présentant uniquement les valeurs de dPC pour ces entités ne serait pas très pertinents. Il est alors choisi de regrouper ces entités en « patches » c'est-à-dire en polygones de plus grande taille, afin de montrer des zones de taille pertinentes à protéger, plutôt que des haies ou des plans d'eau par exemple. Cela permet alors **d'adapter les résultats à leurs imprécisions** (voir figure 11).

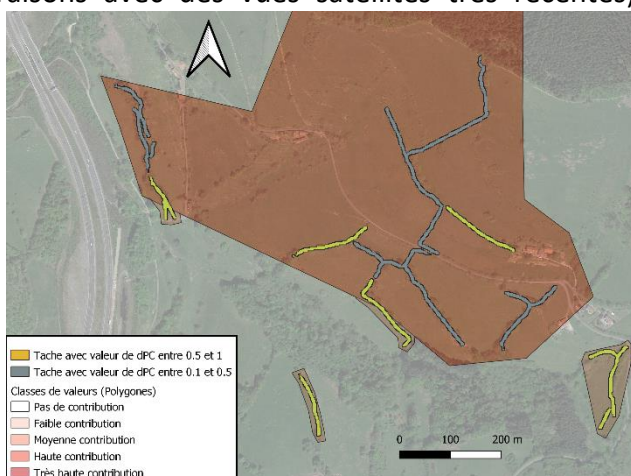


Figure 11: Exemple de différence entre tache d'habitat et polygones créés pour les résultats de dPC du *Bufo bufo*

7.2.1.3 Interprétation des résultats de la métrique dPC

Etant donné que les déplacements de seules deux espèces ont pu être modélisés, deux cartes de résultats de la métrique dPC ressortent de ce projet. Le but de celles-ci est donc de montrer les espaces à protéger, correspondant aux occupations du sol prises en compte pour les taches d'habitat. Pour rappel, celles-ci sont : les haies et les plans d'eau pour le *Bufo bufo*, ainsi que les zones humides et les plans d'eau de surface inférieurs à 600m² pour le *Triturus cristatus*. Les deux cartes finales pour la métrique dPC sont présentes en Annexe 6 et 7, mais un échantillon de celle du *Bufo bufo* est présenté ci-dessous pour présenter un exemple d'analyse.

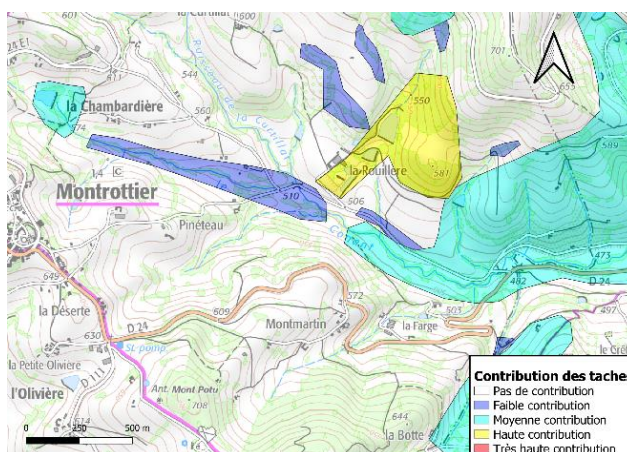


Figure 12: Echantillon de la carte de résultat de la métrique dPC pour le *Bufo bufo*

Ainsi, on peut voir sur la figure 12 que d'après les modélisations effectuées, plusieurs espaces proches de la commune de Montrottier sont à protéger, notamment des espaces à haute contribution pour la connectivité générale du bassin versant, sur le lieu-dit de la Rouillère. Ainsi, pour donner un exemple d'utilisation de la carte produite, si un projet de construction est en discussion autour de la commune de Montrottier, les cartes produites pourront être des outils de discussion pour la localisation du projet. Un projet initialement localisé sur le lieu-dit de la Rouillère pourra alors peut-être être déplacé vers un emplacement autre, protégeant ainsi les espaces sensibles identifiés pour la trame turquoise.

7.2.2 Métrique « ajout de tache »

7.2.2.1 Définition

Comme indiqué dans le tableau 11 et l'annexe 5, le principe de la métrique « ajout de tache » est de simuler l'ajout de tache sur l'ensemble de la zone d'étude, puis de faire la différence entre la connectivité du graphe général, avant et après ajout de la tache. Cela permet alors d'identifier les taches ayant le plus impacté positivement la connectivité globale, et ainsi identifier les milieux à prioriser pour des restaurations de la trame turquoise. Pour simuler les ajouts de taches, il serait trop long de simuler l'ajout d'une tache sur chaque pixel de la carte d'occupation des sols (celle-ci comprenant des millions de pixels). Pour une réalisation plus pertinente, les simulations d'ajout de tache se font à partir d'une **grille** vecteur composée de polygones carrés d'une certaine taille. Il s'agit alors de simuler l'ajout d'une tache au sein de chaque carré de la grille. Le paramètre important est alors la taille des cellules carrées de celle-ci : une grille à cellules de grande surface permettra un calcul de la métrique rapide, mais simulera l'ajout de tache de grande surface, tandis qu'une grille à cellule de faible surface engendrera un calcul long de la métrique, mais permettra de cibler des espaces de restauration plus précis. Le choix de la taille des cellules pour ce projet a été décidé avec Mme Gaber, de telle sorte de trouver un juste milieu entre ces différents paramètres. La taille des cellules choisies est alors de **50 mètres**. Ce sont donc des carrés de 50x50m qui sont testés pour l'ajout de tache sur l'ensemble du bassin versant (voir figure 13). Ils permettent alors d'identifier des espaces relativement précis à restaurer, et permettent un temps de calcul réalisable (**2 à 3 jours de temps de calcul pour chaque espèce**).

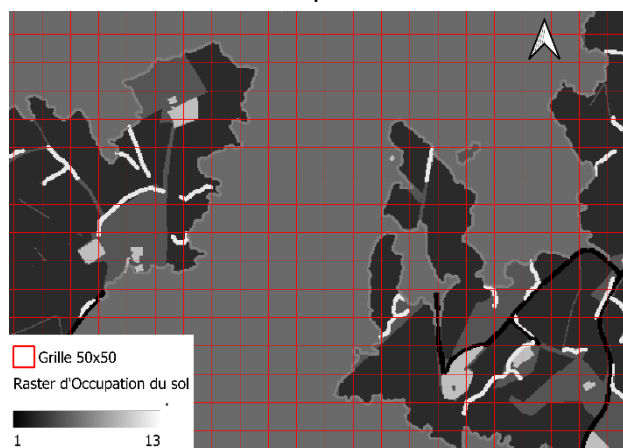


Figure 13: Grille vecteur de résolution 50x50 utilisée pour la métrique "ajout de tache"

Enfin, un dernier paramètre à choisir est le nombre de taches voulues en résultats. Par exemple, choisir 5 pour ce paramètre permet la création d'une carte de résultat pour cette métrique indiquant les 5 taches simulées qui ont le plus impactées la connexité globale. Après consultation d'autres travaux utilisant cette métrique, et des guides du logiciel Graphab, il a été conclu que **10 taches** seront gardées pour chaque métrique d'ajout de tache.

7.2.2.2 Résultats

Les résultats de la métrique « ajout de tache » se retrouvent dans une seule carte raster, indiquant pour chacune les 10 milieux (de surface 50x50m) dont la restauration affecterait le plus positivement la connectivité globale du bassin versant dans un contexte de trame turquoise. En effet, par un problème de manque de temps (le temps de calcul de cette métrique étant de plusieurs jours), seule la métrique « ajout de tache » pour le *Triturus cristatus* a pu être calculée. Cependant les informations pour pouvoir calculer la métrique pour le *Bufo bufo* ont été transmises à un membre du SYRIBT, qui pourra calculer celle-ci pour la continuité de cette mission. Un zoom des résultats de cette métrique est présenté ci-dessous, et la carte entière est présente en Annexe 8.

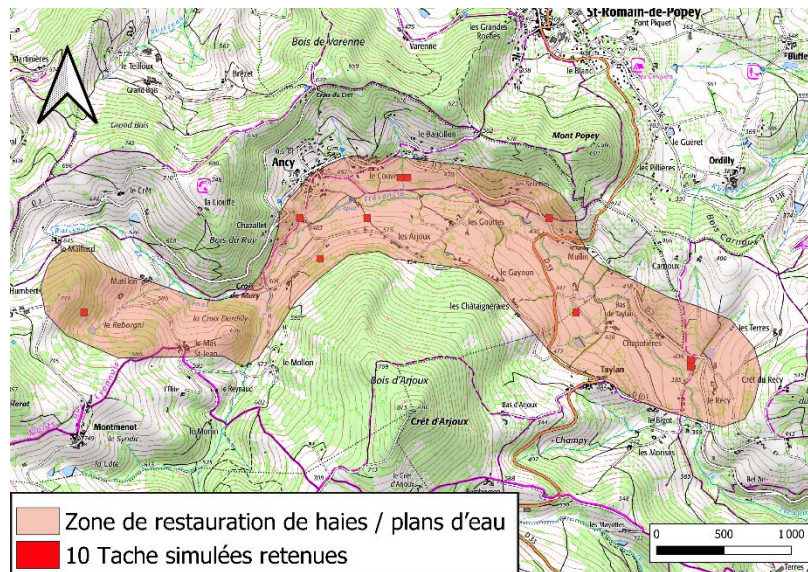


Figure 14: Résultats de la métrique "ajout de tache" pour l'espèce *Triturus cristatus*

On voit alors d'abord que pour le *Triturus Cristatus*, toutes les taches à restaurer se trouvent dans un seul périmètre restreint. Après comparaison avec la couche d'occupation du sol, ce périmètre restreint est en réalité aux abords de la plus grande zone humide du territoire d'étude, ce qui explique pourquoi les 10 espaces à restaurer indiquées par Graphab se trouvent à cet endroit.

On peut maintenant réfléchir à des exemples d'utilisation d'une telle carte. Une carte comme celle-ci trouverait parfaitement sa place dans un projet où l'on souhaite faire une restauration (planter une haie, créer un plan d'eau...). Elle permettrait alors de cibler les espaces à prioriser pour l'aboutissement de tels projets. Par exemple, si un appel à projet pour plantation de haies a lieu, et qu'un professionnel souhaite répondre à celui-ci par exemple, il peut alors utiliser la carte, plus précisément en étudiant les polygones « » pour choisir les endroits pertinents pour la plantation de celles-ci.

7.2.3 Pertinence des cartes de résultat

Cependant, la pertinence des cartographies produites peut être longuement discutées. Tout d'abord, le contexte de trame turquoise, est difficile à identifier au vu des cartographies sortantes. En effet, les seules entités présentes « à protéger » sur ces cartes sont les entités qui ont pu être prises en compte pour les taches d'habitat lors des modélisations : elles ne

concernent alors que les plans d'eau, les zones humides et les haies. On peut alors déjà remarquer que les cours d'eau, principaux acteurs de la trame turquoise ou encore les forêts et lisières, ne sont pas pris en compte dans les cartes des milieux à protéger ou restaurer. Les cours d'eau devaient l'être pour les espèces *Myotis daubentonii* et *Coenagrion mercuriale*, mais il a été impossible de modéliser ces espèces. Concernant les forêts et lisières, le fait que ce soient des entités de très grande surface rend impossible leur prise en compte dans les taches d'habitat. Pour améliorer les modélisations, il faut alors trouver des moyens d'incorporer ces entités dans celles-ci, c'est-à-dire trouver comment les incorporer de manière pertinente dans les taches d'habitat (une idée serait de les scinder en des morceaux de surface beaucoup plus faible, mais la pertinence de cette idée est à discuter).

De plus, il faut savoir que les haies sont extrêmement plus nombreuses au sein du bassin versant par rapport aux zones humides. Cela veut dire que lors des modélisations, de très nombreux chemins de dispersions ne relient en réalité que des haies, et ne prennent pas en compte d'éléments spécifiquement liés à la trame turquoise. Cela veut alors dire que beaucoup d'espaces présents dans les milieux à protéger des cartes de résultats ne sont en réalité pas en lien avec la trame turquoise. Pour pallier ce problème, il faudrait alors trouver un moyen de ne sélectionner que les haies qui seraient utilisées dans le contexte de cette trame. Une idée serait peut-être de ne sélectionner que les haies se trouvant à une certaine proximité des zones humides. Une autre idée serait de filtrer tous les chemins de dispersion de manière à ne garder que ceux qui prennent en compte au moins un plan d'eau ou un cours d'eau par exemple. Ces idées sont à tester, et leur possibilité de réalisation est à réfléchir.

Dans le cas des résultats de la métrique « ajout de tache », on peut d'abord se demander si retenir les 10 taches simulées les plus importantes est suffisant. En effet, au vu des cartes produites, il semble que les taches retenues se rassemblent dans des périmètres assez restreints, et semblent en très faible nombre comparé à la grandeur de la zone d'étude. Les cartes de zones à prioriser pour des restaurations présentent des milieux à prioriser sur une très faible partie de la zone d'étude, rendant la carte inutile pour la plupart des communes du bassin versant. Pour améliorer celle-ci, il serait pertinent de réfléchir à adapter le nombre de taches retenues à la grandeur de la zone d'étude. Il faudrait alors faire des tests avec plusieurs valeurs du nombre de taches à retenir afin d'évaluer la limite à partir de laquelle des taches non pertinentes pour des restaurations sont présentes parmi les taches retenues. Une idée serait par exemple de retenir un grand nombre de tache (100 par exemple), et d'utiliser les résultats de la métrique utilisée par l' « ajout de tache » (PC ou EC, voir tableau 11) pour retirer celles qui auraient une valeur de cette métrique trop faible par rapport à un seuil limite qui serait réfléchi. Ces solutions sont à tester pour pouvoir améliorer la pertinence de la carte de résultats de la métrique « ajout de tache ».

Enfin, il faut savoir que la manière de présenter les résultats des modélisations, et ainsi choisir comment créer graphiquement les cartes finales a été décidée en un laps de temps moindre (les dernières modélisations informatiques ayant été finalisées le jour de la fin du stage). Les cartographies présentes dans ce rapport sont à retravailler, et il y a un vrai travail de réflexion nécessaire (qui n'a pas pu être réalisé par manque de temps) pour choisir sous quelle forme ces cartes devraient être. Ce travail doit prendre en compte les attentes exactes des élus à qui ces cartes sont destinées, mais il faut aussi réfléchir à la manière de rendre les cartes les plus pertinentes possibles par rapport à leur précision. Plusieurs idées peuvent être

réfléchies : peut-être augmenter le seuil de « non-contribution » de la métrique dPC des taches d'habitat pour permettre l'inclusion d'un grand nombre d'espaces à très faible contribution dans la carte, permettant de plus la remplir par exemple. Ou encore réfléchir à une manière de superposer les cartes sortantes de la métrique dPC du *Bufo bufo* avec celle du *Triturus cristatus*.

7. Conclusion

L'importance de la Biodiversité n'est plus à prouver, et la recherche d'outils permettant la préservation et restauration de celle-ci est impérative, spécifiquement dans un contexte de changement climatique. La mise en place des trames vertes et bleues fait partie de ces outils, mais il s'avère qu'elles ne sont plus suffisantes pour étudier tous les habitats. L'apparition de la trame turquoise, permet l'étude précise de milieux au croisement des trames vertes et bleues, mais son apparition relativement récente dans le monde de l'écologie rend très rare les études faites sur celle-ci. La protection et restauration de celle-ci est obligatoire, pour empêcher la disparition future de nombreuses espèces liées à ces milieux. Il est donc impératif de trouver et essayer tous les nouveaux outils accessibles pour son étude.

C'est donc dans ce contexte que ce stage s'est inséré. Le but était alors de tester un outil relativement récent : la modélisation de trame écologique, mais à une échelle encore jamais étudiée pour la trame turquoise : celle d'un bassin versant entier. L'objectif était alors de savoir si une modélisation à cette échelle était possible, et si oui, si les résultats étaient pertinents.

L'outil de la modélisation informatique de trame écologique est un outil très intéressant pour de nombreux professionnels du monde de l'écologie. Elle peut permettre à un membre de bureau d'étude, à un gestionnaire d'espace naturels, ou encore à un écologue professionnel la construction de cartes caractérisant les espaces sensibles à protéger et les espaces à restaurer en lien avec certaines trames écologiques (notamment la trame turquoise) sur sa zone d'étude. Cet outil est puissant, et permet, avec une certaine précision selon les données d'entrées, de produire des cartographies précises et pertinentes dans la cadre de la protection et restauration de la trame turquoise. Cependant, c'est un outil qui nécessite un gros travail en amont des modélisations, aussi bien qu'en aval pour l'analyse des résultats. Bien-sûr certaines étapes peuvent aussi être réalisées par des prestataire pour un gain de temps et de précisions. Par exemple, le prestataire Terr'Oiko a été contacté pour faire un devis pour modéliser les dispersions des espèces par un autre moyen que Graphab mais le prix trop élevé du devis n'en valait pas le coup pour les besoins du SYRIBT.

En conclusion de ce stage, on peut conclure qu'il est effectivement possible de modéliser la trame à cette échelle. Malgré de nombreux problèmes rencontrés, des adaptations ont été faites, et des solutions ont été trouvées pour rendre possible le calcul des métriques finales. Cependant, un travail important est nécessaire pour rendre les résultats plus pertinents, et les cartes produites dans cette mission ne sont pas vraiment utilisables dans leur forme actuelle. De nombreuses améliorations et idées sont à tester pour améliorer la pertinence des résultats, et les plus importantes sont résumées ci-dessous. Il faudrait ainsi :

- Trouver des sources de données d'occupation du sol plus précises et complètes

- Revoir la sélection des espèces pour remplacer les espèces non modélisables par d'autres modélisables et ainsi inclure la « faisabilité de modélisation » en critère de sélection
- Trouver un moyen d'inclure forêt, lisière et cours d'eau dans les modélisations (des pistes de solutions sont proposées en partie 7.2.3)
- Réfléchir à la façon de mettre en forme les résultats des modélisations selon les besoins précis des élus à destination des cartes de résultats.

Ce stage était une première approche de l'utilisation de l'outil de la modélisation de la trame turquoise à l'échelle d'un bassin versant, et les résultats obtenus ainsi que les pistes d'améliorations de ceux-ci permettront à l'avenir des modélisations pertinentes et la création d'outil importants pour la protection et restauration de la trame turquoise.

Bibliographie

- Andelman, S., & Fagan, W. (2000). Umbrellas and flagships : Efficient conservation surrogates or expensive mistakes? *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 97, 5954-5959. <https://doi.org/10.1073/pnas.100126797>
- Foltête, J.C. Clauzel, C., Vuidel, G. (2012). A software tool dedicated to the modelling of landscape networks. *Environmental Modelling & Software*, 38: 316-327.
- Clauzel, C., Girardet, Xavier. (2018). Graphab / 14 réalisations à découvrir. DOI : [10.13140/RG.2.2.32089.21605](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32089.21605)
- Clauzel, C., Foltête, J.C., Girardet, X., Vuidel, G. (2018). Graphab 2.4, manuel d'utilisation. : 43.
- Clauzel, C., Gaber, C., Godet, C. (2020). Fiches méthodologiques pour la prise en main de Graphab. LADYSS-SNPN
- Puissauve, R., Legros, B., Kerbiriou, C., Marmet, J. (2015). Fiches d'information sur les espèces aquatiques protégées : Murin de daubenton, *Myotis daubentonii* (Kuhl, 1817). Service du patrimoine naturel du MNHN & Onema.
- Puissauve, R., Boissinot, A., De Massary J.C. (2015). Fiches d'information sur les espèces aquatiques protégées : Triton crêté, *Triturus cristatus* (Laurenti, 1768). Service du patrimoine naturel du MNHN & Onema.
- Corolla, J.P., Fey, L., Kupjer, Michel. (2013). *Bufo Bufo* (Linnaeus, 1758). DORIS.
- Puissauve, R., Dupont, P., Lambert, J. (2015). Fiches d'information sur les espèces aquatiques protégées : Agrion de Mercure, Coenagrion mercuriale (Charpentier, 1840). Service du patrimoine naturel du MNHN & Onema.
- Arthur, L. (s. d.). *Murin de Daubenton—Myotis daubentonii*.
- Caballero-Díaz, C., Sánchez-Montes, G., Butler, H. M., Vredenburg, V. T., & Martínez-Solano, Í. (s. d.). *The Role of Artificial Breeding Sites in Amphibian Conservation : A Case Study in Rural Areas in Central Spain*.
- Caro, T., Doherty, G., & O'Doherty, G. (1999). On the Use of Surrogate Species in Conservation Biology. *Conservation Biology*, 13, 805-814. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1999.98338.x>

- Chailloux, M. (2020, avril 7). *BioDispersal : Extension QGIS pour cartographier les TVB*. NaturaGIS. <https://naturagis.fr/qgis/biodispersal-extension-qgis-continuites-ecologiques-tvb/>
- digiSchool. (2022, mai 10). *Dimensions réglementaires des aménagements de la voirie*. superCode. <https://www.codedelaroute.fr/articles/dimensions-reglementaires-amenagements-voirie/>
- Fiches espèces *Shna-Ofab*. (s. d.). Consulté 5 mai 2023, à l'adresse https://ressources.shna-ofab.fr/fr/fiches-especes/crapaud-commun-bufo-bufo_45_T259.html
- Fleishman, E., Murphy, D., & Brussard, P. (2000). A New Method for Selection of Umbrella Species for Conservation Planning. *Ecological Applications* - ECOL APPL, 10. <https://doi.org/10.2307/2641116>
- INRAE, Institut Agro, & Berthier et al. (s. d.). *SIG Réseau zones humides*. Consulté 12 mai 2023, à l'adresse <http://sig.reseau-zones-humides.org/visualiseur/?idlyr=12906>
- Lambeck, R. J. (1997). Focal Species : A Multi-Species Umbrella for Nature Conservation. *Conservation Biology*, 11(4), 849-856.
- Lissotriton helveticus* (Razoumowsky, 1789)—*Triton palmé (Le)-Présentation*. (s. d.). Consulté 5 mai 2023, à l'adresse https://inpn.mnhn.fr/espece/cd_nom/444432
- Locquet, A., & Clauzel, C. (2018a). Identification et caractérisation de la trame verte et bleue du PNR des Ardennes : Comparaison des approches par habitat et par perméabilité des milieux. *Cybergeo: European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.29864>
- Locquet, A., & Clauzel, C. (2018b). Identification et caractérisation de la trame verte et bleue du PNR des Ardennes : Comparaison des approches par habitat et par perméabilité des milieux. *Cybergeo: European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.29864>
- Myotis daubentonii* (Kuhl, 1817)—*Murin de Daubenton-Présentation*. (s. d.). Consulté 5 mai 2023, à l'adresse https://inpn.mnhn.fr/espece/cd_nom/200118
- Naturelle, M. national d'Histoire. (s. d.-a). *Bufo bufo* (Linnaeus, 1758)—*Crapaud commun (Le)*. Inventaire National du Patrimoine Naturel. Consulté 5 mai 2023, à l'adresse https://inpn.mnhn.fr/espece/cd_nom/259
- Naturelle, M. national d'Histoire. (s. d.-b). *Triturus cristatus* (Laurenti, 1768)—*Triton crêté (Le)*. Inventaire National du Patrimoine Naturel. Consulté 12 mai 2023, à l'adresse https://inpn.mnhn.fr/espece/cd_nom/139

Roberge, J.-M., & Angelstam, P. (2004). Usefulness of the Umbrella Species Concept as a Conservation Tool. *Conservation Biology*, 18, 76-85. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2004.00450.x>

SRCE Picardie. (2013). *Méthodologie retenue pour l'identification des composantes de la Trame verte et Bleue du SRCE de Picardie*.

Annexes

Annexe 1 : Précisions concernant les données utilisées

Données d'occupation du sol :

Les données d'occupation du sol sont les plus importantes pour le projet mené. Elles permettent de caractériser les déplacements des espèces, selon le type de milieu présent. De nombreuses recherches ont été effectuées pour trouver des couches d'occupation du sol précises. Pour chaque occupation du sol, les sources de données sont choisies selon le maximum de précision, et sont parfois couplées et modifiées manuellement pour plus de précision.

La première source de données est la base de données géographiques CORINE Land Cover. Elle est produite dans le cadre du programme européen CORINE, de coordination de l'information sur l'environnement. Il s'agit de cartographies VECTEUR de l'occupation du sol du territoire de 38 États européens. Les cartes utilisées sont celles du territoire français métropolitain. L'échelle est à 1/100 000^e. Bien que complètes, les données de cette source sont souvent erronées, ce qui ne lui permet pas d'être notre source de donnée principale.

La seconde source de données est l'IGN. L'IGN est l'Institut Géographique National. Il s'agit d'un établissement public à caractère administratif, assurant la création, la diffusion et l'entretien d'informations géographiques de référence pour le territoire français. L'IGN publie ainsi gratuitement des informations SIG concernant notamment les occupations du sol du territoire français, et les différents réseaux existants (routier, hydrographique...), et les met régulièrement à jour. Les données IGN utilisées sont celles de 2020 (BD TOPO 2020) pour les données globales d'occupation du sol, et 2021 (ROUTE 500, 2021), pour les données de réseau routier. Elles ont ainsi permis d'obtenir des données géographiques précises concernant les haies, les forêts, le réseau routier et le réseau hydrographique de la zone d'étude.

La troisième source de données utilisée est l'OSCOM (ou Occupation du Sol à l'échelle COMMunale). Il s'agit d'une base de données produite à partir de diverses couches de données dites à grande échelle (dont des données IGN par exemple). A titre de comparaison, les couches CORINE LAND COVER ont une échelle de 1/ 100 000^e, tandis que l'OSCOM a une échelle d'1/10 000^e, lui permettant des utilisations à l'échelle inter-communale, mais aussi communale. Cependant, bien que l'OSCOM soit beaucoup plus précise que les autres sources utilisées, ses données datent de 2013, et ne sont ainsi utilisées que si elles sont pertinentes par rapport aux autres données disponibles.

La quatrième source de données utilisée est celle de l'INRAE 2014. Une cartographie spécifique des zones humides potentielles ayant été réalisée cette année-là, ce sont ces informations qui ont permis une cartographie la plus précise des zones humides de la zone d'étude (l'occupation du sol la plus importante pour la trame turquoise) (INRAE, Institut Agro ; Berthier et al., 2014).

Enfin, la dernière source de données utilisée est le registre parcellaire graphique (RPG). Il s'agit du registre servant de référence pour les cartographies des parcelles agricoles. Cette source est mise à disposition de tous gratuitement et a ainsi permis une différenciation précise entre les parcelles agricoles et les prairies, avec des données récentes de 2021 (la version 2022 n'étant pas encore produite).

Grâce à toutes ces sources de données, chaque occupation du sol a été analysée avec soin, et une réflexion a été portée sur les sources à utiliser pour chacune d'elles, afin de produire une carte finale d'occupation du sol la plus précise possible.

Données INPN :

L'INPN est L'Inventaire National du Patrimoine Naturel. Il s'agit d'un site web permettant la diffusion d'informations concernant la biodiversité et la géodiversité française. L'INPN diffuse des informations relatives aux espèces animales, végétales et de la fonge, mais aussi aux espaces protégés et au patrimoine géologique.

Les données de L'INPN ont ainsi permis d'obtenir toutes les informations des espèces cibles nécessaires pour les modélisations, autant pour leur choix, que pour leur dispersion. L'INPN étant une source d'information nationale validée par des réseaux d'experts et régulièrement mise à jour, elle permet l'utilisation de données sûres et à jour.

Données des PLU :

Une autre source de données a aussi été utilisée ponctuellement. Ce sont les données des PLU des communes des bassins versants. Bien que ces données soient les plus précises car venant d'analyses à échelle locale, elles ont été peu utilisées dû à la quantité d'erreurs vectorielles présentes dans les couches disponibles.

Annexe 2 : Explications précises des modifications des couches d'occupation du sol

Tout d'abord, la couche de réseau routier a été séparée en deux couches vecteur, puis un tampon a été appliqué sur chaque route, selon leur type (précisé dans la table attributaire de la couche) dont la largeur a été définie par photo-interprétation. Les deux couches sont ainsi :

- Les routes « **traversables** », à savoir toutes les routes communales. Ces dernières peuvent permettre le passage d'espèces, bien qu'en présentant un danger, mais ne sont pas un blocage.
- Les routes « **bloquantes** », regroupant les voies départementales, régionales, nationales et les autoroutes. Ces dernières représentent un trop gros danger pour les espèces (à l'exception des espèces volantes) et bloquent la dispersion de celles-ci.

Pour mieux comprendre, des schémas explicatifs sont présentés ci-dessous. Ainsi, on voit sur les figures 15A et 15B la différence entre les routes avant et après tampons pour les routes bloquantes, et sur la figure 15C un exemple de routes traversables.

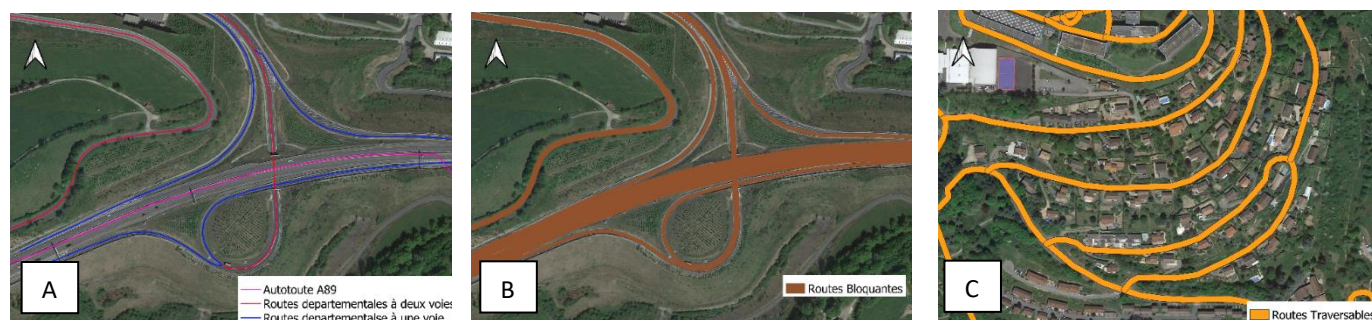


Figure 15: Exemple de routes bloquantes (avant (A) et après (B) application de tampons), et de routes traversables (C).

Les éléments routiers pouvant être évités par les espèces ont également été retirés de la carte (tunnels, viaducs, ponts). De leur côté, les haies, initialement en format linéaire, ont été mises en tampon pour modéliser leur largeur, estimée à 5.0 mètres en moyenne d'après les membres du SYRIBT. Une mise en tampon a également été effectuée sur toutes les forêts pour une largeur de 2.5m, afin de créer une couche de lisière de forêt.

Les données de cours d'eau étant sous forme de lignes vectorielles, elles ont alors aussi été transformées en polygone avec application d'un tampon, la taille de celui-ci étant proportionnelle à la largeur du cours d'eau : 2.5m pour les ruisseaux, 4.0m pour la Turdine, 5.0m pour la Brévenne, 5.5m pour l'Azergues, et enfin 3.0m pour les autres cours d'eau (la Brévenne, la Turdine et l'Azergues étant les seuls cours d'eau significativement plus importants que les autres en termes de largeur de lit). Le type de chaque cours d'eau étant défini dans la table attributaire de la couche, les largeurs de tampons ont été définies par mesures sur photo-interprétation et par rapport à la résolution de pixels choisie pour la suite (voir partie 5.3.3). De plus, tous les cours d'eau temporaires, identifiés grâce à une cartographie issue de l'IGN du réseau hydrographique du bassin versant, ont été retirés.

Concernant les zones humides, elles sont réparties en trois couches :

- Les plans d'eau de plus de 600m² (surface limite d'habitat pour le triton crêté, l'une des espèces cible (OFB, 2023)).
- Les plans d'eau de moins de 600m².
- Toutes les autres zones humides (ripisylve, prairie humide...).

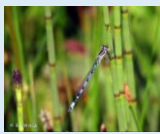
Concernant les zones urbanisées, après dialogue avec une écologue professionnelle, Mme Bertolini, cette dernière nous a encouragé à les scinder en deux couches pour plus de pertinence lors des modélisations :

- Les zones urbanisées péri-urbaines, comprenant des maisons avec jardins,
- Les centres-villes, ou zones urbanisées sans végétation.

Ainsi, il est possible de différencier les zones urbanisées traversables par certaines espèces, notamment par le biais des jardins, des zones urbanisées bloquantes, sans végétation, telles que les centres-villes.

Annexe 3 : Espèces cible choisies et toute leurs caractéristiques

Tableau 13: Caractéristiques des 4 espèces cibles choisies

Espèce	<i>Bufo Bufo</i> Crapaud commun	<i>Triturus cristatus</i> Triton crêté	<i>Coenagrion mercuriale</i> Agrion de mercure	<i>Myotis daubentonii</i> Murin de Daubenton
Photographie				
Besoin milieu humide	reproduction (accouplement, ponte et vie juvénile)	reproduction (accouplement, ponte et vie juvénile) et habitats estivales	alimentation, ponte et habitat ; nécessaire au développement de la larve	alimentation
Distance de dispersion	3 km	1 km	1km	20 km
Présence sur le BV	Très forte	Moyenne (mais sous-estimée)	Moyenne	Forte
Habitats principaux	- Jardins domestiques - Landes, fourrés, toundras - Boissements, forêts - Pâturages boisés - Bocages - Grands jardins non domestiques - Prairies - Eaux de surface continentales	- Mares, étang (<600m2) - Prairies - Prairies humides - Boissements - Fourrés	- Rivières (à renoncules, oligotrophes basiques, oligotrophes acides...) - Ripisylve (Végétation à croissance lente du bord des eaux ou ampibies) - Eaux de surface continentale - Eaux courantes de surface - Sources ruisseaux de sources	- Eaux dormantes de surface - Cours d'eau permanents non - Habitats continentaux sans végétation, ou claisemée - Constructions à faible densité - Zones batiées, sites industriels et autres habitats artificiels - Bâtiments des villes et villages - Boissements, forêts et autres habitats boisés - Grottes, passages et plans d'eau souterrains terrestres
Habitats secondaires		- Végétation de bas-marais - Cours d'eau permanents non soumis aux marées - Zones littorales - Eaux courantes/dormantes de surface - Ourlets, clairières forestières - Haies - Landes, toundras	- Formations à hélophytes riches en espèces - Zone littorales des eaux de surfaces continentales	
Représente d'autres espèces	Peut être considéré parapluie	Considéré comme espèce parapluie : SHNA, Vincent VILCOT et Nicolas VARANGUIN de l'Observatoire de la faune de Bourgogne	Espèce parapluie selon le Conservatoire des Sites Lorrains et François-M. Bouton de la LPO72.	Chauve-souris en général considérées comme de parapluies (Ministère de l'écologie, 2015)
Sensibilités	Menacé par les pesticides, écrasé sur les routes	Sensible aux rejets agricoles, à la pollution des eaux.	Grosse sensibilité aux pollutions, changements de température, anthropisation. A des besoins précis: eaux courantes claires bien oxygénées, avec végétation hygrophile abondante	Sensible aux infrastructures linéaires, modifications d'habitats souterrains et forestiers
Statut INPN	Espèce déterminante ZNIEFF, Protégée, Liste rouge mondiale de préoccupation mineure	Espèce déterminante ZNIEFF, Protégée, Liste rouge mondiale de préoccupation mineure	Espèce déterminante ZNIEFF, Protégée, Liste rouge mondiale de préoccupation mineure	Espèce déterminante ZNIEFF, Protégée, Liste rouge mondiale de préoccupation mineure

Annexe 4 : Précisions concernant les étapes de modélisation sous Biodispersal.

Dans l'étape 1, la localisation du fichier d'emprise de la zone d'étude (ici le bassin versant ainsi qu'un tampon d'1km autour de celui-ci) est renseigné, ainsi que la résolution voulue pour les cartes raster sortantes. Ici nous choisissons une résolution de 2.0m (voir partie 5.3.2).

Dans l'étape 2, les « sous-trames » sont renseignées. Il s'agit des sous-trames selon lesquelles les cartes de friction seront modélisées. Ici, une sous-trame équivaut à une espèce cible. Ces 4 dernières, choisies dans la partie 5.2.3, y sont donc renseignées.

L'étape 3 consiste à choisir les différentes couches d'occupations du sol qui seront utilisées afin de les charger dans l'extension, puis de les rasteriser. Il est alors possible de renseigner des couches vectrices comme raster, cependant utiliser des couches raster à cette étape semble faire buguer l'extension. Il est donc important de ne pas rasteriser les couches d'occupation du sol avec les outils habituels de Qgis, mais d'utiliser la rasterisation de Biodispersal, qui a lieu à l'étape suivante. Bien qu'il soit possible de fusionner les différentes couches directement dans l'extension, il a été préféré de les fusionner en amont (voir figure 4) et ainsi directement saisir la couche fusionnée dans Biodispersal.

L'étape 4 est l'étape de « hiérarchisation ». Elle permet de hiérarchiser les couches d'occupations du sol puis de les fusionner pour choisir, lors de la superposition de pixels, quelle couche sera privilégiée. Cependant, bien que la hiérarchisation et fusion des couches ait déjà été effectuée précédemment, cette étape est obligatoire : cliquer sur le bouton de fusion de cette étape permet la création de fichiers obligatoires pour les étapes suivantes. Il est donc impératif d'exécuter chaque étape de Biodispersal dans l'ordre même si elles ne sont pas toutes pertinentes selon les cas.

L'étape 5 est l'étape de création des cartes de friction. Il est alors nécessaire d'allier les tableaux de perméabilité des occupations du sol (tableau 8) avec le tableau des coefficients de frictions (tableau 7) pour y rentrer les bons coefficients dans les bonnes cases. Le tableau rempli, il faut alors « Produire les couches de friction ». Cela permet de produire, pour chaque espèce cible, une carte raster où chaque pixel indique une valeur de friction. C'est la couche raster finale qui sera utilisée pour modéliser les dispersions des espèces.

Métriques de caractérisation de la connectivité :

Les premières métriques analysées sont celles étudiant la connectivité des taches d'habitat. En d'autres termes, elles permettent d'étudier les relations entre les taches et celles voisines, et permettent d'attester de l'importance d'une tache au sein d'un graphe. Les deux métriques n'ayant pas la même utilité, il est pertinent de les appliquer toutes les deux de manière complémentaire (Clauzel *et al.*, 2020 ; Gaber, 2019).

La métrique Betweenness Centrality :

La métrique **Betweenness Centrality**, ou B.C., permet d'évaluer la capacité des taches à être des habitats **relais**. Elle se base sur la distance entre la tache « i » étudiée et les autres taches, ainsi que leur capacité. Ainsi, la valeur de B.C. augmente à mesure que la tache est parcourue par un grand nombre de chemins à l'intérieur du graphe, on parle de **fréquence d'utilisation** (Clauzel *et al.*, 2020). Par exemple, dans la figure 16, la tache rouge aura une grande valeur B.C. car elle seule connecte trois sous-réseaux, et est donc un relais obligatoire pour connecter ceux-ci.

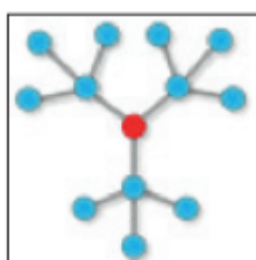


Figure 16: Exemple d'un schéma présentant une tache avec une grande valeur B.C. (Clauzel *et al.*, 2020)

La métrique Flux d'interaction :

La métrique **Flux d'interaction**, ou I.F., permet l'indication d'interactions potentielles entre la tache étudiée « i » et les autres taches du graphe. Le calcul de sa valeur dépend de la distance entre la tache i et les autres, ainsi que de leurs capacités. Ainsi, une tache d'habitat du graphe a une valeur de I.F. élevée si la tache a une grande capacité, et a beaucoup de taches voisines qui ont elle aussi une grande capacité (voir figure 17). Grâce à cette métrique, il sera possible d'identifier les « cœur » du réseau et des sous-réseaux du graphe, qui pourront être par la suite définies comme les espaces de la trame turquoise à protéger prioritairement par exemple.

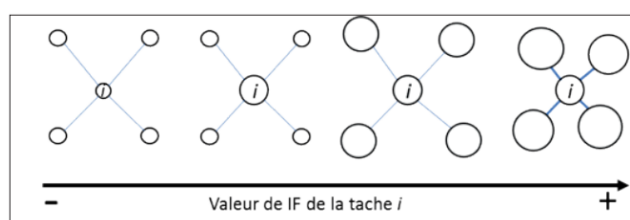


Figure 17: Exemple de la signification des valeurs de la métrique I.F. (Clauzel *et al.*, 2020)

La métrique delta P.C. décomposée :

La métrique **delta P.C. décomposée** est une métrique permettant de simuler la suppression d'une tache d'habitat. Pour chaque tache du graphe, le logiciel va ainsi supprimer la tache, puis recalculer la métrique globale, et alors comparer la valeur de la connectivité globale à la valeur initiale. Cette valeur de connectivité globale correspond alors à la somme de trois fractions (Gaber, 2019 ; Clauzel *et al.*, 2020):

- **dPCarea**, qui correspond à la variation de la connectivité globale engendrée par perte de la **surface** de la tache i supprimée.
- **dPCflux**, qui correspond à la variation de la connectivité globale engendrée par la perte des **connexions** de la tache i supprimée.
- **dPCconnector**, qui correspond à la variation de la connectivité globale engendrée par la modification des chemins reliant les autres taches, qui passaient initialement par la tache i supprimée.

Cette métrique est alors l'une des plus importante pour le projet. Elle permettra alors d'identifier les taches dont la suppression aura le plus d'effet néfaste sur la qualité des connexions liées à la trame turquoise, des zones d'études. Elle indiquera alors les espaces sensibles à protéger prioritairement.

Simulation d'une restauration :

La simulation d'une restauration est possible dans Graphab à l'aide de l'outil « Ajout de taches ». Il s'agit d'un outil permettant la simulation de l'ajout d'une tache au sein du Graphe, et de calculer des métriques afin d'évaluer les effets bénéfiques ou néfastes que la tache ajoutée engendre sur le réseau. Cet outil permet alors d'identifier les meilleurs emplacements de restauration pour restaurer les connexions des réseaux et sous-réseaux. Cet outil trouve notamment sa place dans des mesures de réduction d'impact d'un aménagement (dans la phase « compenser » de la séquence ERC par exemple).

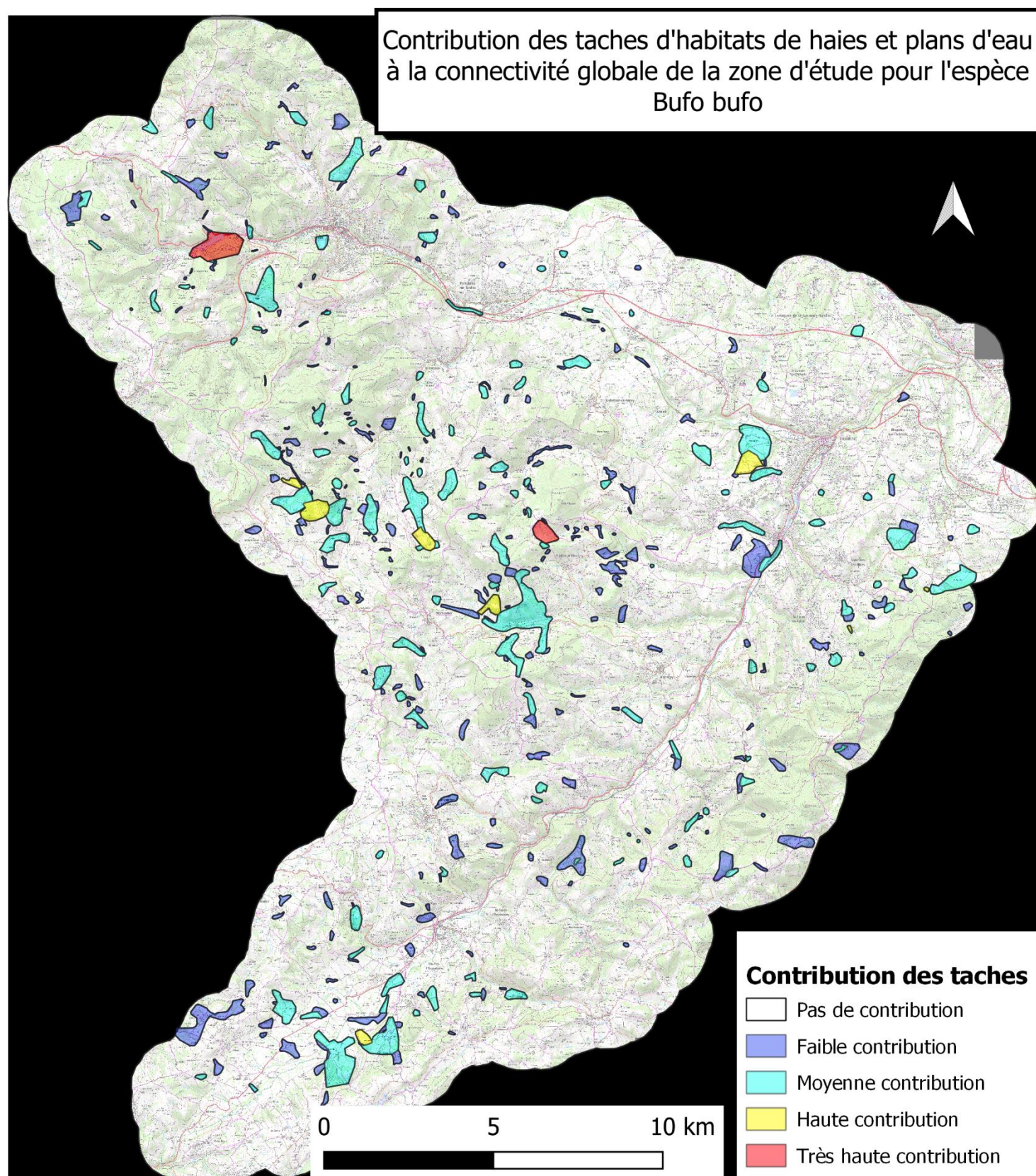
Pour utiliser cet outil, il est d'abord nécessaire de choisir le nombre de taches fictives à créer. De manière générale, la simulation de 10 taches est plus pertinente (Clauzel *et al.*, 2020) et c'est donc ce nombre qui est choisi pour cette étude. Le logiciel va alors identifier les 10 meilleurs emplacements de création de nouvelles taches d'habitats (comme 10 mares ou haies par exemple) selon le gain pour la connectivité globale. De cette manière, chaque pixel de la carte est testé, et les 10 meilleurs emplacements sont ensuite localisés.

Ensuite, il est nécessaire de choisir quelle métrique utiliser pour évaluer les variations de connectivité. Pour ce projet, deux métriques **globales** (caractérisant la connectivité d'un graphe entier) ont alors été retenues :

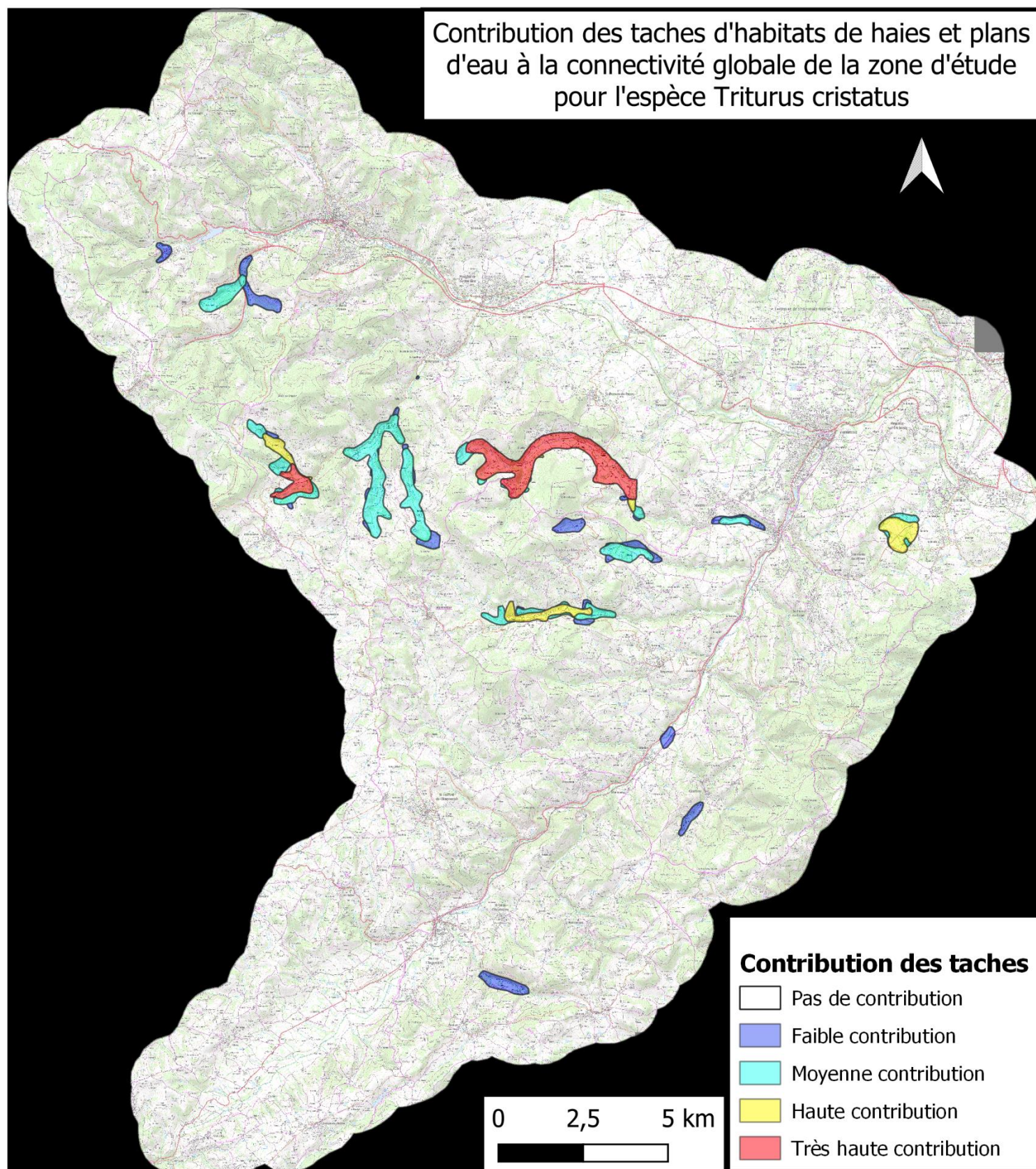
- La **Probabilité de connectivité (P.C.)**, correspondant à la probabilité que deux individus aléatoires de la zone d'étude entrent en contact. Cela peut être parce qu'ils proviennent de la même tache d'habitat ou de deux taches distinctes connectées entre elles.
- La **Connectivité équivalente (E.C.)**, qui calcule la quantité d'habitats atteignables. Il se base ainsi sur la surface d'habitat total, et des connexions entre les taches.

La métrique E.C. est utilisée lorsque la capacité des taches d'habitats n'est pas définie par la surface de la tache mais par les habitats voisins (Clauzel *et al.*, 2020) (ce qui est le cas pour le *Triturus cristatus* et le *Coenagrion mercuriale*). C'est donc cette métrique qui sera utilisée dans cette étape pour ces espèces, tandis que la métrique P.C. sera utilisée pour la *Myotis daubentonii* et le *Bufo bufo*, dont la capacité des taches est définie selon leur surface.

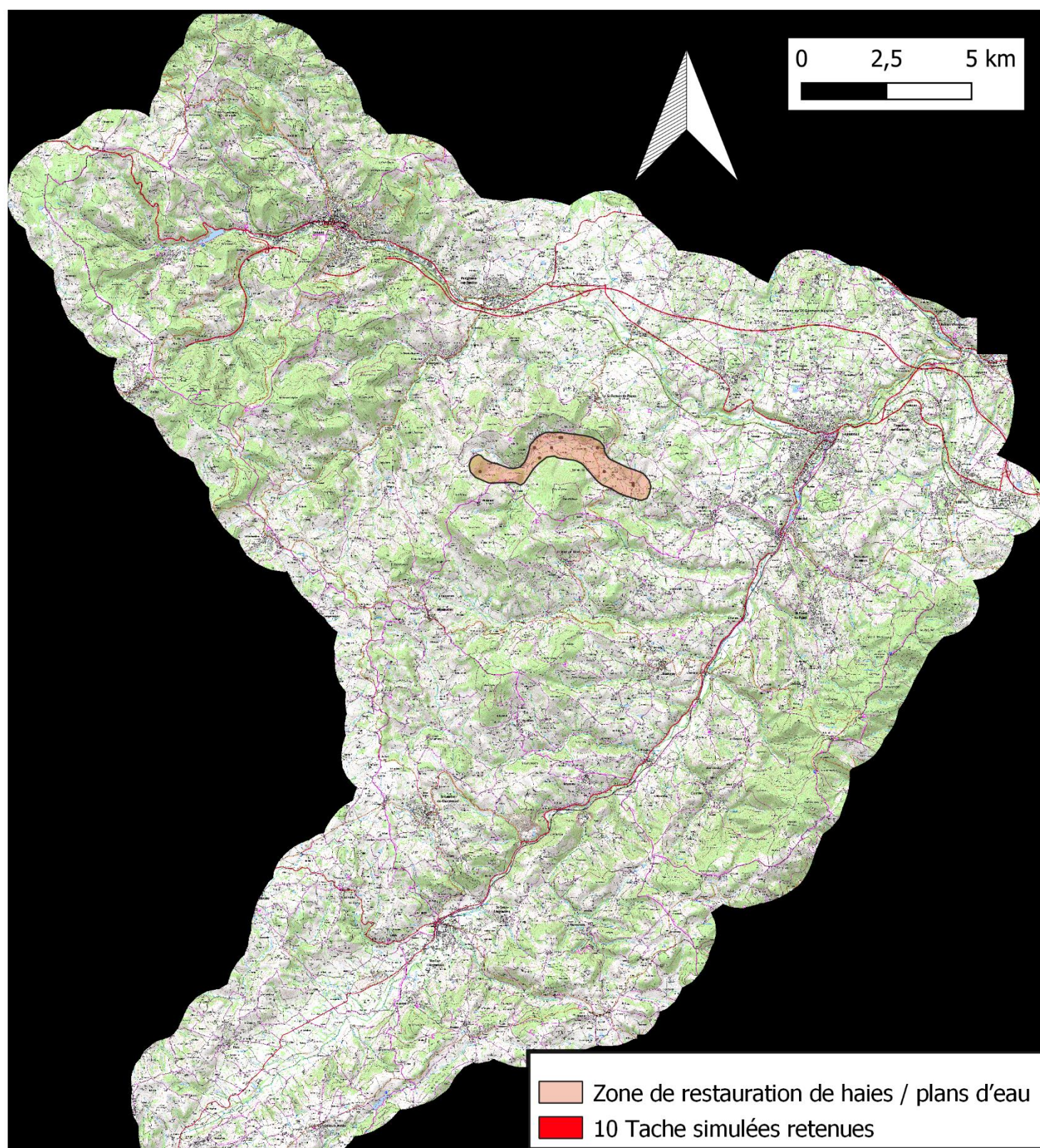
Annexe 6 : Carte montrant les espaces à protéger du bassin versant, en lien avec la trame turquoise, sortante de la modélisation du *Bufo bufo*.



Annexe 7 : Carte montrant les espaces à protéger du bassin versant, en lien avec la trame turquoise, sortante de la modélisation du *Triturus cristatus*.



Annexe 8 : Résultat de la métrique « ajout de tache » pour le *Triturus cristatus*



Annexe 9 : Problèmes rencontrés et solutions apportées

L'un des caractéristiques de la mission confiée est sa technicité. Elle allie de nombreux domaines complexes comme l'utilisation d'algorithmes complexes, utilisation de logiciels nécessitant des ordinateurs très puissants, ou encore la recherche d'informations précises. Au cours de la mission, de nombreuses impasses ont été rencontrées, il a alors fallu réfléchir à des moyens de les contourner, de manière pertinente. Ci-dessous est ainsi présenté un tableau récapitulatif des problèmes majeurs rencontrés, ainsi que des solutions apportées, modifiant les spécificités de la mission par rapport aux demandes émises par le SYRIBT.

Tableau 14: Récapitulatif des problèmes majeurs rencontrés et des solutions apportées

Problèmes	Description	Solution apportée	Avantages	Désavantages
Zone d'étude trop grande	Obtention d'erreurs de "dimensions trop grandes" sur le logiciel Graphab, rendant impossible les modélisations à l'échelle du bassin versant	Redécoupage du bassin versant en 3 parties, correspondant aux communautés de communes le composant, puis lancement des modélisations sur chacune.	Modélisations rendues possibles	Perte de connexions entre les nouvelles parties du bassin versant, et apparition de phénomènes de "bordure" rendant les résultats obtenus sur les bords de ceux-ci incomplets.
Nombre de pixels trop élevé	Après discussion avec le support du logiciel Graphab, la source du problème rencontré ci-dessus ne s'est avérée pas être en lien avec la taille trop élevée de la zone d'étude, mais avec un trop grand nombre de pixels sur les cartes Raster du fait d'une résolution de pixels initialement choisie à 0,50 mètres	Abandon de la méthode de découpage du bassin versant en trois parties présentée ci-dessus, et suppression des cartes et modélisations effectuées sur celles-ci. Changement de la résolution des rasters à 2,00 mètres pour réduire drastiquement le nombre de pixels. Adaptation de la carte d'occupation des sols en conséquences, avec l'exagération de la taille des ruisseaux et certains cours d'eau pour qu'ils soient bien visibles sur les cartes rasters.	Retour à la zone d'étude initiale, sans fragmentation. Suppressions des phénomènes de bordure, et pertinence totale sur la zone d'étude des modélisations. Réduction considérable du nombre de pixels sur les cartes, réduisant grandement les temps de calcul.	Pertes de temps considérables pour la création et suppressions des cartes des trois parties du bassin versant comme expliqué ci-dessus. Mais aussi pour le changement de résolution, impliquant modification de la carte d'occupation des sols pour l'exagération de la largeur des ruisseaux et quelques autres cours d'eau, le recalcul de tous les coefficients de friction et la recréation de toutes les cartes de friction.
Distance de dispersion trop élevée pour la Myotis daubentonii	Selon l'INPN, distance maximale de dispersion théorique de 20 km pour la Myotis daubentonii. Cependant cette grande distance engendre un nombre beaucoup trop élevé de possibilités de déplacements, nécessitant du matériel informatique très puissant non accessible pour les modélisation de dispersion de cette espèce.	Adaptation de la distance de dispersion de l'espèce: nouvelle valeur établie à 10 km. Cette valeur a été choisie de manière pertinente selon les informations de l'INPN et les besoins pour les modélisations d'une espèce à grande dispersion (et validation de la valeur par Mme Carole GABER, une professionnelle de Graphab). Adaptation des paramètres de modélisation à cette nouvelle distance, avec changement de la variable alpha de $\alpha = 0,5$ à $\alpha = 0,05$ (voir partie XX).	Adaptations des paramètres de modélisation au matériel informatique disponible. Cela a rendu possible les modélisations pour la Myotis daubentonii et permis le maintien d'une espèce à grande dispersion au sein du projet. De plus les modélisations sont ainsi rendues plus réalistes étant donnée que l'espèce parcourt beaucoup plus souvent des distances de l'ordre de 10km ou moins, plutôt que 20km qui est sa distance maximale de dispersion (gain de pertinence sur les modélisations).	Pertes de temps pour le changement de la valeur de dispersion, ayant engendré des recalculs de coefficients de friction et changement de la carte de friction pour l'espèce.
Erreur impossible à résoudre sur Graphab	Présence d'une erreur obtenue sur le logiciel Graphab impossible à résoudre empêchant les modélisations pour le Triturus cristatus et la Myotis daubentonii	Prise de contact avec plusieurs professionnels : Mme Carole GABER, ancienne membre de FNE (France Nature Environnement) et écologue professionnelle, ainsi que de Mr Gilles VUIDEL, membre du support de Graphab. Malgré des discussions avec Mme Gaber, elle n'a pas su trouver la source de l'erreur. Cependant, après discussion avec Mr VUIDEL, celui-ci a décelé un bug du logiciel Graphab à l'origine de l'erreur obtenue. Il a ainsi corrigé l'erreur, et effectué une mise-à-jour du logiciel, avant de mettre cette nouvelle version accessible sur le site officiel de Graphab.	Résolution de l'erreur obtenue, rendant possible les modélisations pour le Triturus cristatus ainsi que la Myotis daubentonii. De plus, cela a permis de déceler un bug dans le logiciel Graphab et de le résoudre, permettant à tous les utilisateurs du logiciels de ne plus rencontrer l'erreur associée.	



POLYTECH[®]
TOURS

35 ALLÉE FERDINAND DE LESSEPS
37200 TOURS

Cédric Debrabant
[Étudiant]
2022-2023

Modélisation d'une trame écologique : la trame turquoise

Abstract :

The entrusted mission was the modelling of the turquoise grid at the scale of the Brévenne and Turdine watersheds, in order to create decision support maps. Modelling was carried out on 4 target species, selected with relevance according to several criterias, specifically the umbrella species criteria. Permeability classes were then created, grouping soil occupations according to their permeability and the species characteristics. For each class and for each specie, friction coefficients were calculated and friction maps were produced with the Biodispersal software. Using these friction layers, modelling of dispersions of target species within the study area could be performed on the Graphab software, and the modelled paths were transformed into graphs. Finally, suitably selected metrics were calculated based on these graphs, allowing the analysis of the connections between habitats in the study area and the analysis of the importance of each habitat. Finally, the metric results were linked to assess the validity of the method, and discussion pointed the parameters to change in order to make better cartographies in the future.

Keywords :

Turquoise frame, modelling, watershed, corridor, specie, habitat, connexion, graph.

Syndicat de rivière Brévenne Turdine
117 Rue Pierre Passemard, 69210 l'Arbresle

Tuteur entreprise :
Betty Cachot
Directrice

Tuteur académique :
Vincent Rotge