

Département de géomatique appliquée
Faculté des lettres et sciences humaines
Université de Sherbrooke

Développement d'un système d'aide à la décision pour la conservation des
milieux humides : cas de métapopulation et d'intégrité écologique du
paysage.

Alexandre Charland

Essai présenté pour l'obtention du grade de Maître en science (M. Sc.),
cheminement géodéveloppement durable

Août 2017

© Alexandre Charland, 2017

Remerciements

J'adresse mes sincères remerciements au Dr. Yves Voirin, mon directeur d'essai, pour ses nombreux conseils tout au long du programme de recherche. Ses nombreuses et promptes réponses furent grandement appréciées. J'aimerais également remercier Prof Goze B. Bénédié de m'avoir offert ce projet ainsi qu'une aide financière pour la réalisation des travaux.

Souffrant de trouble de dysgraphie, de dysorthographe et de dyssyntaxie depuis l'enfance, je tiens également à remercier ma mère pour les centaines d'heures passées à mes côtés durant l'école primaire afin de rattraper mon retard d'apprentissage de la langue française. J'adresse aussi mes sincères remerciements à tous les professeurs du Collège Notre-Dames-des-Servites qui ont fait preuve d'une immense patience et m'ont permis de me surpasser.

Finalement, je tiens à remercier Joy qui m'a offert ses encouragements et son support inconditionnel, durant ces 6 années d'études universitaires, dans tous les excellents moments comme dans les pires.

Table des matières

Table des Figures	iii
Table des Tableaux.....	iv
Liste des abréviations	v
1. Introduction	1
1.1 Mise en contexte.....	1
1.2 Problématique.....	2
1.3 Objectifs.....	3
2. Cadre théorique	4
2.1 La Conservation des milieux humides.....	4
2.1.1 Importance des milieux humides et de leur conservation.....	4
2.1.2 Rôle et politique du Gouvernement fédéral.....	5
2.1.3 Approches de gestion par indicateur de la conservation des milieux humides.....	5
2.2 Outils de planification de conservation existants	12
2.2.1 Principes généraux des outils de planification systématique des outils.....	12
2.2.2 Logiciel « <i>Zonation</i> ».....	13
2.2.3 Logiciel « <i>Marxan/Marzone</i> »	14
2.2.4 La suite « <i>Terrset</i> »	14
2.2.5 Conclusion de l'analyse des outils existants.....	15
2.3 Technologie de l'information et de la géomatique.....	16
2.3.1 Services Web et formats d'échanges normés.....	17
2.3.2 Technologies côté serveur.....	19
2.3.3 Technologies côté client	22
2.4 Exploration et analyse des approches de géotraitements dynamiques orientées SIG Web libre	23
2.4.1 WPS natifs	23
2.4.2 WPS personnalisés.....	25
2.4.3 Utilisation d'un cadre de développement d'applications Web	26
2.4.4 Conclusion de l'analyse des approches de géotraitements dynamiques.....	27
3. Site d'étude et données utilisées.....	29
3.1 Site d'étude	29
3.2 Données utilisées	30
4. Méthodologie	32
4.1 Prototype existant	33
4.2 Technologies utilisées.....	34
4.2.1 Service Web et formats de transmission de données	34
4.2.2 Technologie de programmation	35
4.3 Architecture du système	36
4.4 Mise en œuvre des géotraitements.....	38
4.4.1 Déroulement des géotraitements	38

4.4.2 Méta-population	39
4.4.3 Matrice d'intégrité	41
4.5 Présentation et évaluation des résultats	45
5. Résultats	46
5.1 Présentation de la plateforme interactive et son fonctionnement	46
5.1.1 Aperçu de l'interface utilisateur.....	46
5.1.2 Procédure de lancement des processus d'indicateur	47
5.2 Résultat de la création de la matrice d'intégrité	48
5.3 Exemple de résultats d'indicateurs	50
5.3.1 Indicateur de proximité	50
5.3.2 Indicateur de densité	51
5.3.3 Indicateur d'intégrité relative.....	52
6. Discussion des résultats.....	54
6.1 Évaluation de l'approche de développement.....	54
6.2 Interprétation de l'aide à la décision.....	54
6.2.1 Indicateurs de méta-population	54
6.2.2 Indicateur d'intégrité relative.....	58
6.2.3 Intérêt des indicateurs	61
6.3 Limites du système	62
6.3.1 Lourdeur du calcul de l'indicateur de densité.....	62
6.3.2 Aspect temporel	62
6.3.3 Influence de la vectorisation et des classes des milieux humides.....	62
6.3.4 Conflits de bibliothèques.....	63
7. Conclusion.....	65
8. Recommandations et perspectives	67
8.1 Optimisation des processus	67
8.2 Ajout d'un portrait synthétique des indicateurs.....	67
8.3 Division spatiale par le Cadre écologique de référence du Québec	68
8.4 Exploitation des outils puissants de PySAL	68
8.5 Création automatisée de la matrice d'intégrité et aspect temporel.....	69
8.6 Ajout d'indicateurs de connectivité hydrologique relative.....	69
8.7 Analyse pour une future mise à jour de l'API cartographique	70
8.8 Pérennité incertaine de <i>Geodjango</i>	70
8.9 Environnement Linux	71
9. Bibliographie.....	72

Table des Figures

Figure 1 — Descriptifs mesurables des milieux humides, compilés à partir de la littérature.....	6
Figure 2 — Illustration subjective des arrangements spatiaux des milieux.....	8
Figure 3 — Matrice de perturbation humaine.....	11
Figure 4 — Principe de communication Client/Serveur par protocoles normés.....	17
Figure 5 — Fonctionnement du MVC.....	21
Figure 6 — Zone d'étude.....	29
Figure 7 — Organigramme méthodologique du projet.....	32
Figure 8 — Architecture du système, flux entre les composantes.....	37
Figure 9 — Séquence des opérations principales.....	39
Figure 10 — Opérationnalisation de l'indicateur de proximité.....	40
Figure 11 — Opérationnalisation de l'indicateur de densité.....	41
Figure 12 — Opérationnalisation de la création de la matrice d'intégrité.....	42
Figure 13 — Courbe de valeur de distance, fonction de désintégration.....	44
Figure 14 — Opérationnalisation d'indicateurs de l'intégrité relative.....	44
Figure 15 — Interface utilisateur.....	46
Figure 16 — Message d'invite concernant le filtrage.....	47
Figure 17 — Agrandissement du volet dynamique gauche.....	48
Figure 18 — Résultat du processus de création de la matrice d'intégrité.....	49
Figure 19 — Matrice d'intégrité du paysage à même l'interface,.....	50
Figure 20 — Exemple d'indicateur de proximité.....	51
Figure 21 — Exemple d'indicateur de densité sur la MRC de Drummond.....	52
Figure 22 — Exemple d'indicateur d'intégrité relative,.....	53
Figure 23 — Arrangement spatial favorable, MRC de Drummond.....	56
Figure 24 — Arrangement spatial défavorable, MRC de Coaticook.....	57
Figure 25 — Arrangement spatial moyennement favorable.....	58
Figure 26 — Indicateur d'intégrité relative du Marais-de-la-Rivière-aux-Cerises.....	59
Figure 27 — Comparaison entre observations et indicateur.....	60
Figure 28 — Identification de la nature de la fragmentation par l'intégrité.....	61
Figure 29 — Démonstration de surestimation.....	63
Figure 30 — Portrait synthétique des indicateurs.....	67
Figure 31 — Niveaux de perception du cadre écologique de référence du Québec.....	68
Figure 32 — Détection des structures de connexion hydrologique par analyse morphologique des motifs spatiaux.....	70

Table des Tableaux

Tableau 1 — Récapitulatif des avantages et inconvénients des approches technologiques WPS	.28
Tableau 2 — Données SIG, leurs sources et leurs pourvoyeurs	30
Tableau 3 — Données d'intégrité, leurs caractéristiques et leurs pondérations	31
Tableau 4 — Résumé de l'état des lieux	33
Tableau 5 — Paramétrages de jeux de données de la création de la matrice d'intégrité	43
Tableau 6 — Caractéristiques des trois types arrangements spatiaux	55

Liste des abréviations

Ajax	Asynchronous JavaScript And XML
API	Application Programming Interface
CERQ	Cadre Écologique de Référence du Québec
CGI	Common Gateway Interface
CSS	Cascading Style Sheets
CSV	Comma-separated values
EC	Environnement Canada
GeoJson	Geographic JavaScript Object Notation
GML	Geography Markup Language
HTML	HyperText Markup Language
JS	JavaScript
JSON	JavaScript Object Notation
JTS	Java Topology Suite
KML	Keyhole Markup Language
LAMRAC	L'Association du Marais-de-la-Rivière-aux-Cerises
MERN	Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec
MDDEFP	Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs
MDDELCC	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec
MFFP	Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec
MVC	Model View Controller
OGC	Open Geospatial Consortium
ORM	Mapping objet-relationnel
OS	Operating System
OSGeo	Open Source Geospatial Foundation
PNG	Portable Network Graphics
PySAL	Python Spatial Analysis Library
SGBDR	Système de Gestion de Bases de Données Relationnelle
SLD	Styled Layer Descriptor

SQL	Strutured Query Language
SCF	Service canadien de la faune
SIG	Système d'Information Géographique
UdS	Université de Sherbrooke
US EPA	United States Environmental Protection Agency
WFS	Web Feature Service
WFS-t	Web Feature Service transactional
WMS	Web Mapping Service
WPS	Web Processing Service
XML	Extensible Markup Language

1. Introduction

Les milieux humides jouent un rôle vital dans l'écosystème canadien (Conseil nord-américain de conservation des terres humides Canada, 1999). En plus d'être l'un des systèmes naturels les plus productifs de la planète, les milieux humides se définissent comme des habitats exceptionnels pour une grande diversité d'espèces florales et fauniques (Conseil nord-américain de conservation des terres humides Canada, 1999 ; Quesnelle, 2015).

Dès 1991, l'estimation des pertes de milieux humides sur le territoire canadien dépasse un septième de la surface totale (de ceux-ci), soit plus de 20 millions d'hectares (Gouvernement du Canada, 1991). Chaque perte engendre des conséquences désastreuses se répercutant sur la faune et la flore de ces milieux. La perte des milieux humides affecte une large proportion des espèces listées comme étant en danger ou en voie de disparition (Gibbs, 2000 ; Akçakaya, 2007) ; et ce, à un point tel que les espèces dépendantes des milieux humides essuient le déclin de populations sauvages le plus important du monde (Quesnelle, 2015).

Pour contrer cette détérioration des milieux humides sur le territoire du Canada et protéger la biodiversité dépendante de ces milieux, le Gouvernement fédéral assure la promotion de la conservation des milieux humides en se dotant de stratégies en matière de planification de la conservation. Il offre aux gestionnaires des territoires, des provinces, des municipalités ainsi qu'aux secteurs industriels des guides contenant les lignes directrices pour la mise en œuvre de stratégies de conservation.

L'expansion des développements de nature anthropique engendre une augmentation de la concurrence pour les terres et les ressources (Environnement Canada, 2013). Ainsi, les développements s'étalent et s'amorcent de plus en plus à l'intérieur des régions où la présence de l'homme était jusqu'à lors négligeable. Ceci engendre des changements permanents dans le paysage (Environnement Canada, 2013). L'évaluation des conséquences de ces changements sur les milieux humides et la compréhension des phénomènes spatiaux du paysage deviennent des atouts importants à l'élaboration de lignes directrices en matière de conservation.

1.1 Mise en contexte

Cet essai s'inscrit dans le cadre d'un projet offert à l'Université de Sherbrooke par le Service canadien de la faune (SCF) d'Environnement Canada. L'orientation des travaux de cet essai a pris

place à travers le-dit projet nécessitant la conception et le développement d'un système d'information géographique (SIG) à code ouvert et libre afin de soutenir les situations complexes en matière de données géospatiales dans le contexte de la gestion des milieux humides et de la conservation de la faune et de la flore.

Ce système vise à offrir aux gestionnaires de l'information agrégée à partir de multiples données géospatiales afin de mieux comprendre les risques relatifs aux milieux naturels, puis, d'être en mesure de mettre en place les politiques adéquates en connaissance de cause.

La phase 1 du projet avait pour objectif de créer une plateforme géographique interactive permettant l'accessibilité à une large quantité de données spatiale de multiples sources et formats. Un prototype exploratoire a été conçu et développé en ce sens. Dans cette phase, la conception et de développement du SIG prototype a débuté en 2015 et s'est terminée en mars 2016.

Cet essai poursuit l'évolution d'un SIG prototype (phase 1 du projet) développé à l'Université de Sherbrooke sur financement d'Environnement Canada.

1.2 Problématique

Les milieux humides représentent l'un des éléments naturels les plus importants et les plus complexes du paysage (Pellerin, 2013). Leur conservation nécessite la prise en compte d'une multitude d'aspects interdépendants dont de nombreux processus de changements s'opèrent perpétuellement entre ces aspects (Fryxell, 2014 ; Erwin, 2008). Cette nécessité complexifie la compréhension du territoire et les gestionnaires doivent y faire face (Divay, 2008). Ainsi, il est difficile pour un gestionnaire responsable de la planification de la conservation de prendre des décisions en connaissance de cause sans disposer d'un portrait précis de la situation du territoire concerné.

Dans l'objectif d'obtenir un état de la situation conforme à la réalité, un grand nombre de couches de données touchant de près ou de loin les milieux humides doivent être consultées, voire traitées. Or, le gestionnaire doit intégrer les finalités, enjeux et besoins de multiples parties prenantes n'appartenant pas à une seule et même organisation (Divay, 2008). Les pourvoyeurs de ces données comprennent différents ministères à travers tous les paliers gouvernementaux et divers organismes responsables de la caractérisation, de l'évaluation et de la planification de la conservation des milieux humides au Canada. L'ensemble des données se caractérise par une variabilité qualitative

et quantitative importante. Il se compose aussi de structures diverses et irrégulières, d'échelles spatiales disparates, d'étendues temporelles inconsistantes et de nombreux formats différents. Ainsi, l'hétérogénéité et la dissémination déficiente de ces données complexifient la prise de décision (Guay, 2015).

De plus, les gestionnaires se retrouvent avec une pression constante induite par un large éventail d'informations dépassant les capacités et facultés d'appréhension, de compréhension et d'analyse de l'humain (Eppler, 2011). Ce trop-plein d'informations affecte la capacité d'un décideur à juger et à fixer les priorités (Eppler, 2011).

Il existe des logiciels servant à répondre à cette problématique comme Zonation, Marxan, Marzone, Terrset, etc. Cependant, ces logiciels s'avèrent souvent inadéquats ou trop complexes à utiliser.

Certains des points forts de la géomatique résident dans la faculté de généraliser et de transformer les données vers de l'information spatiale agrégée (Pornon, 2011). Un système cartographique d'aide à la décision permet d'appuyer et peaufiner les stratégies de planification du territoire et de l'environnement (Guay, 2010).

Dans la phase initiale de ce projet, le prototype SIG comportait une interface interactive dont les outils principaux étaient des filtres, comme un filtrage par région et par municipalité ainsi qu'un filtre temporel pour certaines données spécifiques, alors que le potentiel d'intégration de géotraitements n'avait été ni exploré ni évalué.

Cet essai représente la seconde phase dans laquelle la conception et le développement offriront une évolution du SIG prototype vers l'intégration de géotraitements et fait suite aux recommandations d'Environnement Canada.

1.3 Objectifs

L'objectif général de cet essai vise à continuer la conception et le développement d'un SIG prototype afin d'y ajouter une solution de géotraitements interactifs pour répondre aux besoins du SCF. Les traitements doivent apporter des outils d'aide à la décision orientés vers la planification de la conservation des milieux humides par l'analyse multiéchelle du paysage.

Les objectifs spécifiques sont :

- intégrer le principe de géotraitements accessibles en ligne,
- intégrer des données hétérogènes provenant de différentes sources,
- mettre en œuvre le principe d'interopérabilité,
- permettre l'évolution du système en se fondant sur le principe de systèmes à code ouvert,
- mettre en place des outils d'aide à la décision orientés vers la gestion du territoire responsable et la planification de la conservation des milieux humides.

2. Cadre théorique

2.1 La Conservation des milieux humides

2.1.1 Importance des milieux humides et de leur conservation

Au Canada, les terres humides jouent un rôle essentiel et critique dans le maintien de la qualité de l'environnement, des populations d'oiseaux migrateurs, des pêches et des ressources transfrontalières internationales comme l'eau et la faune (Conseil nord-américain de conservation des terres humides, 1999).

En plus d'être une niche exceptionnelle, un habitat fort en diversité d'espèces fauniques et florales, les estimations de la valeur écosystémique des milieux humides sont 75 % supérieures aux lacs et rivières, 15 fois plus que les forêts et 64 plus que les prairies et les pâturages (Mitsch, 2000).

Malgré cette constatation, les milieux humides font partie des écosystèmes les plus menacés du Canada (Conseil nord-américain de conservation des terres humides, 1999). L'humain utilise les milieux humides pour diverses activités, si bien que les pertes de plus de 20 millions d'hectares de milieux humides sont engendrées en très grande partie par l'activité anthropique, principalement par le changement d'utilisation du territoire. Le développement urbain, l'agriculture, l'industrialisation et l'expansion du réseau routier constituent les principaux changements du paysage perturbant les milieux humides (Gibbs, 2000 ; Falcone, 2010 ; Quesnelle, 2015). De plus, le changement climatique joue un rôle non négligeable dans la disparition des milieux humides (Erwin, 2008 ; Deane, 2017).

Les caractéristiques uniques et irremplaçables des milieux humides ne peuvent être protégées que par l'élaboration et l'instauration de plans de conservation des milieux humides régies par des

politiques de conservation de tous les paliers gouvernementaux (Conseil nord-américain de conservation des terres humides, 1999 ; Environnement Canada, 2013).

2.1.2 Rôle et politique du Gouvernement fédéral

Le Gouvernement fédéral élabore et décrit les cadres stratégiques et législatifs relatifs à la protection et la conservation des milieux humides. L'objectif principal est de fournir les bases et les références pour l'élaboration et l'échange d'idées à propos des objectifs et des stratégies destinées à conserver les milieux humides (Conseil nord-américain de conservation des terres humides, 1999). Ainsi, les gestionnaires des terres, les gouvernements provinciaux et les secteurs industriels sont invités à élaborer des politiques ou à poursuivre et à améliorer leurs politiques en cours.

Les terres et les eaux fédérales ainsi que les Territoires du Nord abritent environ 29 % de tous les milieux humides du Canada (Lynch-Steward, 1996). Le Gouvernement fédéral a donc sous sa juridiction près du tiers des milieux humides canadiens. C'est pourquoi il doit se responsabiliser par la gestion des impacts par l'intermédiaire de plus de 900 de ses politiques et programmes dont certaines touchent de près ou de loin les milieux humides (gouvernement du Canada, 1991 ; Conseil nord-américain de conservation des terres humides, 1999).

En général, au Canada et aux États-Unis, la gestion de la conservation de ces espèces se focalise davantage sur le nombre de milieux humides par région d'activité (Quesnelle, 2015). Les deux pays poursuivent des objectifs clairs de perte nette nulle des fonctions des milieux humides sur leurs territoires (Hanson, 2008 ; Mitsch, 2000).

2.1.3 Approches de gestion par indicateur de la conservation des milieux humides

La mise en place d'un objectif sans perte nette pour la conservation des milieux humides ne fonctionne pas toujours, car cette approche ne prend pas en compte les seuils écologiques critiques minimaux (Mitsch, 2000). De plus, les études ne s'entendent pas sur la proportion nécessaire de la surface des milieux humides pour une région donnée. Selon Mitsch (2000), les seuils d'acceptabilité de la proportion de milieux humides dans le paysage varient de 1 à 5 % pour la première étude, de 9 à 11 % pour la seconde ou de 3 à 7 % pour une autre. Cette variabilité des seuils d'acceptabilité entre les études n'est pas négligeable et démontre la difficulté de mettre en place une politique de normes sur l'ensemble du territoire canadien. Il faut donc adopter d'autres approches.

Il existe plus de 100 approches pour évaluer les fonctions écologiques des milieux humides (Hanson, 2008). Les descriptifs mesurables existants relatifs aux milieux humides sont d'autant plus nombreux. De plus, ils peuvent être combinés et utilisés pour créer des indicateurs aidant à évaluer les caractéristiques des milieux humides. À partir d'une revue de littérature non exhaustive, la Figure 1 illustre un ensemble de métriques relatif aux milieux humides.

Environnement Canada et ses collaborateurs déploient leurs efforts afin de créer des lignes directrices en matière de conservation. En évolution constante depuis bientôt 20 ans, le document « *Quand l'habitat est-il suffisant?* » rassemble les lignes directrices pour conserver et restaurer l'habitat des oiseaux migrateurs, des espèces en péril et d'autres espèces sauvages dans les paysages (Environnement Canada, 2013). Ce document aborde des approches adaptatives pouvant s'appliquer à tous les types de paysage canadien afin de promouvoir une meilleure conservation des écosystèmes. Ces lignes directrices ne représentent pas des lois ou des législations auxquelles on doit se soumettre. Au contraire, elles visent d'abord à guider et offrir des approches scientifiques. Ensuite, Environnement Canada invite à adapter ces lignes directrices pour parfaire les démarches de conservation en cours.

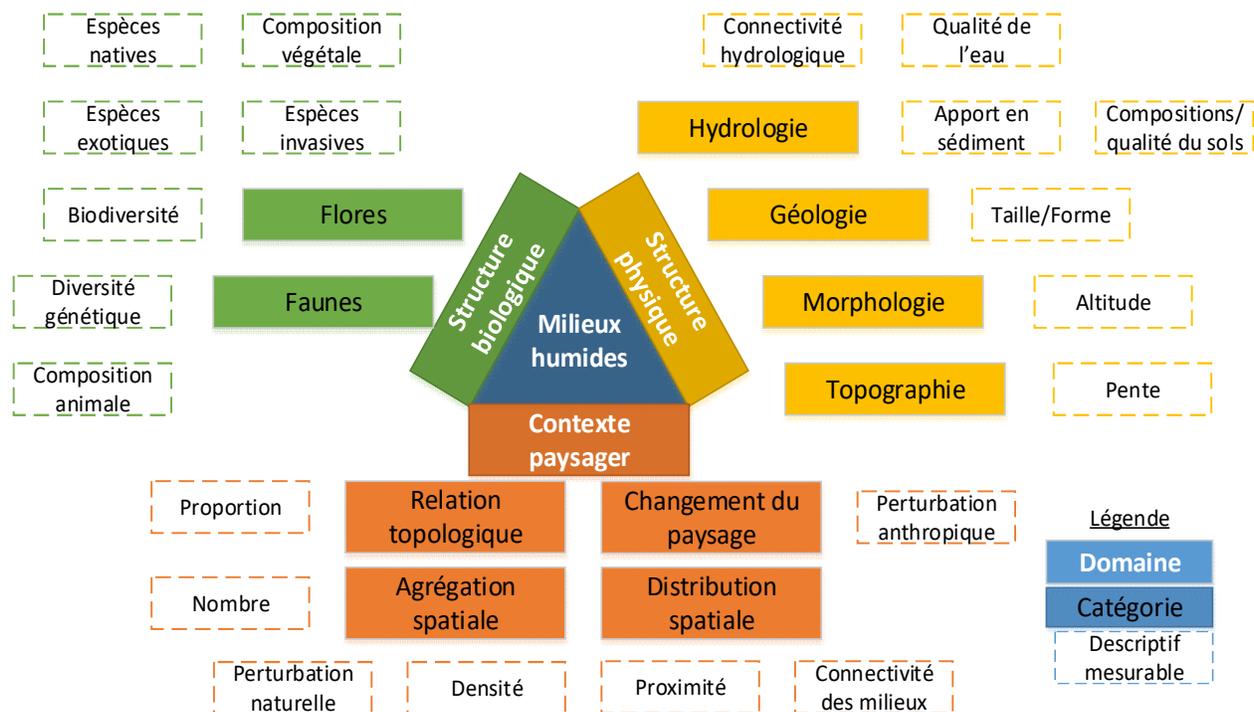


Figure 1 — Descriptifs mesurables des milieux humides, compilés à partir de la littérature.

Les lignes directrices décrites dans le document d'Environnement Canada (2013) mettent d'abord en évidence la nécessité de l'évaluation de la persistance des populations, ensuite la taille de l'habitat et finalement l'intégrité écologique. Ces approches visent à conserver les espèces communes et s'orientent vers la protection et la conservation des espèces, particulièrement celles en péril, en maintenant une structure d'écosystèmes fonctionnelle dont dépendent ces espèces (Environnement Canada, 2013).

Dans le cadre de cet essai, des approches systématiques inclusives et généralistes comme la métapopulation et l'intégrité écologique sont évaluées.

2.1.3.1 Approche par métapopulation spatiale

La métapopulation se décrit comme un ensemble de populations spatialement ou temporellement séparées, reliées par le déplacement des individus dans cet ensemble (Schooley, 2016). Toute la métapopulation peut persister dans le paysage, malgré les extinctions des populations locales, si les populations sont suffisamment connectées pour permettre une recolonisation adéquate d'un habitat convenable (Akçakaya, 2007 ; Schooley, 2016).

Dans le contexte des milieux humides, cette approche par métapopulation utilise les fondements de la théorie de la connectivité et de la supplémentation qui a été identifiée comme un déterminant de la résilience du milieu dans le paysage (Burel, 1999 ; Salt, 2006 ; Cumming, 2011 ; Uden, 2014). La résilience a été définie par Holling (1973) comme étant l'habileté d'un système à absorber des perturbations sans fondamentalement altérer sa structure et ses fonctions. Les seuils de résilience sont liés aux caractéristiques et arrangements spatiaux des milieux humides (Uden, 2014). Lorsque ceux-ci ne sont plus satisfaits, les ensembles de milieux humides ne peuvent plus subvenir aux conditions nécessaires pour la subsistance des espèces. Dans ces conditions, le risque d'extinction locale d'espèces s'en retrouve largement augmenté (Shodi, 2009). Les milieux humides isolés dans le paysage forment une population locale à risque d'extinction. Deane (2017) démontre que l'extinction des espèces terrestres est supérieure lors de la disparition d'un seul milieu humide isolé comparativement à une perte de la même dimension sur l'ensemble des milieux humides. La Figure 2 offre une illustration subjective des arrangements spatiaux des milieux favorisant ou non la résilience et la persistance de la métapopulation dans le paysage.

La proximité et la densité des milieux humides représentent les deux traits caractéristiques du paysage les plus importants pour subvenir à la métapopulation des organismes nichant dans ce

milieu (Gibbs, 2000 ; Deane, 2017). Les études de Gibbs (2000), Cosentino, (2010), Steinke (2013), Uden (2014), Hamer (2016) et Schooley (2016) ont utilisé au moins un de ces deux indicateurs pour évaluer les milieux humides. Le guide d'élaboration d'un plan de conservation, des milieux humides du Québec (Joly, 2008) et le guide d'évaluation du patrimoine naturel du ministère des Richesses naturelles de l'Ontario (Ontario Ministry of Natural Resources, 2012) mentionnent et décrivent l'importance de ces deux critères. Les lignes directrices d'Environnement Canada incluent le paramètre de la proximité dans le paysage et y accordent une haute priorité en matière de planification de la conservation du paysage aux milieux humides (Environnement Canada, 2013).

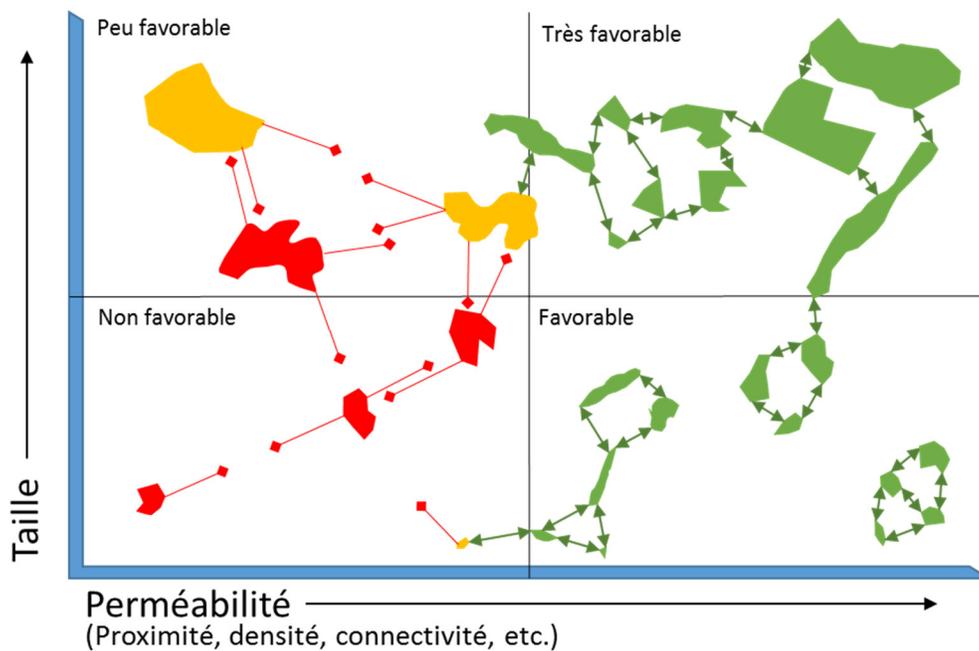


Figure 2 — Illustration subjective des arrangements spatiaux des milieux favorisant ou non la résilience et la persistance de la métapopulation dans le paysage. Les couleurs vertes (faible), jaunes (moyen) et rouges (élevé) indiquent le risque relatif d'extinction.

Avec l'augmentation du stress induite par l'activité anthropique, la métapopulation des organismes des milieux humides persistera seulement avec une mosaïque paysagère fonctionnelle de ces milieux (Gibbs, 2000 ; Environnement Canada, 2013). De plus, un paysage supportant une connectivité des milieux humides offrira une meilleure persistance des espèces présentes contre les variations climatiques ainsi qu'une diversité génétique supérieure (Uden, 2014).

Cette approche s'adresse à toutes les espèces habitant ou nichant dans les milieux humides (Schooley, 2016) comme les amphibiens (Quesnelle, 2015), les oiseaux (Steinke, 2013), les reptiles (Cosentino, 2010), les insectes (Akçakaya, 2007), les petits mammifères (Schooley, 2016) ainsi que la flore (Deanes, 2017). Elle inclut même des animaux de plus grande taille, car la réduction de la densité et de l'isolation des milieux humides joue un rôle important dans l'implication énergétique des animaux de ce type (Gibbs, 2000).

De plus, un milieu humide appartenant à une agrégation spatiale favorise la résilience et la persistance de ses voisins les plus proches (Gibbs, 2000 ; Mitsch, 2000). Ainsi, en plus d'apporter un support à la persistance de la biodiversité, les milieux humides se supportent mutuellement dans leurs propres persistances dans le paysage lorsqu'ils sont spatialement regroupés.

Finalement, la connectivité interprétée par la densité et la proximité fait référence aux relations fonctionnelles entre l'habitat que sont les milieux humides dans le paysage, et le mouvement des organismes entre eux (Uden, 2014). Les espèces occupant un milieu humide ayant un haut degré de connectivité peuvent émigrer vers plusieurs autres milieux humides voisins lorsque leur milieu n'est plus viable pour leur maintien. Ainsi, même si une disparition survient dans l'un de ces milieux, les espèces pourront coloniser l'un des milieux voisins afin d'éviter une extinction locale. Donc, la distance et la densité peuvent être utilisées afin de mesurer la résilience relative des espèces des milieux humides ainsi que la résilience mutuelle des milieux mêmes. La métapopulation relative aux milieux humides est essentielle dans la gestion de la conservation de nombreuses espèces (Akçakaya, 2007 ; Schooley, 2016 ; Deane, 2017).

2.1.3.2 Approche par l'intégrité écologique multiéchelle

Dans l'espoir de protéger les espèces qui dépendent des milieux humides, la gestion de leur conservation se concentre généralement sur la préservation et l'augmentation du nombre de ces milieux. Il s'avère que pour la plupart des espèces, la qualité du paysage environnant le milieu représente une plus grande importance que l'abondance totale de la disponibilité de ce milieu dans un territoire donné (Quesnelle, 2015).

Incluant plusieurs centaines d'ouvrages scientifiques, la méta-analyse exhaustive de Quesnelle (2015) conclut que les politiques de conservation sur la biodiversité des milieux humides qui focalisent uniquement sur le nombre total de milieux humides par région sont inefficaces à la conservation d'un grand nombre d'espèces. D'ailleurs, cette étude conclut que les analyses basées

sur le nombre de milieux humides ou la proportion de ces milieux, peu importe l'échelle, surestiment la capacité du paysage à supporter l'ensemble des espèces dépendantes des milieux humides.

Pour y pallier, plusieurs études tentent de quantifier les agents perturbateurs et les stress occasionnés par l'activité humaine en agrégeant plusieurs paramètres en une seule variable. La principale méthode adoptée est la création d'un indicateur de perturbation ou d'intégrité à l'aide d'un SIG (Falcone, 2010). Avec cette approche, il y a une préférence générale pour les indicateurs reflétant les caractéristiques des écosystèmes et leurs sensibilités aux perturbations. Or, il s'avère qu'il est souvent plus aisé de mesurer l'indicateur de stress (Comer, 2013). Les ouvrages de Faber-Langendoen (2012a), Faber-Langendoen (2012b) et Comer (2013) utilisent une matrice d'intégrité écologique comme indicateur de stress inversé.

Un indicateur d'intégrité pour un milieu donné se compose d'un ensemble d'éléments perturbateurs ou régulateurs environnants (Comer, 2013 ; Quesnelle, 2015). Par exemple, les bénéfices de la proximité de la forêt sur les milieux humides, comme la rétention des sédiments et de la pollution, la modération des changements de température, la réduction de l'évaporation, l'apport en matière organique, l'influence du réseau hydrologique et du drainage tendent à augmenter l'intégrité relative du milieu humide (Quesnelle, 2015). À l'inverse, la proximité de l'urbanisation et de l'agriculture représente des perturbateurs majeurs à l'intégrité des milieux humides (Gibbs, 2000) (Mitsch, 2000), tout comme l'expansion du réseau routier qui influence négativement l'abondance et la distribution des espèces dépendant de milieux humides (Quesnelle, 2015).

Les guides d'élaboration d'un plan de conservation des milieux humides du Québec (Joly, 2008) et le guide d'évaluation du patrimoine naturel du ministère des Richesses naturelles de l'Ontario (Ontario Ministry of Natural Resources, 2012) mentionnent et expliquent l'importance d'un critère mesurant l'intégrité écologique par l'occupation et les perturbations des terres adjacentes des milieux humides. Le guide d'Environnement Canada confirme l'importance de reconnaître les agents stressants à l'extérieur du milieu humide, car ils ont une incidence sur les populations fauniques (Environnement Canada, 2013).

Suite au rapport «How Much Disturbance is too Much?» de Beacon Environmental (2012), Environnement Canada, dans l'objectif d'une meilleure adaptation aux différences des paysages canadiens, évoque la solution d'une matrice de perturbations des habitats multiéchelles pour les

régions éloignées du Bouclier canadien et les territoires du Nord (Environnement Canada, 2013). Ainsi, Environnement Canada explore déjà l'approche d'une matrice de perturbation humaine, l'inverse d'une matrice d'intégrité, à partir des catégories d'infrastructure de transport, d'établissement humain, de changement d'affectation du paysage et de l'infrastructure électrique, voir Figure 3 (Bryan, 2014).

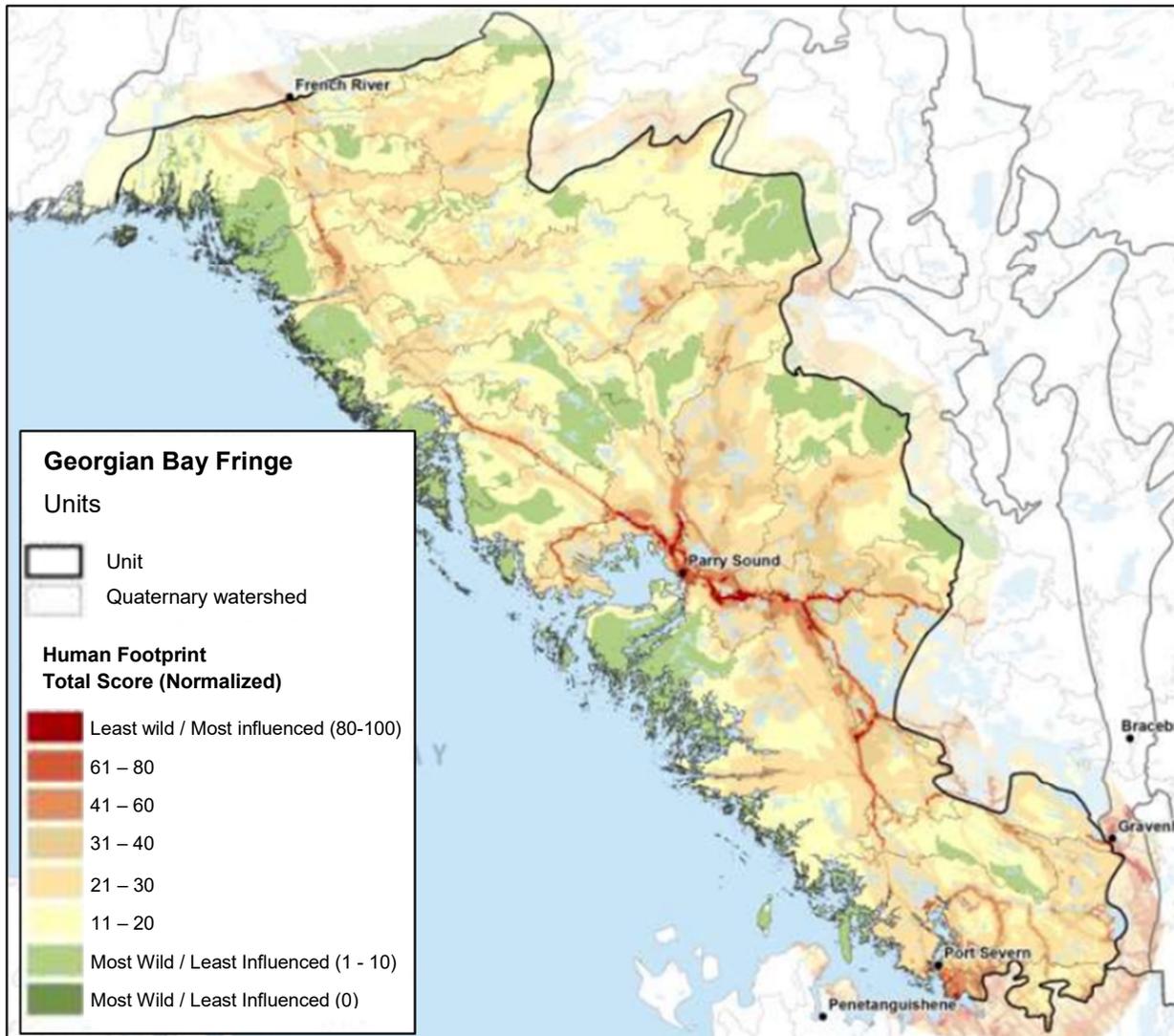


Figure 3 — Matrice de perturbation humaine, tirée de Bryan (2014), modifié pour le cadrage et la reconstruction de la légende seulement.

Il s'avère que l'intégrité écologique peut s'évaluer selon trois intensités et échelles : l'évaluation large à l'échelle des paysages (niveau 1), l'évaluation rapide régionale (niveau 2), l'étude biologique et physico-chimique intensive, précise et localisée (niveau 3) (Hanson, 2008 ; Faber-Langendoen, 2012 a ; Comer, 2013). Ces trois niveaux d'évaluation utilisent des moyens de

collecte des données, des indicateurs, des seuils et des méthodes d'analyse différentes (Hanson, 2008 ; Faber-Langendoen, 2012a). Il existe déjà des approches intégrant ses trois niveaux pour la surveillance et l'évaluation des milieux humides. L'une de ces approches a déjà été acceptée et utilisée par « *United States Environmental Protection Agency (US EPA)* » et « *Wisconsin Department of Natural Resources* » (Hanson, 2008 ; Comer, 2013). L'approche de la matrice d'intégrité écologique décrite dans Comer (2013), expliquée dans Faber-Langendoen (2012a) et Faber-Langendoen (2012b), offre l'avantage d'une adaptabilité multiéchelle.

Finalement, les stratégies de conservation se focalisant strictement sur la préservation et l'augmentation de l'effectif dans une région donnée démontrent une inefficacité en matière de protection des espèces (Quesnelle, 2015). En effet, la variation des caractéristiques du paysage a une plus grande importance que la proportion de milieux humides pour une région donnée. Un indice calculé à l'aide d'une matrice l'intégrité écologique est un facteur plus déterminant que le nombre de milieux humides dans une région donnée, peu importe l'échelle de l'analyse (Quesnelle, 2015).

2.2 Outils de planification de conservation existants

2.2.1 Principes généraux des outils de planification systématique des outils

La planification systématique de la conservation de la faune est une approche largement utilisée en conservation de la biodiversité (Delavenne, 2011). Selon Moilanen (2009a), la planification systématique de la conservation implique six étapes :

1. la production d'une liste d'espèces et de types d'habitats importants, connus collectivement comme caractéristiques de conservation ;
2. la fixation des cibles pour chacune de ces caractéristiques de conservation ;
3. la division de la région de planification en une série d'unités de planification ;
4. le calcul du montant de chaque caractéristique trouvée dans chaque unité de planification ;
5. l'attribution d'une valeur de coût à chaque unité de planification ;
6. l'utilisation des logiciels pour identifier les domaines prioritaires pour la conservation de la biodiversité, réduire les niveaux de fragmentation et minimiser les coûts unitaires de planification.

La plupart des évaluations de la planification pour identifier les priorités de conservation sont effectuées par des logiciels tels que *Zonation* et *Marxan* (Delavenne, 2011) ou encore par *Terrset*

(Ronald, 2016). Ce sont les outils d'aide à la décision de la planification de la conservation les plus répandues (Delavenne, 2011). Ces outils utilisent les mêmes principes, mais ils abordent différentes approches pour mesurer la valeur de conservation (Delavenne, 2011).

2.2.2 Logiciel *Zonation*

Le logiciel *Zonation* se veut un outil à approches multiples pour la planification en conservation fournissant un résultat aidant à établir les priorités (Boucher, 2013). Ce logiciel produit un ensemble de courbes de performance décrivant combien chaque classe d'entités d'espèce est enregistrée dans la solution de conservation (Moilanen, 2011). Pour y parvenir, plusieurs paramètres dont la valeur de conservation des milieux, les restrictions budgétaires ou des seuils de pourcentage d'espèce ou d'habitat spécifique doivent être fournis au logiciel (Boucher, 2013).

Ce logiciel est en mesure de comparer différentes utilisations du territoire par différentes unités administratives (Boucher, 2013). Il s'adapte bien aux différents scénarios du territoire. Il peut donc gérer les paysages fortement fragmentés et ceux faiblement perturbés (Moilanen, 2005).

En contrepartie, le logiciel requiert un modèle de données d'entrée dont la structure est fixe (Lehtomäki, 2016) et il ne fonctionne qu'avec des données matricielles (Wintle, 2008). Il existe une limite de traitement total de 700 millions de cellules matricielles (Moilanen, 2010). La documentation suggère fortement d'utiliser des processus de prétraitements pour gérer plusieurs aspects de la structure (Lehtomäki, 2016).

Il y a quelques mois, des doutes subsistaient concernant la pérennité du logiciel *Zonation*. Toutes les sources officielles d'information n'étaient plus disponibles depuis près d'un an. Le Centre de recherche sur la métapopulation de l'Université de Helsinki n'offrait plus d'aide en ligne sur le logiciel. Depuis le 28 février 2017, une nouvelle page Web est apparue laissant supposer la continuité du projet et le téléchargement de la version 4 de l'application est dorénavant disponible (University of Helsinki 2017).

Les résultats de ce logiciel ont tendance à représenter des niveaux de connectivité plus élevés (Delavenne, 2011). Cette connectivité dans les résultats dépend grandement du respect des procédures de prétraitement (Moilanen, 2010).

2.2.3 Logiciel « *Marxan/Marzone* »

Développé vers la fin des années 90 pour la conservation de la biodiversité marine, le logiciel *Marxan* est l'outil de planification de conservation le plus mature utilisé dans le monde (Watts, 2009 ; Wintle, 2008).

La limite de *Marxan* se trouve dans l'incapacité d'offrir des résultats à partir de multiples zonages ou aménagements du territoire (Wintle, 2008). Pour outrepasser cette limite, une extension du logiciel « *Marxan with Zones* » a été développée. Elle permet de faire évoluer l'outil d'aide à la décision pour la conservation de la biodiversité terrestre et d'y ajouter des options de zone de conservation (Watts, 2009). En contrepartie, l'augmentation du temps d'exécution de l'outil a été évaluée à environ 600 % (Watts, 2008). Pour offrir un résultat optimal, « *Marxan/Marzone* » s'exécute en boucle de nombreuses fois. Dans les tests de l'étude Delavenne (2011), l'outil boucle son algorithme plus de 100 fois.

L'incapacité à délimiter les réserves ou les zones de conservation représente la principale lacune de ce logiciel (Wintle, 2008 ; Delavenne, 2011). Ainsi, les gestionnaires de la conservation doivent jongler avec un plan paysager qui atteint les buts de biodiversité à un coût minimum sans avoir de délimitation d'une zone précise.

Ce logiciel n'est pas intuitif pour les non-initiées. Le nombre de paramètres requis n'est pas négligeable. Ainsi, le niveau technique nécessaire est élevé (Wintle, 2008).

Comparativement au logiciel *Zonation*, les résultats de *Marxan* ont tendance à représenter des zones prioritaires plus efficaces (Delavenne, 2011).

2.2.4 La suite *Terrset*

La suite d'applications *Terrset* offre de nombreux outils, dont des modélisations de services écosystémiques et des modélisations des habitats et de la biodiversité.

La modélisation de services écosystémiques appliquée aux milieux humides pourrait être effectuée par les outils de purification de l'eau, de rétention des sédiments, de qualité et rareté de l'habitat, d'évaluation des risques de l'habitat et d'utilisation superposée (Ronald, 2016). Par contre, chaque outil nécessite, en contrepartie, de nombreux paramètres particuliers. Ces paramètres sont liés et dépendent du territoire de la zone d'étude (Ronald, 2016) ; d'autant plus que certaines données nécessaires sont de domaine spécialisé. Dans les études à un niveau local, ce sont principalement

des données biophysiques et des observations sur le terrain qui sont recueillies. Ces moyens ne peuvent pas être exigés lors d'une étude à plus grande échelle géographique.

Un outil fourni par *Terrset* pour la planification des réserves permet de préparer les données et la planification des réserves se fait par un module *Marxan* déjà intégré à *Terrset* (Ronald, 2016). Les prétraitements nécessaires des données d'entrée de *Marxan* sont exécutés par *Terrset*. Ainsi, cette solution gère toutes les étapes d'un projet, à partir de la donnée brute jusqu'aux résultats, et ce, sans impliquer d'autres logiciels.

2.2.5 Conclusion de l'analyse des outils existants

2.2.5.1 Intérêts des outils

Les logiciels *Zonation* et « *Marxan/Marzone* » permettent principalement d'identifier les zones atteignant les cibles de conservation de manière optimale. Ainsi, ils ne peuvent pas aider à identifier la pondération, les objectifs, les bénéfices, les menaces ainsi que l'identification et la priorisation des interventions possibles (Wintle, 2008). Bien qu'ils offrent sensiblement les mêmes résultats (Delavenne, 2011), selon la pérennité du logiciel, le soutien offert aux usagers de la part de l'organisme responsable du maintien de celui-ci et de l'étendue de la communauté, « *Marxan/Marzone* » se démarque grandement, malgré sa complexité (Wintle, 2008).

Dans le cas de *Terrset*, l'intérêt de la première application se présente uniquement lors de son utilisation sur une petite zone d'étude et dont on possède une bonne abondance de donnée thématique de qualité. Malheureusement, il nécessite beaucoup de connaissances spécialisées et un trop grand nombre de paramètres, rendant impossible son utilisation sur une zone d'étude élargie.

Alors que la deuxième application est finalement une solution clé en main à partir de la donnée brute jusqu'aux résultats, utilisant l'outil de conservation *Marxan*. Malheureusement, n'utilisant pas *Marzone*, il intègre donc les limites *Marxan*.

2.2.5.2 Expérience, connaissances et compétences nécessaires

L'utilisation de ces outils nécessite une compréhension conceptuelle des options d'analyse, une bonne expérience ainsi qu'une bonne connaissance sur les procédures de traitements entre les étapes de l'analyse (Lehtomäki, 2013 ; Delavenne, 2011). De plus, les résultats doivent être interprétés par des praticiens de la conservation ayant les compétences dans le domaine (Delavenne, 2011). Les résultats de ces outils doivent rester un élément d'influence lors de

discussion avec les experts et les parties prenantes de la planification de la conservation. Elles ne doivent donc pas remplacer la décision (Lehtomäki, 2013).

2.2.5.3 Envergure d'un projet

Dans l'ensemble, le temps nécessaire à l'élaboration d'un projet de conservation à l'aide de ces outils varie entre quelques semaines et plusieurs années (Lehtomäki, 2016). Ces types d'analyse sont difficiles à exécuter, car ils se complexifient par l'incertitude des données, leur disponibilité, leur qualité, la grandeur de l'étendue de la zone d'étude sur laquelle on désire mettre des priorités, les problématiques écologiques sous-jacentes, la connectivité des milieux, le dynamisme du paysage, les variations des coûts des terres et finalement les changements d'utilisation des sols (Moilanen, 2011 ; Lehtomäki, 2013). De plus, plusieurs minutes à des heures, voire des jours, de traitement doivent être envisagées pour l'exécution de ces outils (Lehtomäki, 2016 ; Ball, 2000 ; Watts, 2008). Ainsi, les ressources investies dans ce genre de projet peuvent être considérables.

2.2.5.4 Données et interopérabilité

L'utilisation transparente de données transmises selon les normes de l'Open Geospatial Consortium (OGC) s'avère très difficile, voire impossible, car grand nombre de facteurs empêchent la mise en œuvre à même ces outils. On compte parmi ces facteurs :

- le nombre de paramètres ;
- la diversité des attributs spécifiques ;
- la rigidité structurelle ;
- la grande quantité de données nécessaires pour un modèle écologique idéal ;
- la grande variété de géotraitements spécifiques à chaque étape de l'analyse (Lehtomäki, 2013) ;
- le rôle prépondérant de la disponibilité et la qualité des données (Lehtomäki, 2013) ;
- la longueur des temps de traitement.

Ainsi, une simple modification des données de la part du fournisseur pourrait engendrer une incapacité de gestion de la part du système.

2.3 Technologie de l'information et de la géomatique

L'un des objectifs de ce projet est de pouvoir mettre en place des outils similaires à ceux présentés précédemment. Dans ce cas, si l'on souhaite reproduire les fonctionnalités de ces outils, il faut

mettre en place des technologies liées à la géomatique orientées vers le Web. Comme l'illustre la Figure 4, les technologies de cartographie Web s'organisent en trois grandes catégories distinctives : (1) les technologies du côté serveur servant à emmagasiner, à interroger des informations géographiques à partir d'une source centralisée ou encore sources distribuées comme l'infonuagique, (2) les technologies du côté client effectuant le rendu cartographique et offrant les fonctionnalités de manipulation de cartes Web interactives dans un navigateur, et (3) les services Web et les formats d'échanges normés utilisés pour relayer les requêtes d'information entre le client et le serveur (Roth, 2008 ; Roth 2014).

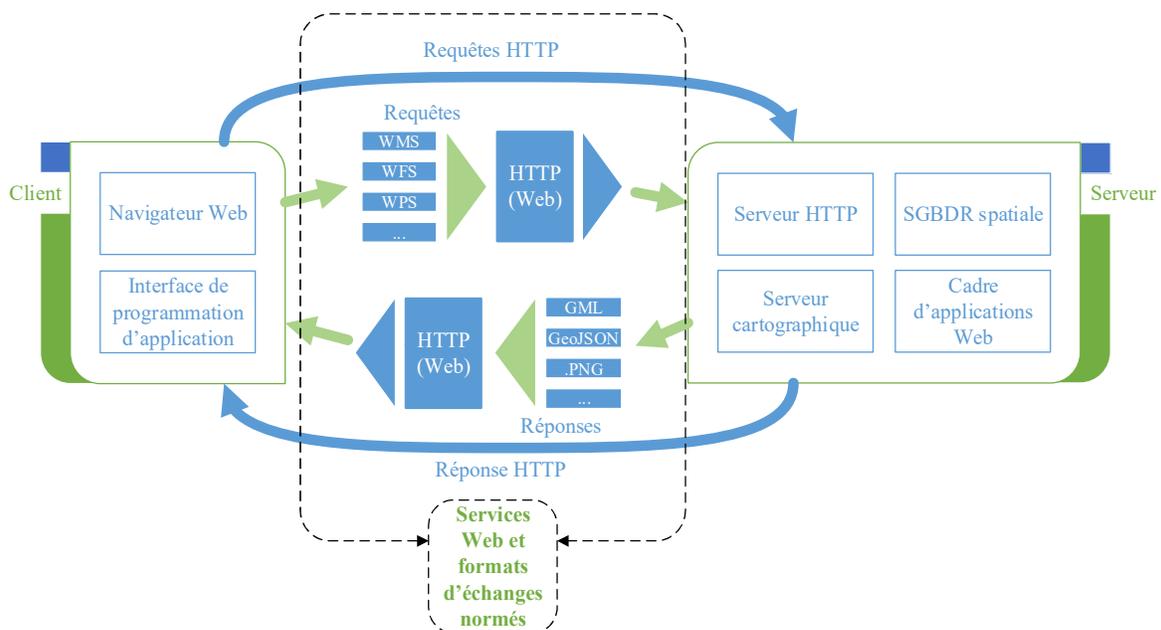


Figure 4 — Principe de communication Client/Serveur par protocoles normés

2.3.1 Services Web et formats d'échanges normés

Les spécifications de partage de données sur Internet, publiées par l'OGC, jouent le rôle de protocole de communication normalisé lors d'échanges de données spatiales (Swain, 2015). Par des standards génériques, ils permettent l'uniformisation des moyens de communication Client/Serveur et entre les différentes composantes d'un même système géographique ou entre plusieurs systèmes distants. Ainsi, le client et le serveur peuvent être physiquement séparés dans un organisme différent tout en partageant de données cartographiées, sans même connaître l'infrastructure du système de son homologue. Le gain généré en interopérabilité s'en retrouve décuplé. Si bien qu'aujourd'hui, la compatibilité au service Web de l'OGC est un critère de sélection technologique.

Tous les services Web de l'OGC communiquent par HTTP-GET et HTTP-POST (Schaeffer, 2012) (OGC, 2006).

2.3.1.1 « *Web Mapping Service (WMS)* »

Le standard WMS offre la possibilité de demander, à partir d'une interface HTTP, des imagerie cartographiques géoréférencées à partir d'une ou plusieurs bases de données géospatiales distribuées (OGC, 2006). Le client demande au serveur cartographique une série d'images WMS, dont le serveur cartographique a préalablement tuilée, pour recomposer l'image à l'aide de l'interface de programmation d'application. Ainsi, le client retourne une carte visuelle interactive. Le WMS s'identifie comme le standard le plus connu, le plus simple et le plus rapide et, de loin, le plus utilisé (Steiniger, 2013).

La Figure 4 explique le déroulement d'une communication WMS entre le client et le serveur. Le côté client, une application Web fonctionnant sur un navigateur, demande une requête WMS sur Internet par protocole HTTP. La demande est recueillie par les composantes du côté serveur ; la réponse sous un format d'image est envoyée au client par protocole HTTP.

2.3.1.2 « *Web Feature Service (WFS)* »

Le standard WFS, comparable à WMS, permet la demande de couche de données dont le retour se compose d'entités de format vectoriel associées de leurs attributs (Swain, 2015). La possibilité de filtrer le contenu en fonction de leurs attributs et de leurs caractéristiques topologiques est l'une des capacités distinctives du WFS (Steiniger, 2013). La norme WFS se qualifie comme le second en popularité.

Le déroulement d'une communication WFS est très similaire à celui du WMS à l'exception faite du retour de la réponse selon le format vectoriel. Le format de sortie le plus utilisé est le « *Geography Markup Language (GML)* ». De plus, lorsque transactionnel, le « *Web Feature Service Transactional (WFS-T)* » permet la création, la modification et la suppression des entités vectorielles et de leurs attributs (Swain, 2015). Dans le cas d'un WFS-T, la réponse n'est pas nécessairement des entités vectorielles, mais plutôt une confirmation que l'action a été effectuée.

2.3.1.3 « *Web Processing Service (WPS)* »

Moins utilisé, le standard WPS est une méthode standardisée permettant de publier et d'effectuer des géotraitement basés sur le Web à partir d'une interface HTTP. Le traitement s'exécute sur le

serveur cartographique (Schaeffer, 2012). Selon la Figure 4, le côté client, une application Web fonctionnant sur un navigateur, demande une requête WPS sur Internet par protocole HTTP. La demande est recueillie par les composantes du côté serveur ; les traitements sont exécutés ; un résultat est préparé selon le format spécifié et envoyé au client par protocole HTTP.

Du côté serveur, le traitement WPS est plus lourd qu'une requête WMS ou WFS.

2.3.2 Technologies côté serveur

Depuis plus d'une décennie, le nombre de projets d'application ouverte et libre appliquée à la collecte, l'entreposage, l'analyse et la visualisation de données géoréférencées, ne cesse de croître (Steiniger, 2013). L'abondance de choix technologiques peut facilement devenir accablante pour les nouveaux développeurs (Swain, 2015). Il devient primordial d'exécuter une revue de littérature relative au besoin technologique du projet.

L'architecture d'un SIG Web ouvert se divise en quatre composantes principales ; le serveur cartographique, le serveur Web HTTP, les cadres d'application Web et le système de gestion de base de données relationnelle (SGBDR) (Swain, 2015).

2.3.2.1 Serveur cartographique

Il existe de nombreux serveurs cartographiques parmi lesquels *Geoserver* et *Mapserver* figurent parmi les plus matures, les plus connues et les plus utilisés (Steiniger, 2013).

Mapserver est une application « *Common Gateway Interface (CGI)* », intégrée dans un environnement d'un serveur Web Apache, pouvant s'installer sur n'importe quel système d'exploitation (Swain, 2015 ; Steiniger, 2013). Son implantation en langage C rend *Mapserver* exceptionnellement efficace et performant comparativement à l'implémentation Java de son principal compétiteur, *Geoserver* (OSGeo, 2014). De plus, *Mapserver* se distingue sur le plan stabilité, d'une évolutivité supérieure (Ballatore, 2011).

Geoserver, une application Java, fonctionne dans un environnement *Jetty* ou « *Apache Tomcat* » (Steiniger, 2013) et s'installe sur tous les systèmes d'exploitation (Swain, 2015). Il offre une interface graphique simple d'utilisation (Swain, 2015). Lors de la configuration, cette solution demande moins de manipulations en offrant le maximum, et elle suit de plus près les normes de l'OGC (Ballatore, 2011). *Geoserver* dépend grandement de la librairie *Geotools*, une librairie ouverte en langage Java (Ballatore, 2011). Sa simplicité, son service de tuilage intégré, sa mise en

cache spatiale automatique font la distinction de *Geoserver* (Ballatore, 2011 ; Swain, 2015 ; Steiniger, 2013).

2.3.2.2 Système de gestion de base de données relationnelle géospatiale

Un système de gestion de base de données relationnelle (SGBDR) géospatiale offre des mécanismes efficaces de requête, d'entreposage, d'analyse et de mise à jour de données géospatiales pouvant contenir plusieurs milliers d'entités (Swain, 2015). Les SGBDR géospatiales offrent des indexations spatiales et des opérateurs spatiaux tous en respectant les normes de l'OGC (Herring, 2010) (Herring, 2011) (Steiniger, 2013). Le langage généralement utilisé est le « *Structured Query Language (SQL)* » (Swain, 2015).

Il existe plusieurs SGBDR à licence ouverte comme *MySQL*, *Spatialite* et *PostgreSQL/PostGIS*. *MySQL* n'implémente pas de fonctions en accord avec les spécifications de l'OGC (Django Software Foundation and Individual Contributors, 2017b). Il ne se conforme pas au standard de l'OGC (Oracle Corporation, 2017). *Spatialite* n'offre qu'une partie des requêtes spatiales matricielles et des fonctions géométriques (Django Software Foundation and Individual Contributors, 2017b). Parmi les SGBDR, *PostgreSQL* et son extension spatiale *PostGIS* permettant la prise en charge de la composante spatiale, se qualifient comme l'implémentation des normes de l'OGC la plus étendue (Swain, 2015 ; *PostGIS Project Steering Committee*, 2017). D'ailleurs, cette base de données relationnelle se qualifie comme étant la base de données à référence spatiale la plus utilisée à l'heure actuelle (*Open Source Geospatial Foundation*, 2017) et possédant le groupe d'utilisateurs le plus grand (Steiniger, 2013).

2.3.2.3 Cadre de développement d'applications Web

Le cadre de développement d'applications Web (aussi appelé *Framework* en anglais) peut jouer le rôle de serveur Web, gérer l'interaction avec la base de données, communiquer avec d'autres logiciels et l'application Web (Swain, 2015). Les cadres d'applications Web offrent une approche par script atténuant une grande partie du codage de bas niveau généralement associé à la conception de site Web (Swain, 2015).

Il existe plus de 50 cadres d'applications Web en langage Python (Swain, 2015). Ils sont un choix populaire dans la communauté scientifique du fait du grand nombre et de la qualité des bibliothèques scientifiques disponibles (Swain, 2015).

a) Principe « *Modèle Vue Contrôleur (MVC)* »

La plupart des cadres d'applications Web fonctionnent selon le principe de développement MVC (Swain, 2015). Le principe MVC comporte trois types de modules : les modèles, les vues et les contrôleurs (Figure 5). Le contrôleur fournit les traitements, interprète les données pour la vue et gère l'entrée et la sortie des requêtes des utilisateurs (Swain, 2015). Les modèles se veulent être une représentation des données permettant d'extraire simplement les données à afficher de bases de données (Holovaty, 2009). La vue contient la représentation de ces données par une interface graphique perçue par l'utilisateur (Holovaty, 2009).

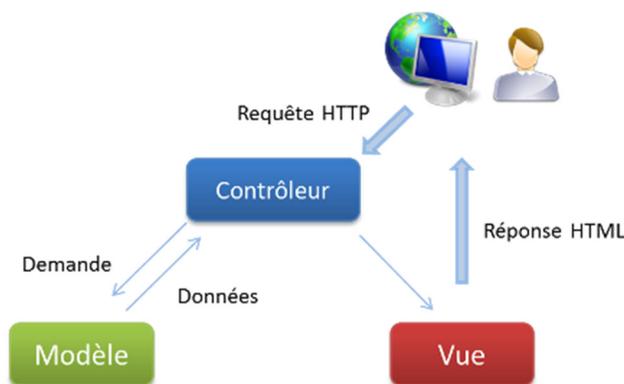


Figure 5 — Fonctionnement du MVC, extrait de Lorant (2013)

b) Approche « *Mapping objet-relationnel (ORM)* »

En géomatique, les modèles de base de données se créent généralement par des classes d'entités relationnelles, alors que la programmation en langage Python et Java sont de type orienté-objet. Afin de pallier cette différence de concept, l'approche ORM fait le lien de la base de données relationnelle et le monde de la programmation orienté-objet. L'ORM est une couche d'abstraction, orientée-objet, de la base de données relationnelle. De plus, il est possible d'utiliser le même modèle avec plusieurs bases de données (Holovaty, 2009). Il devient ainsi inutile de coder les requêtes en SQL pour obtenir les informations, car elles peuvent être générées automatiquement par l'ORM. Une commande SQL comme «*SELECT * FROM utilisateur WHERE zip_code=A1B2C3*» devient «*utilisateur = utilisateur.objects.filter(zip_code=A1B2C3)*».

c) Plateforme Django

Bien que les fonctionnalités des cadres d'applications Web soient très variées, Django se distingue par ses fonctionnalités élargies et assez variées pour un développement rapide et simple (Swain,

2015 ; Django Software Foundation and Individual Contributors, 2017a). Ainsi, ils se retrouvent parmi les plus populaires (Swain, 2015).

Un module géographique de Django (« *Geodjango* ») offre la création d'un système géographique Web de grande envergure. L'objectif de « *Geodjango* » regroupe les désirs de faciliter le développement d'applications Web géographiques (Django Software Foundation and Individual Contributors, 2017d). Ses fonctionnalités comprennent la manipulation d'objets géométriques matriciels et vectoriels, conforme à l'OGC, la connectivité à diverses bases de données, une interface Python de haut niveau, le principe développement MVC et l'ORM.

2.3.3 Technologies côté client

La rapidité de l'innovation technologique et la continuité du développement de la cartographie Web augmentent la flexibilité et l'interopérabilité des solutions cartographiques (Roth, 2014). Par contre, elle engendre, chez les développeurs, une difficulté à maintenir le cap parmi une gamme de technologies toujours grandissante (Roth, 2014).

Deux « *Application Programming Interface (API)* » en JavaScript (JS) se distinguent dans la littérature, *Openlayers* et *Leaflet* (Steiniger, 2013 ; Roth, 2014 ; Swain, 2015).

Depuis 2006, *Openlayers*, maintenue par OSGeo, se caractérise par l'extensivité de sa librairie permettant une large gamme de fonctionnalité, par sa robustesse et par son niveau de maintenance et de stabilité à long terme incomparable aux autres API de cartographie ouvertes (Roth, 2014). Par exemple, *Openlayers* peut reprojeter les données spatiales alors que *Leaflet* ne peut le faire sans l'utilisation d'une librairie externe, comme Proj.4 (Roth, 2014). *Openlayers* a rarement besoin d'ajouts pour étendre ses fonctions (Swain, 2015).

Leaflet se distingue d'abord par sa légèreté (Roth, 2014). En 2012, *Leaflet* était déjà qualifié d'important concurrent à *Openlayers* (Steiniger, 2013). Il souffrait tout de même de lacune au niveau de la fonctionnalité et de l'interactivité (Steiniger, 2013). L'intérêt grandissant de la part de la communauté pour *Leaflet* a amené l'API à évoluer à un stade plus mature. En 2014, *Leaflet* est considéré comme la meilleure API de rendu cartographique et la seconde librairie la plus étendue (Roth, 2014). *Leaflet* se démarque par une compatibilité avec d'anciens navigateurs comme Internet Explorer 7 et 8 (Roth, 2014) éliminant ainsi des soucis de complication de rétrocompatibilité.

2.4 Exploration et analyse des approches de géotraitements dynamiques orientées SIG Web libre

La mise en place de géotraitement dans une application de cartographie Web peut se faire de diverses manières. Dans cette section, les différentes avenues sont présentées et analysées afin de déterminer leurs avantages et leurs inconvénients. On peut distinguer 2 grandes catégories d'approches, celles basées sur le WPS et celles basées sur un développement classique.

2.4.1 Les avenues possibles

L'état d'origine du SIG prototype représente les fondements sur lesquels l'exploration des différentes possibilités technologiques se fonde. Ensuite, inspirés de Steiniger (2013), certains critères d'évaluation relatifs à tout projet de recherche, comme la taille de la communauté d'utilisateurs et de développeurs, le support disponible, les fonctionnalités requises comblées, les options de personnalisation, le langage de programmation, la difficulté technique et le temps d'apprentissage ont été adoptés comme seconde condition.

L'exploration des diverses approches de géotraitements dynamiques orientées SIG Web libre a mené à trois groupes distincts (1) les WPS natifs, (2) les WPS personnalisés et (3) l'utilisation d'un cadre de développement d'applications Web.

1. Les WPS natifs permettent d'utiliser les options de traitements WPS existants offerts nativement par un serveur cartographique.
2. Les WPS personnalisés comprennent les options d'implémentation de traitement adapté et personnalisé par le biais d'extension tierce ou par une programmation à même le serveur cartographique.
3. Si le WPS n'est pas envisageable pour le développement d'un géotraitement, alors il faut s'orienter vers l'utilisation d'un cadre de développement d'applications Web. Cette solution rassemble les options de développement de géotraitements personnalisés en dehors du WPS par une plateforme distincte.

2.4.1 WPS natifs

2.4.1.1 Geoserver

L'utilisation de WPS à partir d'un serveur cartographique représente l'une des approches les plus communes afin d'exécuter des géotraitements Web (Schaeffer, 2012). Le module WPS ne fait pas

nativement partie du noyau *Geoserver* et nécessite l'installation d'une extension (Geoserver, 2017b). Une fois installés, les processus spatiaux, disponibles par la norme OGC dans le serveur cartographique, peuvent exécuter des géotraitements simples. Par exemple, dans l'objectif d'extraire le réseau routier se superposant à une zone d'intérêt, il suffit de fournir le nom de la couche représentant le réseau routier, la géométrie de la zone, de spécifier le géotraitement de découpage et d'en faire la requête par HTTP-GET/POST. La réponse de cette section réunira les segments du réseau routier présents dans la zone spécifiée.

2.4.1.2 Cascade d'appel de WPS natifs

L'exigence de géotraitements plus complexes suffit à outrepasser les capacités des outils WPS natifs. Ainsi, le serveur cartographique *Geoserver* possède une librairie d'outils supplémentaires « JTS » qui double l'éventail des géotraitements natifs (OpenGeo Suite, 2017c). Malgré quelques traitements additionnels en géostatistiques, *Geoserver* se limite encore aux traitements spatiaux basiques et tabulaires simples. Néanmoins, cette librairie couplée au potentiel de cascades d'appel de processus WPS offre la possibilité de chaîner les processus en spécifiant à un processus WPS d'utiliser comme entrée la sortie d'un autre processus WPS (OpenGeo Suite, 2017c). Dans la continuité de l'exemple précédent sur l'extraction du réseau routier, si nous voulions obtenir des informations additionnelles comme la longueur et le nombre d'intersections de l'ensemble du réseau routier extrait, l'obtention de ces résultats nécessitera une cascade d'appels de plusieurs processus WPS.

La cascade d'appel de WPS natifs permet une certaine latitude tant et aussi longtemps que les besoins nécessitent l'utilisation de géotraitements simples et connus.

2.4.1.3 Mapserver

Le serveur cartographique *Mapserver* ne gère pas nativement le WPS (Swain, 2015). *Mapserver* nécessite obligatoirement une composante tierce supplémentaire afin d'offrir une solution WPS. Il est généralement conseillé de coupler *Mapserver* à une composante tierce supplémentaire selon le langage de programmation, soit *PyWPS* (Python), « *52° North* » (Java) ou *Zoo-Project* (C++). *PyWPS* est évalué à la section suivante.

2.4.2 WPS personnalisés

2.4.2.1 Java

Créer son propre géotraitement personnalisé dans le serveur cartographique est une autre possibilité. Pour ce faire, un environnement de programmation en Java est offert par *Geoserver*. Malheureusement, il est peu convivial, car il est lourdement lié à une seule librairie, *GeoTools* (OpenGeo Suite, 2017 a). Par conséquent, le manque de fonctions géospatiales avancées natives nécessite un codage manuel exhaustif. Java est un langage de programmation qui s'oriente davantage vers le développement d'applets et d'applications autonomes, alors que JS est un langage de script qui s'applique généralement à l'interactivité des pages Web (Oracle, 2017). Cette différence notoire distingue les deux langages dans leur niveau de complexité. Le développement en Java est plus vaste et complexe. Il demeure néanmoins une solution envisageable.

Par contre, l'envergure du temps nécessaire à l'apprentissage d'un second langage de programmation de cette nature ne cadre pas dans les délais prescrits de ce projet. Ainsi, cette option fut écartée.

2.4.2.2 Plugin « *Script Hooks* »

Consciente de cette réalité, la communauté de *Geoserver* a développé un plugin nommé *Script Hooks* permettant l'ajout de script de processus WPS dans plusieurs choix de langages (OpenGeo Suite, 2017d), en l'occurrence, Python. L'utilisateur du plugin code bel et bien en python, mais ce code est traduit et interprété en Jython par la plateforme Java de *Geoserver* (Geoserver, 2017a). Jython est une implémentation de Python écrite en pure Java (Pedroni, 2002). Ceci limite le développement à une seule librairie, *Geotools* en Jython, qui manque, elle aussi, de fonctions avancées forçant ainsi du codage manuel de bas niveau très exhaustif. Le Jython s'applique à des besoins spécifiques et son utilisation s'en retrouve restreinte (Pedroni, 2002). Ainsi, le potentiel d'utilisation de librairie externe compatible s'en retrouve fortement diminué.

2.4.2.3 « *WPS Process Builder* »

L'implémentation de géotraitement complexe est largement simplifiée par *WPS Process Builder*. *WPS Process Builder* de Boundlessgeo se présente comme une solution simple et conviviale pour les cascades d'appels complexes de processus natifs et personnalisés ; par contre elle exige une licence privée payante de « *OpenGeo Suite Enterprise* » pour être native, et n'est pas explicitement conçue pour offrir un potentiel de personnalisation (OpenGeo Suite, 2017b).

2.4.2.4 « *PyWPS* »

PyWPS, écrit en python, offre l'intégration, la publication et l'exécution de processus Python par l'entremise de la norme WPS de l'OGC (PyWPS Development Team, 2017a). Initialement, *PyWPS* fut développé afin de pallier un manque de communication directe entre *Grass* et *Mapserver*. Son objectif réside dans la résolution de problèmes des géotraitements sur le Web en prenant soin de la sécurité, du téléchargement des données, de l'acceptation de la demande, de la gestion des lancements des processus comme *GRASS GIS*, *R-Project* ou *GDAL* et de la construction de la réponse finale (PyWPS Development Team, 2017a). Avec ce protocole WPS arrimé à Geodjango et dans un seul langage commun, on élimine les contraintes soulevées dans les explorations des précédentes options. Ainsi le potentiel de développement se voit décuplé.

En contrepartie, l'implantation de *PyWPS* et *Geoserver* crée une redondance de serveur WPS. De plus, *PyWPS* est actuellement testé et développé exclusivement sous Linux (PyWPS Development Team, 2017b). Par conséquent, le support sous Windows s'en retrouve limité, voire inexistant.

2.4.3 Utilisation d'un cadre de développement d'applications Web

Si les approches par WPS sont difficiles à mettre en œuvre, il existe toujours la possibilité de développer les géotraitements dans une plateforme créée à partir d'un cadre de développement d'applications Web, comme *Django et TurboGears2*. Cette approche classique de développement permet d'envisager des traitements plus complexes, toutefois en mettant de côté l'interopérabilité, une force du WPS.

Déjà présent dans l'architecture du prototype, le cadre de développement d'applications Web *Django* en langage Python accepte une large gamme de bibliothèques permettant l'aboutissement de plusieurs solutions. Les options explorées sont l'implémentation du WPS à même *Django* ou un codage manuel à base de multiples bibliothèques externes.

Le cadre de développement d'applications Web *Django*, additionné de son extension géographique *Geo*, offre déjà la plupart des bibliothèques géospatiales nécessaires à la conception des géotraitements (Django Software Foundation and Individual Contributors, 2017d). Le potentiel d'utilisation de bibliothèque externe se distingue grandement des autres options, avec plus de 100 000 bibliothèques externes disponibles (Python Software Foundation, 2017). La communauté python/django est particulièrement grande, touche à divers domaines comme le développement Web, l'informatique

scientifique et numérique, l'éducation, et offre un support exhaustif (Python Software Foundation, 2017 b).

L'exploration de nombreuses librairies externes à *Geodjango* a mené à l'exclusion de certaines d'entre elles. Cette exclusion est liée au manque de support de format et de fonctionnalité ou encore au souci d'incompatibilité avec l'environnement de développement.

Les librairies *OWSLib*, *Urllib2*, *Geojson*, *Simplejson*, *Geojson-quirks*, *GDAL*, *OGR*, *OSR*, *PySAL*, *Rasterio*, *Fiona*, *Matplot*, *Shapely*, *RasterStat*, *SciPy*, *NumPy*, *SciPy*, *Scikit-learn*, *Pandas*, pour nommer que ceux-ci, font partie des librairies explorées.

Additionné d'extension comme «*SQL Alchemy*» et de *tgext.geo*, *TurboGears2* permet d'offrir sensiblement les mêmes fonctionnalités de base que *Geodjango*. Il pourrait même intégrer les fonctionnalités du serveur cartographique à l'aide de quelques extensions supplémentaires. Par contre, le développement s'en retrouverait alourdie et par conséquent ralentie. La communauté de développeur et le support offert par *TurboGears2* ne représentent qu'une fraction de l'importance que ceux de *Geodjango*. De plus, les composantes déjà exploitées de l'architecture du SIG prototype de la phase 1 ne correspond en rien à *TurboGears2* et ses extensions.

2.4.4 Conclusion de l'analyse des approches de géotraitements dynamiques

Le Tableau 1 résume les avantages et les inconvénients de chaque approche technologique de géotraitements. Les WPS natifs proposent des solutions conviviales intégrant un large choix de processus simples. Malgré le potentiel des cascades d'appels de WPS, le potentiel de personnalisation reste limité et ne peut couvrir les besoins de bien des projets. Les WPS personnalisés offrent la possibilité de coder directement les géotraitements à l'aide de deux langages différents, Python et Java. La première possibilité se révèle très simple d'installation et d'utilisation, mais particulièrement limitée au niveau du potentiel de personnalisation WPS. La deuxième s'illustre comme une solution complète offrant un grand potentiel de personnalisation WPS, mais au prix d'une complexité de la programmation, trop dépendante de *GeoTools*, d'un support limité et d'une convivialité déficiente. L'option *WPS Process Builder* n'assure pas une solution ouverte et libre. La solution *PyWPS* est mature et intègre déjà des ponts avec des outils de géotraitements, offrant ainsi de la convivialité. Malheureusement, celui-ci est restreint au système d'exploitation Linux et son implémentation créerait inévitablement une redondance de serveur de service Web. Les cadres de développement d'applications Web, comme *Geodjango*, offrent à la

fois un grand potentiel de personnalisation de géotraitements tout en étant très convivial, principalement en raison de l'exhaustivité de la disponibilité des bibliothèques externes et du support. Néanmoins, cette solution exige un environnement de programmation virtuel Python ainsi qu'une évaluation et une sélection des bibliothèques externes à utiliser.

TurboGears2 possède les caractéristiques pouvant convenir à une solution de géotraitements dynamiques Web. Néanmoins, son support est limité et sa communauté reste petite. De plus, utiliser *TurboGears2* à la place de *Geodjango* nécessiterait un recodage très imposant pour convertir le travail exécuté à la phase 1.

Tableau 1 — Récapitulatif des avantages et inconvénients des approches technologiques WPS

Approche	Avantages	Inconvénients
WPS natifs		
Geoserver	<ul style="list-style-type: none"> – Bibliothèque JTS native – Large choix de géotraitements simples – Cascade d'appel de WPS – Convivialité 	<ul style="list-style-type: none"> – Nécessite l'activation WPS par l'installation d'une légère extension – Limitation du potentiel de personnalisation WPS
Mapserver	<ul style="list-style-type: none"> – s.o. 	<ul style="list-style-type: none"> – Aucune gestion native de WPS – Ne convient pas à l'architecture d'origine
WPS personnalisés		
Geoserver (Java)	<ul style="list-style-type: none"> – Grand potentiel de personnalisation WPS 	<ul style="list-style-type: none"> – Complexité de la programmation – Ajustement nécessaire – Nécessité d'une licence privée pour l'accès au support – Non conviviale – Lourdemment dépendant de GeoTools
Geoserver (Python)	<ul style="list-style-type: none"> – Simplicité de l'installation du plug-in – Simplicité du scripte en Python 	<ul style="list-style-type: none"> – Lourdemment dépendant de GeoTools – Limitation du potentiel de personnalisation WPS – Interpréteur Jython
WPS Process Builder	<ul style="list-style-type: none"> – Interface graphique – Conviviale – Potentiel intéressant 	<ul style="list-style-type: none"> – Nécessité d'achat de licence privée – Support limité
PyWPS	<ul style="list-style-type: none"> – Solution mature – Existence de pont avec des outils de traitements – Conviviale 	<ul style="list-style-type: none"> – Développement sous Linux uniquement – Support Linux uniquement – Redondance de serveur de service Web
Cadre de développement d'applications Web		
Geodjango	<ul style="list-style-type: none"> – Exhaustivité de la disponibilité des bibliothèques externes – Grand potentiel de personnalisation WPS – Support exhaustif – Conviviale 	<ul style="list-style-type: none"> – Nécessité d'un environnement de programmation virtuel Python – Nécessité d'évaluer les bibliothèques externes
TurboGears2	<ul style="list-style-type: none"> – Exhaustivité de la disponibilité des bibliothèques externes – Grand potentiel de personnalisation WPS – Potentiel comme serveur cartographique 	<ul style="list-style-type: none"> – Développement plus lent – Support limité – Recodage très important

3. Site d'étude et données utilisées

3.1 Site d'étude

Bien que le but du prototype soit de permettre une gestion des milieux humides sur l'ensemble du territoire canadien, le travail de cet essai s'est limité sur une région du Canada. L'approche proposée pourra toutefois être appliquée sur d'autres régions.

Le SIG Web de l'essai couvre toutes les régions du Québec alors que l'indicateur d'intégrité se centralise sur l'étendue spatiale minimale de ces MRC (Figure 6) :

- Les Pays-d'en-Haut de la région des Laurentides,
- Lac-Saint-Jean-Est de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean,
- Rivière-du-Loup de la région du Bas-Saint-Laurent,
- Coaticook de la région de l'Estrie.

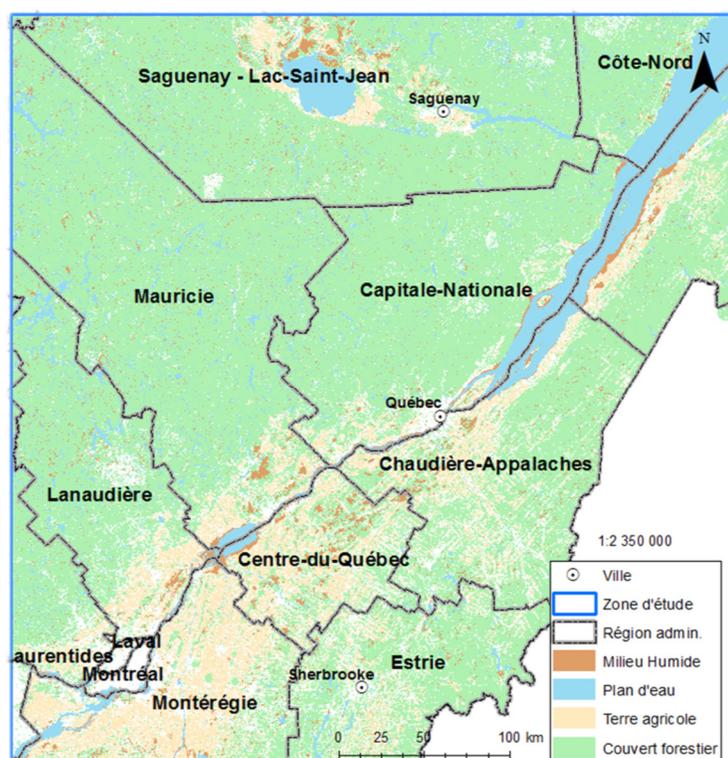


Figure 6 — Zone d'étude

La zone d'étude se concentre au sud du Québec, là où la très grande majorité des pertes de milieux humides s'opère (Queste, 2011). Le long du fleuve Saint-Laurent, entre 1945 et 1984, plus de 60 km² de milieux humides ont subi des changements importants (Jean, 2011).

De 1900 à 2005, l'extraordinaire complexe des Tourbières-de-Lanoraie aurait perdu pas moins de 28 % (21 km²) de la superficie initiale du complexe (76 km²). Les deux causes principales de cette perte s'expliquent par les activités agricoles et la coupe forestière (Tardy, 2006).

En 2016, la démographie présente à l'intérieur de la zone d'étude représente 77 % de la population entière du Québec, soit un bassin de population d'environ 6,4 millions de personnes (Institut de la statistique du Québec, 2017b). Plus de la moitié de la population occupe principalement la métropole de Montréal comportant plus de 2 millions de populations et les MRC aux alentours de cette métropole (MRC de la Montérégie et de Laval). Ces deux dernières représentent à elles seules 2 millions de population. Les villes de Québec, Sherbrooke et Saguenay composent trois autres centres urbains d'importances avec près de 850 000 personnes (Institut de la statistique du Québec, 2017a). Une très faible densité démographique caractérise le reste de la zone d'étude.

Les terres agricoles québécoises ne représentent que 2 % du territoire québécois soit plus de 1 700 000 kilomètres carrés (Union des producteurs agricoles, 2017). Néanmoins, la distribution des secteurs agricoles se concentre davantage dans le sud du Québec. Le sud du Québec se démarque avec ses terres les plus fertiles. Elles se situent majoritairement sur les rives du fleuve Saint-Laurent. La principale zone agricole québécoise se concentre dans les basses terres du Saint-Laurent, soit en plein dans la zone d'étude du projet.

Dans cette zone étude, la forte densité de forêt se retrouve largement distribuée au Nord. Cette densité diminue au fur et à mesure que l'on se rapproche du fleuve là où les activités anthropiques ont changé la nature de l'utilisation du sol.

3.2 Données utilisées

De nombreux jeux de données thématiques ont été nécessaires pour le fonctionnement du SIG (Tableau 2) ainsi que pour l'élaboration de la matrice d'intégrité (Tableau 3).

Tableau 2 — Données SIG, leurs sources et leurs pourvoyeurs

Classes d'entités	Sources	Pourvoyeurs de la donnée
Registre des aires protégées	UdS	MDDELCC et MFFP
Faune vulnérable	UdS	MFFP
Inventaire des milieux humides	UdS	Canards Illimités Canada
Ligne de transport d'électricité	geogratis.gc.ca	Ressources naturelles Canada
Limite administrative	geogratis.gc.ca	Ressources naturelles Canada
Réseau routier	geogratis.gc.ca	Ressources naturelles Canada
Sécheresse	Open Government Portal	Agriculture et Agroalimentaire Canada
Source de pollution	S.O.	Gouvernement du Canada

La majorité des données proviennent du Ministère des Ressources naturelles Canada. Elles sont disponibles dans le « *CanVec Multi-scale data* » de « *geogratis.gc.ca* » par protocole de communication destiné (FTP). Les autres pourvoyeurs de données se composent de plusieurs instances gouvernementales canadiennes et québécoises.

Tableau 3 — Données d'intégrité, leurs caractéristiques et leurs pondérations

Classes d'entités	Sources - Thème - Échelle - étendu
Transport	
Route de terre, récréative et d'hiver	geogratis.gc.ca - Transport - 50K - QC
Route locale	geogratis.gc.ca - Transport - 50K - QC
Route secondaire	geogratis.gc.ca - Transport - 50K - QC
Route provinciale et d'importance	geogratis.gc.ca - Transport - 50K - QC
Autoroute	geogratis.gc.ca - Transport - 50K - QC
Chemin de fer	geogratis.gc.ca - Transport - 50K - QC
Développement urbain et industriel	
Densité faible	geogratis.gc.ca - ManMade - 50K - QC
Densité moyenne	geogratis.gc.ca - ManMade - 50K - QC
Mine	geogratis.gc.ca - Res_MGT - 50K - QC
Carrière	geogratis.gc.ca - Res_MGT - 50K - QC
Puits de pétrole et de gaz	geogratis.gc.ca - Res_MGT - 50K - QC
Ligne électrique, de communication et pipeline	geogratis.gc.ca - Res_MGT - 50K - QC
Station de transformateur	geogratis.gc.ca - Res_MGT - 50K - QC
Couverture du sol et changement	
Forêt	geogratis.gc.ca - Land - 50K - QC
Terre cultivée	Financière Agricole du QC - Parcelles et productions agricoles déclarées - s.o. - QC

4. Méthodologie

La Figure 7 illustre la méthodologie utilisée lors de ce projet. Les différentes étapes permettent d'abord de réaliser une revue de littérature suffisamment exhaustive afin de bien appréhender et d'analyser les différents concepts que nécessite ce projet. Ensuite, la méthodologie passe par une bonne définition des approches utilisées concernant les géotraitements et les indicateurs. Après cette étape de conception, une implémentation de l'approche autant du côté serveur que du côté client est effectuée. Finalement, une évaluation de l'approche et une interprétation des résultats sont réalisées permettant l'élaboration des recommandations en guise de perspectives.

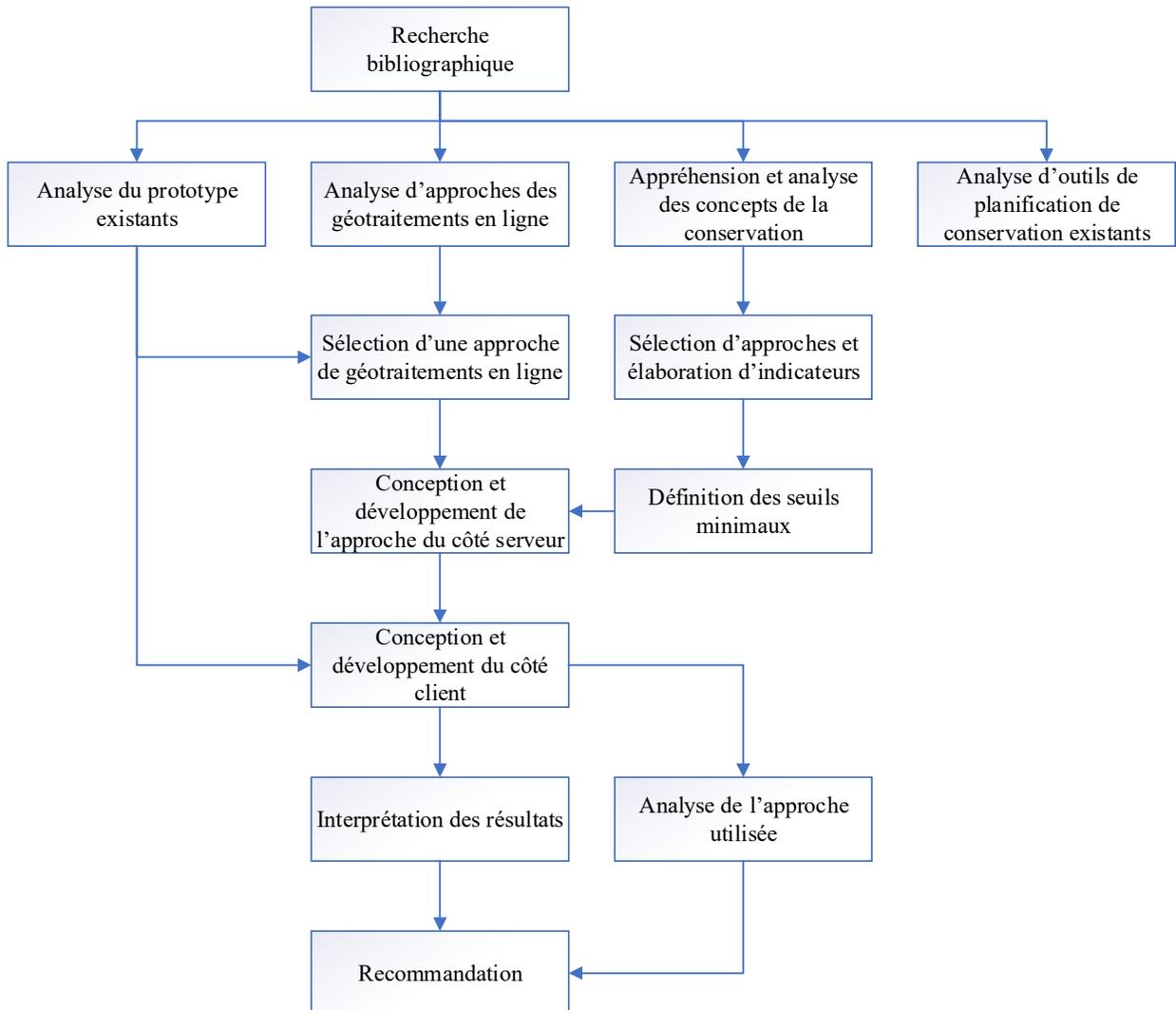


Figure 7 — Organigramme méthodologique du projet

4.1 Prototype existant

L'essai représente la seconde étape d'un projet de plus grande envergure. Il se veut d'abord une proposition de solution comblant les besoins en matière de géotraitements en réponse à une problématique de gestion des milieux humides. Ainsi, le prototype sur lequel cet essai se fondera doit être évalué.

Le prototype se compose d'un code en python pour *Geodjango*, un code de l'API *Leaflet*, du code pour les éléments essentiels d'un site Web ainsi que les données de deux classes d'entités. Un résumé des détails est fourni au Tableau 4. Un environnement de développement conforme aux spécificités techniques et logistiques a été construit afin d'établir un diagnostic du prototype. Ce diagnostic a permis de découvrir que certaines fonctions originales n'étaient plus fonctionnelles. Cette perte de fonctionnalité était principalement causée par des liens brisés. Ceux-ci ont rendu impossible le téléchargement de certaines extensions tierces de *Leaflet* par le navigateur Web. La version 0.7 *Leaflet* représente la première mouture publiée en 2013. Aujourd'hui, les extensions tierces se conforment davantage aux versions actuelles de *Leaflet* (version 1.0 et plus). Concernant *Geodjango*, une version plus récente est disponible. La grande différence entre cette version 1.10 et celle du prototype (1.08) réside dans un support de *PostgreSQL* et *PostGIS* toujours plus exhaustif, principalement le support des requêtes matricielles. De plus, l'interface utilisateur de l'application cartographique Web a été développée en anglais.

Tableau 4 — Résumé de l'état des lieux

Composantes	Fonctions	Informations	Version	Informations
Geodjango	Cadre de développement d'applications Web	Code	1.08	Complet et fonctionnel
Leaflet	Interface de programmation d'applications cartographiques Web	Code Interface en anglais	0.7	Fonctionnel
Page Web	Site Web	Code HTML, JS, CSS	s.o.	Complet et fonctionnel
PostGIS	SGBDR avec extension spatiale	Non fournie	s.o.	s.o.
Geoserver	Serveurs cartographiques	Non fournie	s.o.	s.o.
Données	Classes d'entités	Région admin. Distrib. des sécheresses	s.o.	Format shapefile

4.2 Technologies utilisées

L'analyse de l'existant du prototype et l'exploration et l'analyse des approches de géotraitements dynamiques orientées SIG Web libre ont permis de discréditer plusieurs options en matière de technologie.

Différentes technologies de service Web, de formats de transmission de données et de programmation ont été nécessaires à l'élaboration d'un SIG Web intégrant des géotraitements personnalisés en ligne.

4.2.1 Service Web et formats de transmission de données

Les protocoles WMS et le WFS accomplissent la communication entre les différentes composantes de l'architecture.

Le WMS assure la transmission de toutes les couches du Tableau 2, sous le format d'image PNG, entre les composantes du système. Le format PNG offre l'avantage de la transparence permettant la superposition de plusieurs couches et la conservation de la visibilité du fond de carte.

Le WFS est employé à chaque demande de calcul d'indicateurs pour obtenir les entités vectorielles des milieux humides. Le *GeoJSON* représente l'unique format de sortie des requêtes WFS.

Depuis 2008, le format *GeoJSON*, sans être un service Web en soi, joue un rôle important et croissant dans le domaine des bases de données à référence spatiale, des API cartographiques, des bibliothèques en langage JS et des SIG Web ouverts et libres (Butler, 2016 ; Internet Engineering Task Force, 2017).

Le *GeoJSON* est un format d'échange de données géospatiales basé sur «*JavaScript Object Notation (JSON)*» (Butler, 2016). Un objet *GeoJSON* est un *JSON* pouvant représenter une géométrie et les attributs qui y sont associés (Butler, 2016). Ainsi, son implémentation en langage JS se réalise plus simplement et assure une convivialité supérieure aux autres formats supportés comme le GML, le «*Keyhole Markup Language (KML)*» ou le «*Comma-separated values (CSV)*».

La structure du *GeoJSON* est différente que ses homologues, par contre sa fonction reste analogue aux autres formats habituels de réponses des requêtes *Getfeature* WFS (Butler, 2016). Ainsi, la plupart des serveurs cartographiques permettent le format *GeoJSON* en sortie.

Tout comme le WMS et le WFS, le *GeoJSON* est échangé par HTTP-GET et HTTP-POST.

4.2.2 Technologie de programmation

4.2.2.1 Python

Certaines bibliothèques largement utilisées dans le domaine des sciences spatiales, comme Fiona et « *Python Spatial Analysis Library (PySal)* », n'ont pu être sélectionnées. Fiona simplifierait grandement l'ouverture et la gestion des classes d'entités. Par contre, la documentation stipule 4 contre-indications à l'utilisation de Fiona (Gillies, 2016). Or, ce projet contrevient à ces 4 contre-indications. *PySal* possède des outils extrêmement puissants permettant de transformer la donnée en une véritable manne d'informations. Malheureusement, à l'heure actuelle, elle ne peut s'appliquer au besoin du projet, car son utilisation se destine particulièrement à l'économétrie spatiale à base de point, de polygone contigu ou encore de matrice représentant un paysage hétérogène continu. La représentation des milieux humides se prête mal dans tous ces cas.

L'utilisation de la bibliothèque *Shapely* s'avère très utile et efficace, mais rarement utilisable, car elle se limite aux traitements et opérateurs géométriques sans gérer les attributs. Ainsi, OGR/GDAL représente les principales bibliothèques utilisées; *Shapely* sert de compléments pour les traitements géométriques particuliers et *NumPy* excelle dans tout ce qui est mathématique spécialement les calculs matriciels. *Urllib2* permet d'exécuter des requêtes WFS par URL et de colliger les réponses. Ainsi, les bibliothèques essentielles à l'accomplissement des géotraitements sont :

- *OSR* Gestion des références spatiales et projections.
- *OGR* Création, gestion et opération des données vectorielles.
- *GDAL* Création, gestion et opération des données matricielles.
- *NumPy* Mathématique, calcul vectoriel et matriciel, etc.
- *Shapely* Exécute certaines opérations géométriques.
- *GeoJSON* Encodage/décodage et manipulation du format *GeoJSON*.
- *Urllib2* Fonctions et classes aidant à ouvrir les URL par http.

4.2.2.2 JavaScript

À l'aide des technologies de navigation sur Internet, « *Cascading Style Sheets (CSS)* », « *Asynchronous JavaScript and XML (Ajax)* » et HTML 5, l'utilisation d'un API cartographique

couplé d'un navigateur Web permet d'offrir, de nos jours, des fonctionnalités comparables aux logiciels de bureau orienté SIG (Steiniger, 2013).

Le *jQuery* permet la manipulation, la gestion d'événements et une gestion plus simple des requêtes asynchrones (Ajax) (Melé, 2015) (The jQuery Foundation, 2017a). Le *jQuery-UI* permet d'organiser une interface utilisateur dynamique (The jQuery Foundation, 2017b). Ainsi, les bibliothèques essentielles à l'accomplissement de l'interface sont :

- *jQuery* Manipulation HTML, la gestion d'événements, l'animation et l'Ajax.
- *jQuery-UI* Création et manipulation de formulaire, de menus, de boutons, etc.

4.3 Architecture du système

La Figure 7 illustre l'architecture du système comprenant un cadre de développement d'applications Web, une interface de programmation d'applications Web, un serveur cartographique et une SGBDR avec extension spatiale.

Dans le cadre de ce projet, plusieurs approches ont été évaluées mais c'est l'approche Geodjango qui a été préférée pour répondre aux objectifs du travail. Ainsi, le cadre de développement d'applications Web reste *Geodjango*. Lors des analyses, cette plateforme s'est montrée plus qu'apte à exécuter des géotraitements personnalisés. Cependant, une mise à jour vers la version 1.10 est nécessaire afin de bénéficier de toutes les opérations spatiales matricielles ainsi que pour une pleine gestion de la syntaxe de requêtes matricielles.

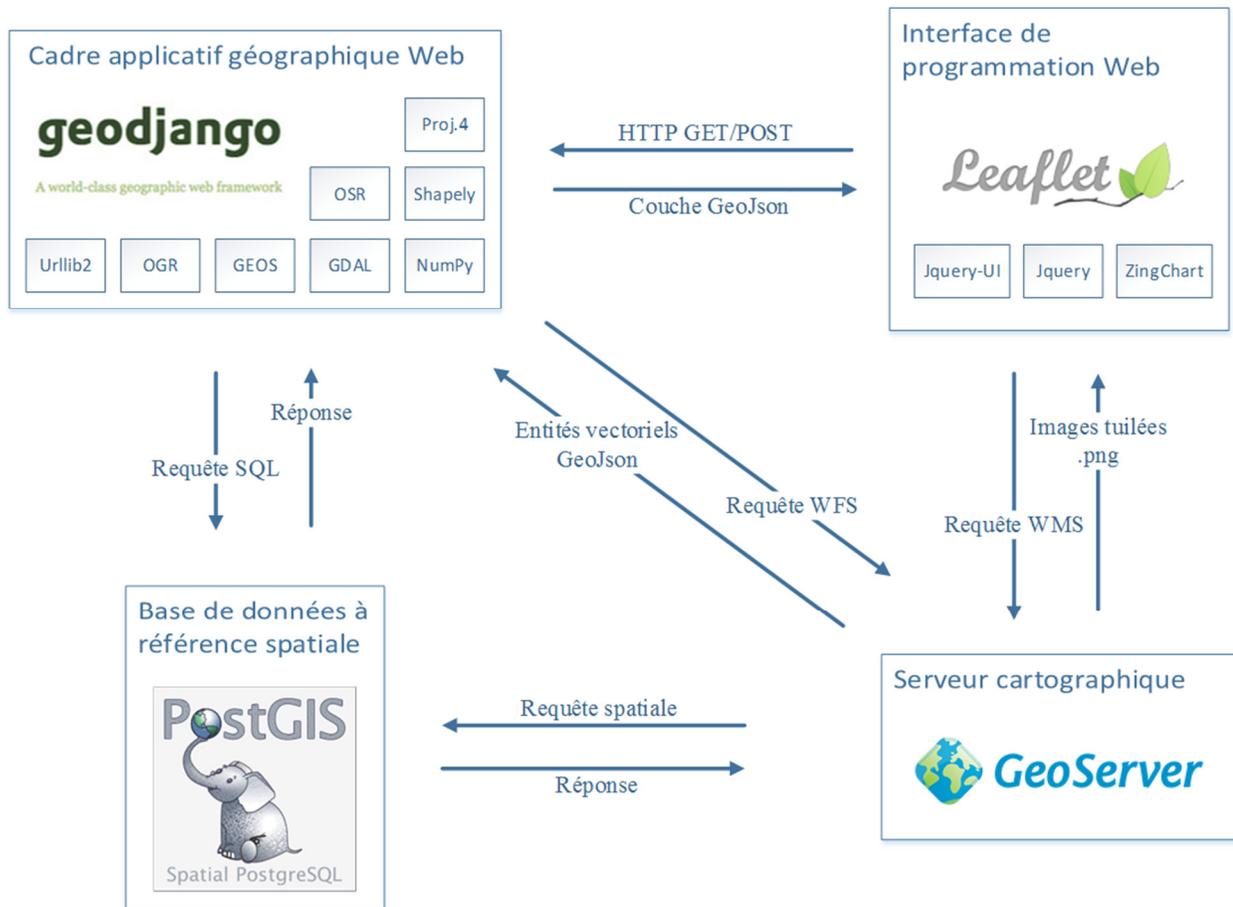


Figure 8 — Architecture du système, flux entre les composantes

PostgreSQL v.9.6 combiné avec l'extension *PostGIS* v.2.3 se qualifie comme le SGBDR avec extension spatiale aboutie et compatible avec *Geodjango*. Grâce à l'ORM, *Django* permet l'abstraction d'une base de données relationnelle par l'illusion d'une base de données orientée-objet (Melé, 2015). En définissant les correspondances entre *PostGIS* et les objets du langage utilisé (python), les requêtes SQL complexes sont gérées à l'interne et deviennent transparentes pour l'utilisateur (Melé, 2015). Ainsi, *Geodjango* communique avec *PostGIS* grâce à des classes modèles définies par le programmeur, et la programmation des traitements en est simplifiée.

L'installation et la configuration du serveur cartographique *Geoserver* v.2.10 comprennent la configuration des paramètres du serveur, la configuration des différents services Web WMS et WFS, la configuration de la structure de travail pour le bon fonctionnement des couches de données ainsi que la création de la symbologie à partir de fichier SLD. Bien configuré, il permet la réception de requête et la transmission des données selon les normes de l'OGC. L'envoi des données peut-

être sous forme d'images tuilées (WMS) ou de format vectoriel (WFS). Ainsi, ce serveur cartographique fournit à la fois l'API cartographique par requête WMS et le cadre de développement d'applications Web *Geodjango* par requête WFS.

Geodjango se caractérise par un grand nombre de fonctionnalités. Il exécute les requêtes spatiales à *PostGIS* à l'aide des classes de modèle ORM. Il héberge et gère le site Web. Il gère toutes les interactions sur le site Web par l'utilisateur. Il reçoit les demandes de processus d'indicateurs de la part de *Leaflet*, exécute les géotraitements et retourne les réponses. De plus, il exécute les demandes WFS à *Geoserver* et gère la réception de la réponse.

Leaflet reproduit un rendu cartographique par une interface utilisateur interactive. Il exécute les demandes WMS à *Geoserver* et gère la réception d'images tuilées. Il effectue des requêtes à *Geodjango* des calculs d'indicateurs exigés par l'utilisateur. Il reçoit les réponses d'indicateurs calculés en format *GeoJSON*. Il gère et affiche les couches selon la sélection de l'utilisateur.

4.4 Mise en œuvre des géotraitements

4.4.1 Déroulement des géotraitements

Par son contexte paysager, sa structure biologique et physique, il existe plusieurs dizaines d'indicateurs relatifs aux milieux humides. Parmi l'ensemble des indicateurs existants, certains ont été sélectionnés afin de construire deux approches, la métapopulation et l'intégrité du paysage.

L'évaluation de la résilience de la métapopulation des espèces dépendante des milieux humides se compose d'indicateurs définissant l'arrangement spatial de ces milieux, proximité et densité, et d'une de ses propriétés morphologiques, la taille.

Dans l'objectif de fournir une évaluation de la pression anthropique sur les milieux humides, une évaluation de l'intégrité du paysage s'appliquant sur les principes de l'écologie du paysage vise une caractérisation de l'intégrité écologique des milieux humides.

La Figure 9 illustre la séquence des opérations principales. Les données sont filtrées par région et par MRC selon l'utilisateur. Les trois indicateurs de la métapopulation sont calculés et amassés à partir des données filtrées. L'indicateur d'intégrité nécessite les données filtrées et la matrice d'intégrité afin d'être calculé. Ensuite, une compilation des indicateurs permet un assemblage pour créer une aide à la décision.

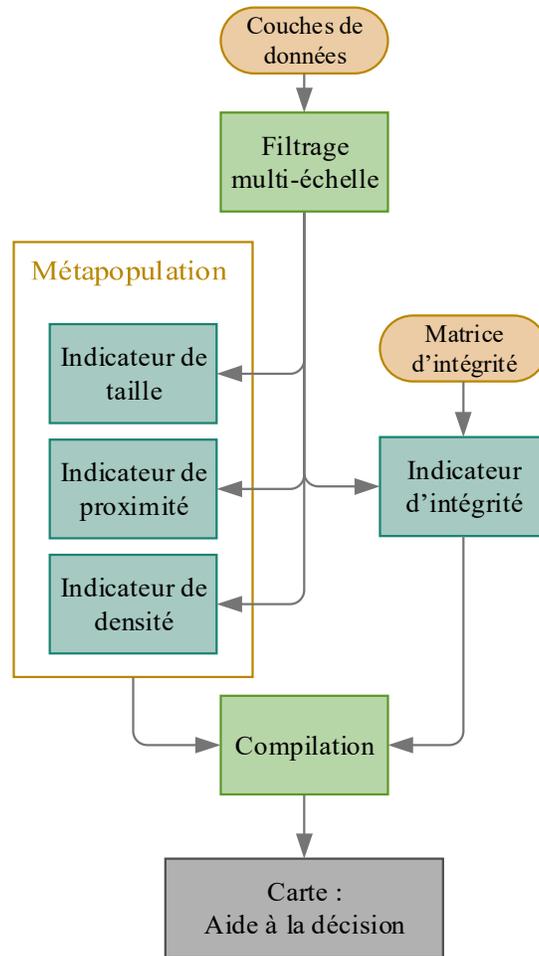


Figure 9 — Séquence des opérations principales

4.4.2 Métapopulation

Une approche préventive misant sur la protection et la restauration d'écosystèmes plus complets et plus intacts offrira à ces milieux une meilleure résistance au changement (Environnement Canada, 2013). Le dépassement des critères minimaux est nécessaire pour maintenir les populations d'espèces au-dessus des seuils d'extinction (Environnement Canada, 2013). Ces concepts ont été retenus.

L'ensemble des lignes directrices des guides gouvernementaux s'entendent sur l'importance de la densité et la proximité des milieux humides. Ces indicateurs ont été sélectionnés pour évaluer la résilience de la métapopulation dépendante des milieux humides.

4.4.2.1 Proximité

Établir un seuil minimal de proximité pour favoriser le maintien de l'ensemble des populations d'espèces dépendant des milieux humides n'est pas chose aisée. On dénote une grande variabilité entre les capacités motrices/migratoires/colonisatrices des espèces fauniques et florales. En effet, les guides indiquent des variations importantes entre les seuils minimaux de proximité selon les besoins des espèces. Néanmoins, Gibbs (2000) a effectué une analyse et une compilation exhaustive d'avis d'expert dans le domaine de la conservation de la biodiversité et les conclusions de l'étude statuent sur un seuil d'acceptabilité de proximité minimal de 500 m. Ainsi, le seuil de proximité minimal par défaut entre les milieux humides est de 500 m. Pour refléter la réalité de la variation de capacité de mobilité des espèces possédant leurs propres caractéristiques migratoires, ce seuil doit être personnalisable par l'utilisateur.

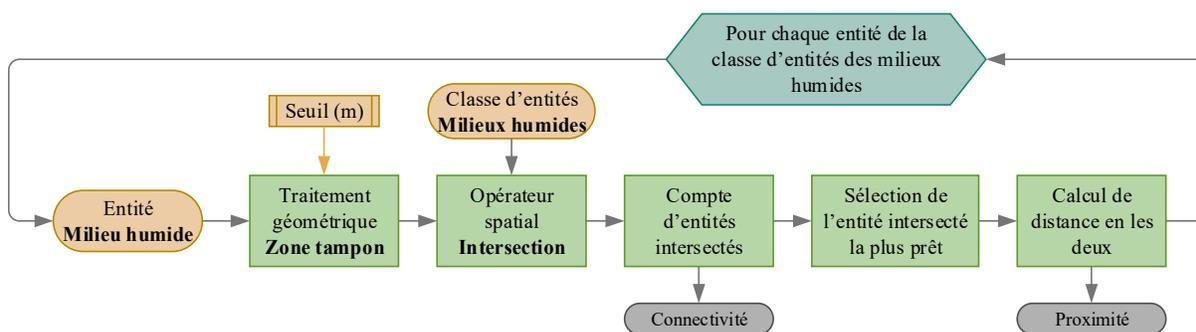


Figure 10 — Opérationnalisation de l'indicateur de proximité

La Figure 10 présente l'opérationnalisation du calcul de proximité. Elle s'effectue en 5 étapes. L'entité milieu humide en entrée correspond à une couche de données filtrées de la Figure 9. Une zone tampon est appliquée. La largeur du rayon est définie par le seuil en mètre que l'utilisateur spécifie ou celui par défaut (500 m). L'opérateur spatial, intersection, s'applique à partir de la zone tampon sur l'ensemble des milieux humides de la classe d'entités des milieux humides. Les entités présentes dans le rayon (seuil) de la zone tampon définie sont comptées afin d'obtenir le niveau de connectivité. De cet ensemble d'entités intersecté, l'entité la plus près de l'entité d'origine est identifiée et la mesure de la distance euclidienne entre les deux est effectuée. On obtient donc la distance minimale comme valeur pour l'indicateur de la proximité. Ainsi, le niveau de connectivité et la proximité minimale de ce milieu humide en entrée représentent les attributs calculés de cet indicateur. Cet ensemble d'opérations s'opère, une par une, sur tous les milieux humides de la région déterminée.

4.4.2.2 Densité

Le guide (Environnement Canada, 2013) stipule que l'agrégation des milieux est essentielle à la survie des espèces. En effet, le processus de supplémentation joue son rôle uniquement lorsque la densité des milieux est suffisante pour supporter la mobilité des espèces (Burel, 1999). Ainsi, la notion de densité a été ajoutée à celle de la proximité. Évidemment, la proximité des milieux humides favorise leur propre densité. L'indicateur de densité est dépendant de celui de la proximité. Malgré cela, il est important de ressortir la densité, car elle identifie le nombre de milieux humides regroupés et non pas à quelle distance ils le sont. De plus, suivant une grille, l'échantillonnage est statistiquement viable.

Le seuil minimal de la densité est défini à 2 entités par km² suite à l'analyse et aux compilations d'avis d'expert par (Gibbs, 2000). On dénote que cet indicateur s'opère sur la densité d'entités et non de surface.

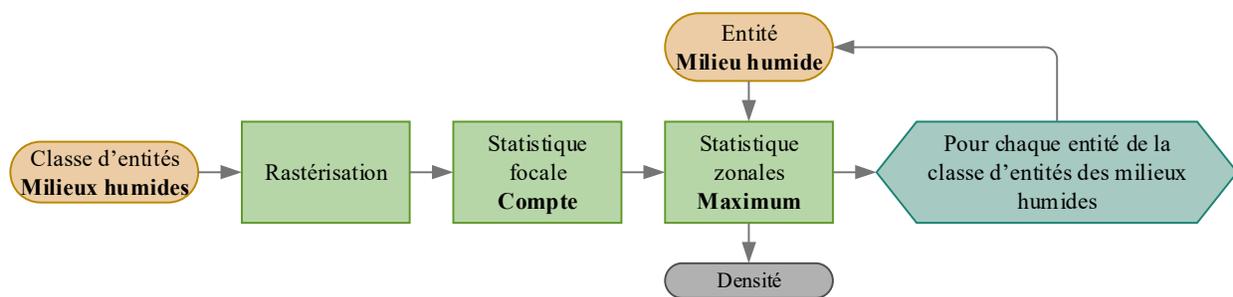


Figure 11 — Opérationnalisation de l'indicateur de densité

À la Figure 11, la classe d'entités des milieux humides correspond à la couche de données filtrées de la Figure 9. La densité nécessite un passage du format vectoriel à un format matriciel. Ainsi, une conversion des données du vectoriel au matriciel s'opère sur la couche d'entrée. Ensuite, un compte d'entités par statistique focale à l'aide d'une fenêtre glissante d'un kilomètre carré crée une matrice de densité. De cette matrice de densité on extrait la valeur maximale de densité pour chaque milieu humide à l'aide d'une opération de statistique zonale. La statistique zonale observe tous les pixels en-dessous de la surface du milieu humide et en extrait la valeur maximale. Ainsi, on obtient la densité d'entité au kilomètre carré pour tous les milieux humides par région.

4.4.3 Matrice d'intégrité

Selon la littérature, cette méthode utilisée offre des résultats statistiquement similaires, peu importe le niveau d'évaluation, que ce soit à distance (national), rapide (régional) ou intensive (Local)

(Comer, 2013 ; Faber-Langendoen, 2012 a ; Faber-Langendoen, 2012 b). C'est d'ailleurs son principal avantage. Par contre, elle nécessite des classes d'entités se retrouvant dans tous les différents types de paysages. De plus, l'étendue spatiale des couches de données doit recouvrir l'entièreté du territoire. Cette approche de la matrice d'intégrité est inspirée de Comer (2013), de Faber-Langendoen (2012a) et Faber-Langendoen (2012b), mais elle est adaptée selon le guide (Environnement Canada, 2013) et le contexte du paysage canadien.

Tout d'abord, il faut créer une matrice d'intégrité du paysage sur laquelle la mesure sera calculée. Comme le démontre la Figure 12, la matrice se construit en 5 étapes. Tout d'abord, un découpage par la zone d'étude est effectué sur les classes d'entités affectant l'intégrité des milieux humides. Ces classes d'entités se résument à trois thématiques que sont le développement urbain et industriel, la gestion et la modification de la couverture du sol ainsi que le transport. Le Tableau 3 liste l'ensemble des paramètres utilisés, leur distance d'influence ainsi que leur pondération. Après le découpage, une conversion des couches de données vectorielles en format matriciel s'opère.

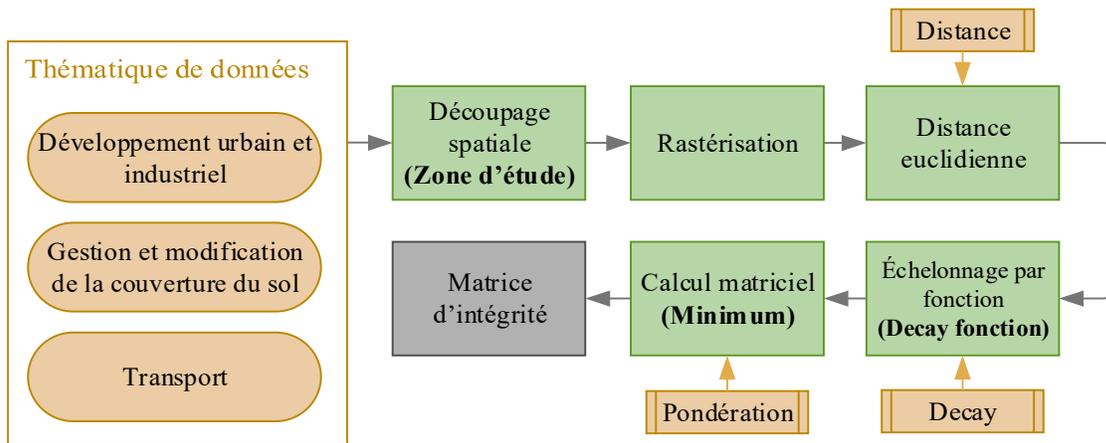


Figure 12 — Opérationnalisation de la création de la matrice d'intégrité

Contrairement à Comer (2013), Faber-Langendoen (2012a) et Faber-Langendoen (2012b) qui utilisent une limite de résolution spatiale de 90 m pour leur matrice d'intégrité, ce projet utilise une limite de résolution de pixel de 50 m pour éviter une perte induite par des décalages entre les grilles des différentes couches en entrée. Ce choix, dans la littérature, reflète les limites de résolution spatiale inhérentes de 30 m et 90 m de leurs données matricielles sources. Pour ce projet, les données sources étant de format vectoriel, il est envisageable de définir la résolution la plus techniquement adéquate. Des tests ont permis de déterminer qu'une limite de résolution de 25 m

ne pouvait être supportée dans le cadre de processus interactif. À cette résolution, le poids du fichier créé en sortie dépasse le gigaoctet pour la zone d'étude. Sur l'étendue entière du Canada, cela représenterait plusieurs téraoctets d'espace disque.

Pour chaque couche de données matricielles du Tableau, la création d'une matrice de coût par distance euclidienne est effectuée, suivie d'un échelonnage par une fonction de désintégration exponentielle selon les spécifications du Tableau 5.

Tableau 5 — Paramétrages de jeux de données de la création de la matrice d'intégrité

Classes d'entités	Distance (m)	Facteur de désintégration	Pondération
Transport			
Route de terre, récréative et d'hiver	200	0,5	0,7
Route locale	200	0,5	0,5
Route secondaire	500	0,2	0,2
Route provinciale et d'importance	1000	0,1	0,2
Autoroute	2000	0,05	0,05
Chemin de fer	1000	0,1	0,05
Développement urbain et industriel			
Densité faible	200	0,5	0,6
Densité moyenne	200	0,5	0,5
Mine	500	0,2	0,05
Carrière	500	0,2	0,05
Puits de pétrole et de gaz	500	0,2	0,5
Ligne électrique, de communication et pipeline	100	0,9	0,5
Station de transformateur	100	0,9	0,5
Couverture du sol et changement			
Forêt	0	1	0,9
Terre cultivée	200	0,5	0,3

Ainsi, ces traitements permettent de représenter l'influence des classes d'entités sur l'intégrité des milieux humides selon une intensité décroissante exponentielle en fonction de la distance. L'approche utilise une fonction de désintégration exponentielle (*Decay function*) permettant d'obtenir une matrice de distance euclidienne inversée dont l'intensité est forte à l'origine du stress d'intégrité et diminue rapidement selon la distance. La Figure 13 illustre la relation de la distance et de la diminution du stress.

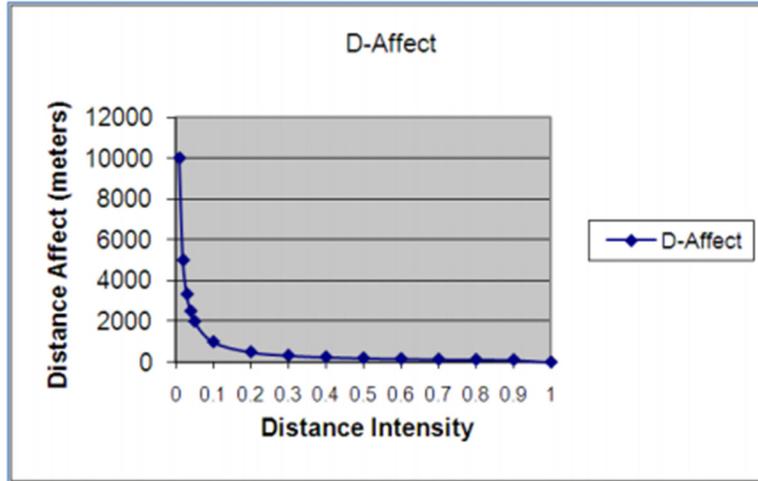


Figure 13 — Courbe de valeur de distance, fonction de désintégration tirée de Faber-Langendoen (2012 a)

Finalement, un calcul vient combiner, en une seule matrice finale, toutes les matrices échelonnées. Lors de ce calcul, pondéré selon les valeurs du Tableau 3, la valeur minimale est retenue pour chaque superposition de pixels.

Pour obtenir l'intégrité relative de chaque milieu humide, une boucle récursive de calcul de statistique zonale doit s'opérer sur la matrice d'intégrité pour chaque milieu humide comme l'illustre la Figure 14.

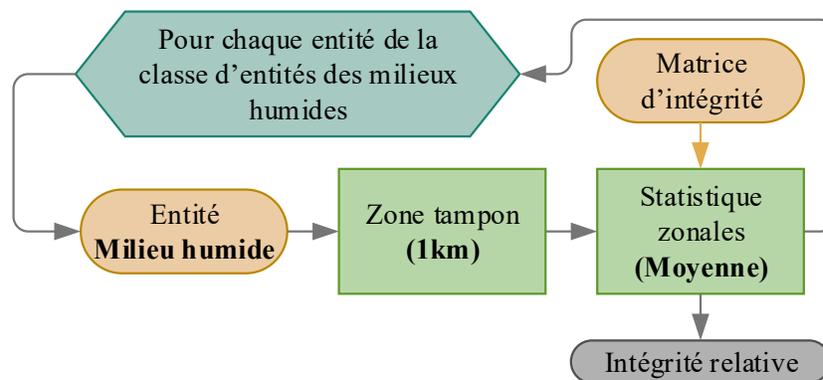


Figure 14 — Opérationnalisation d'indicateurs de l'intégrité relative

Ainsi, une zone tampon d'un kilomètre de rayon sert de zone à l'opération de statistique zonale. L'intégrité relative se calcule par la moyenne des pixels de la matrice d'intégrité se trouvant en-dessous de la zone tampon de celui-ci.

4.5 Présentation et évaluation des résultats

Les sections suivantes présenteront les résultats. Cette présentation se compose d'un aperçu des ajouts à l'interface utilisateur, le résultat de la création de la matrice d'intégrité et un exemple de résultat de calcul pour chaque indicateur.

De plus, une évaluation de l'approche de développement est abordée par une discussion concernant l'atteinte ou non des besoins du projet, les ajouts possibles et alternatifs et les limites du système. Une interprétation de l'aide à la décision permet de mettre en évidence et de mieux saisir les grandes forces de l'approche et des indicateurs. Ensuite, deux évaluations permettent de faire la lumière sur le potentiel et les limites des indicateurs. La première évalue l'un des indicateurs par une caractérisation de milieux humides à l'aide d'informations externes et la seconde compare un des indices calculés avec des informations ainsi que des données terrain provenant d'une autre source.

5. Résultats

5.1 Présentation de la plateforme interactive et son fonctionnement

5.1.1 Aperçu de l'interface utilisateur

L'interface cartographique, illustrée à la Figure 15, comporte deux volets dynamiques, des boutons de gestion de l'échelle, un bouton de mise en plein écran et finalement une mini-carte.

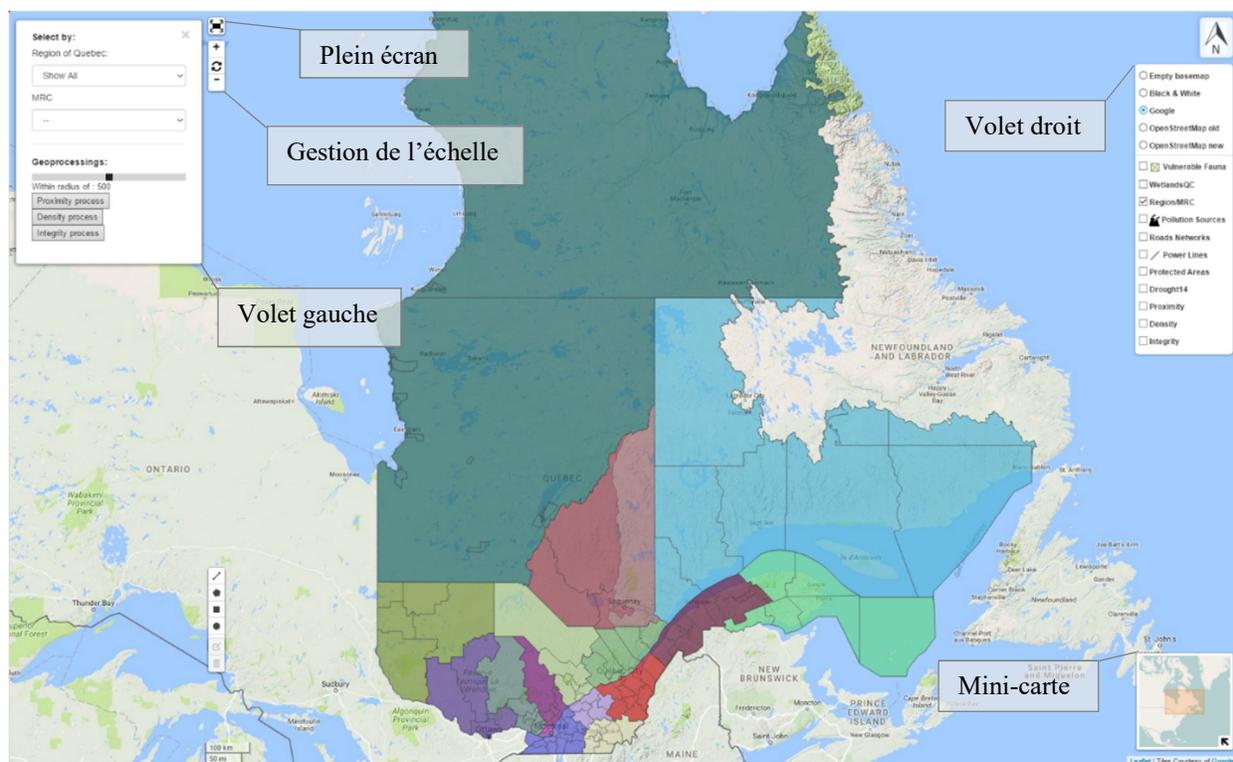


Figure 15 — Interface utilisateur

Le client a initialement demandé une interface en anglais pour le premier prototype. Or, l'interface utilisateur interactive reste en anglais. Néanmoins, l'approche n'empêche en rien la définition d'autres langues.

Le bouton plein écran maximise l'espace du cadre du *SIG Web* en s'ajustant à la taille maximum de l'écran. De plus, la mini-carte aide l'utilisateur à situer la vue de la carte dans l'ensemble du territoire continental nord-américain. Elle est rétractable afin de disposer davantage d'espace cartographique.

Le volet de droite se déploie lors du passage du curseur sur l'icône . Ce volet offre une sélection de plusieurs fonds de carte, de différentes couches thématiques ainsi que les couches des

indicateurs qui pourraient être calculés. Le volet dynamique de gauche se compose des options de filtres régionaux et municipaux et d'un ensemble d'éléments relatifs aux géotraitements. Ainsi, cet ensemble permet de lancer les processus de géotraitements des indicateurs.

5.1.2 Procédure de lancement des processus d'indicateur

L'utilisateur doit d'abord définir une zone d'intérêt. Cette définition est un préalable à l'exécution des processus pour éviter une surcharge du système. Le lancement des processus d'indicateur nécessite un filtrage régional et un filtrage par municipalité. La Figure 16 illustre le message d'alerte invitant l'utilisateur à appliquer les filtres nécessaires, qui apparaîtra s'ils ne sont pas appliqués lors d'un lancement de calcul d'indicateur.

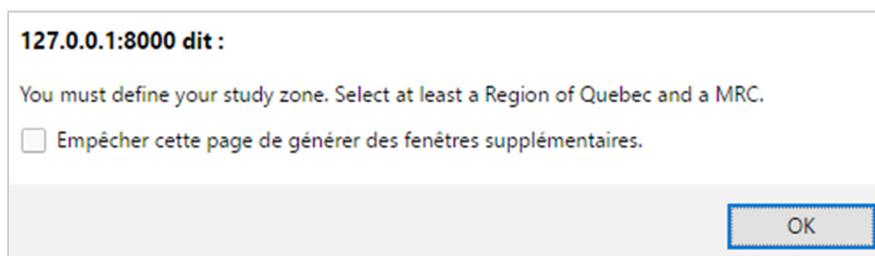


Figure 16 — Message d'invite concernant le filtrage

La Figure 17 démontre le contenu du volet dynamique gauche. Elle contient une barre horizontale de sélection du nombre de mètres pour le paramètre du rayon de l'indicateur de proximité. À l'aide de cette barre horizontale, dont les valeurs varient de 0 à 1000 m, l'utilisateur peut choisir le rayon avec lequel le processus de proximité s'effectuera. La valeur par défaut a été définie à 500 m. Les boutons « *Proximity process* », « *Density process* » et « *Integrity process* » du panneau rétractable appellent respectivement les géotraitements des indicateurs de proximité, de densité et d'intégrité.

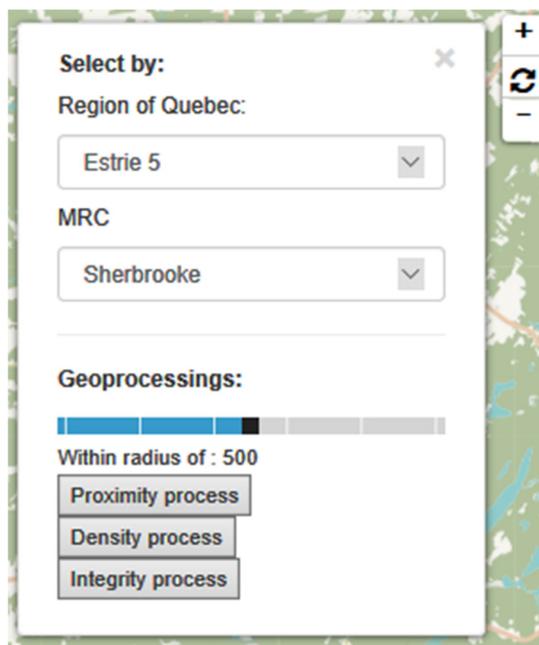


Figure 17 — Agrandie du volet dynamique gauche

Lorsque l'un des boutons est actionné, un appel de calculs de l'indicateur est lancé. Les paramètres de filtrages définis par l'utilisateur sont aussi envoyés lors de cet appel. Le contrôleur de *Geodjango* reconnaît cet appel, prend en compte les paramètres et lance le processus approprié.

5.2 Résultat de la création de la matrice d'intégrité

Le résultat de l'opérationnalisation de la création de la matrice d'intégrité est illustré à la Figure 18. Elle représente l'intégrité écologique selon les éléments perturbateurs du paysage québécois. Les classes doivent être interprétées de très faible intégrité à très forte intégrité.

Les valeurs associées aux classes sont représentées par les mêmes étendues que les ouvrages de Comer (2013), de Faber-Langendoen (2012a) et de Faber-Langendoen (2012b) :

Classe intégrité relative	Valeur continue
– Très faibles	< 0,2 ;
– Faible	0,2 à < 0,4 ;
– Moyenne	0,4 à < 0,6 ;
– Haute	0,6 à < 0,8 ;
– Très haute	0,8 à <= 1.

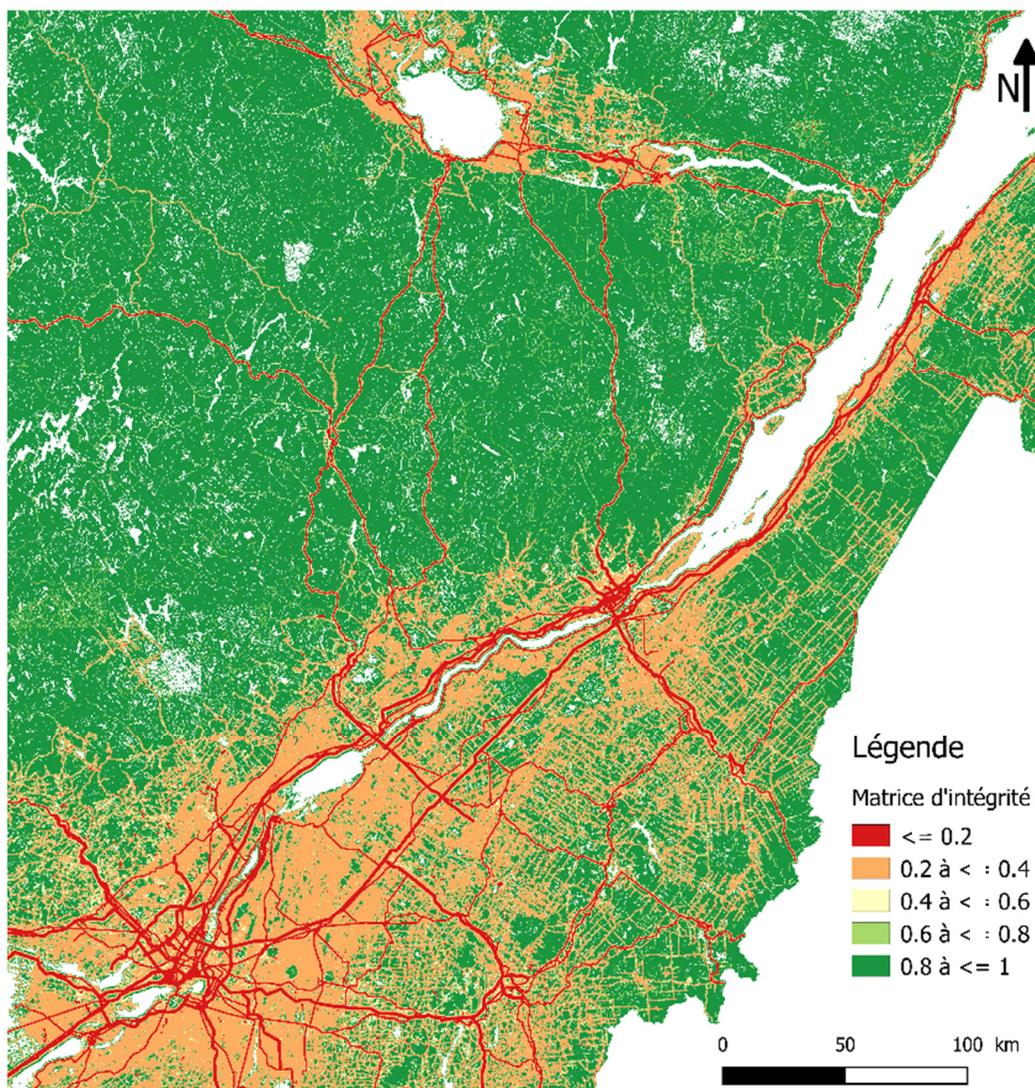


Figure 18 — Résultat du processus de création de la matrice d'intégrité

Tout d'abord, on remarque qu'il y a une grande étendue de la classe de très forte intégrité à partir du centre jusqu'au nord et jusqu'à l'ouest. À l'exception des environs du Lac-Saint-Jean classifiés fiables et de très faibles intégrités, représentant un milieu urbain et agricole.

De plus, on remarque que l'intégrité relative près du fleuve St-Laurent est majoritairement très faible à moyen. Le Sud du fleuve St-Laurent est caractérisé par un gradient d'intégrité s'améliorant progressivement d'ouest en est. Ainsi, le milieu urbain près de Montréal offre une intégrité relative bien plus faible que tout le territoire à l'est de Montréal, caractérisé par un milieu rural.

La Figure 19 illustre cette différence marquante dans l'intégrité du paysage entre l'environnement urbain et rural.

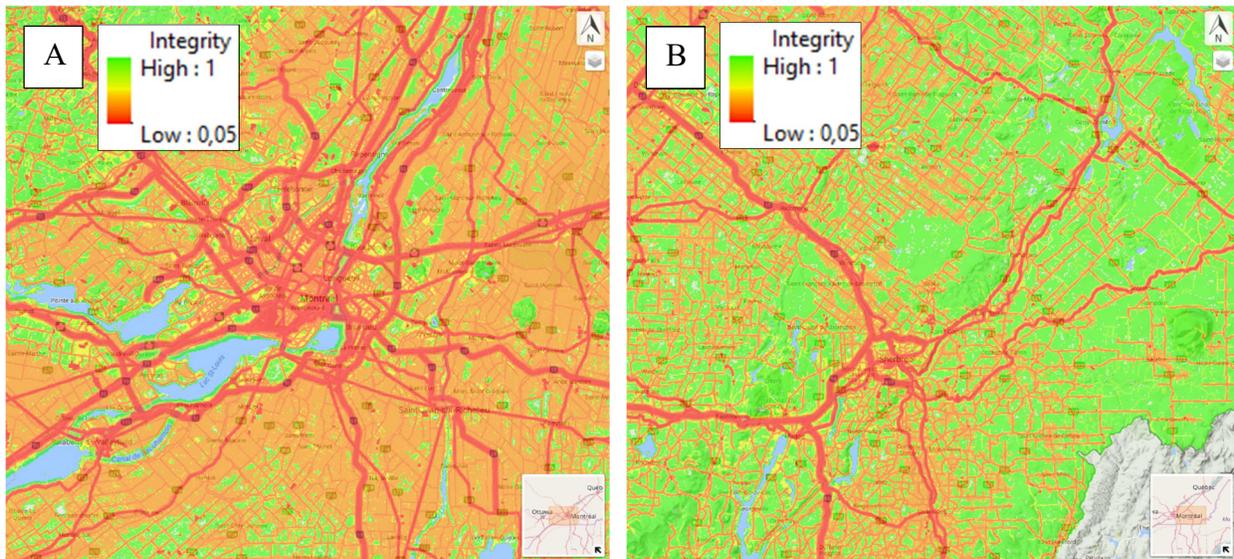


Figure 19 — Matrice d'intégrité du paysage à même l'interface, A : environnement urbain, B : environnement rural

En A, l'intégrité d'un paysage urbain se distingue majoritairement par la grande présence de la classe Faible intégrité, en orange, principalement représentée par les terres cultivées. De plus, le réseau routier présente une haute densité très étendue comportant davantage de classe Très faible, en rouge. À l'opposé, en B, l'intégrité du paysage rural démontre une présence majoritaire de la forêt représentée par de grandes étendues de la classe Très forte intégrité, en vert. De plus, le réseau routier, moins prépondérant, et la faible présence des terres agricoles affectent dans une moindre mesure l'intégrité du paysage.

5.3 Exemple de résultats d'indicateurs

5.3.1 Indicateur de proximité

L'indicateur de proximité permet d'identifier les milieux humides isolés ainsi que les grappes de milieux humides fragmentés selon la distance précisée par l'utilisateur. Dans le cas de la Figure 20, il y a présence de 4 milieux humides isolés (Rouge). Par manque de connectivité et de supplémentation, ces milieux représentent un risque d'extinction locale d'espèce, s'ils venaient à disparaître. Le gestionnaire pourrait prioriser ces zones à risque pour la mise en place d'une gestion de la conservation afin d'éviter leur disparition.

De plus, la forte fragmentation des milieux humides au nord-est et au sud-ouest (vert foncé) de la Figure 20 pourrait mettre en alerte le gestionnaire sur de possibles mécanismes et perturbations sous-jacents favorisant ce phénomène de fragmentation. Il pourrait identifier la nature de cette

fragmentation et évaluer si la nécessité de mettre plus d’emphase sur la conservation de ces zones. Les mécanismes et perturbations sous-jacents peuvent être mieux identifiés à l’aide de l’indicateur d’intégrité relative. À cet effet, la section 6.2.2.2 traite de l’identification de la nature de la fragmentation.

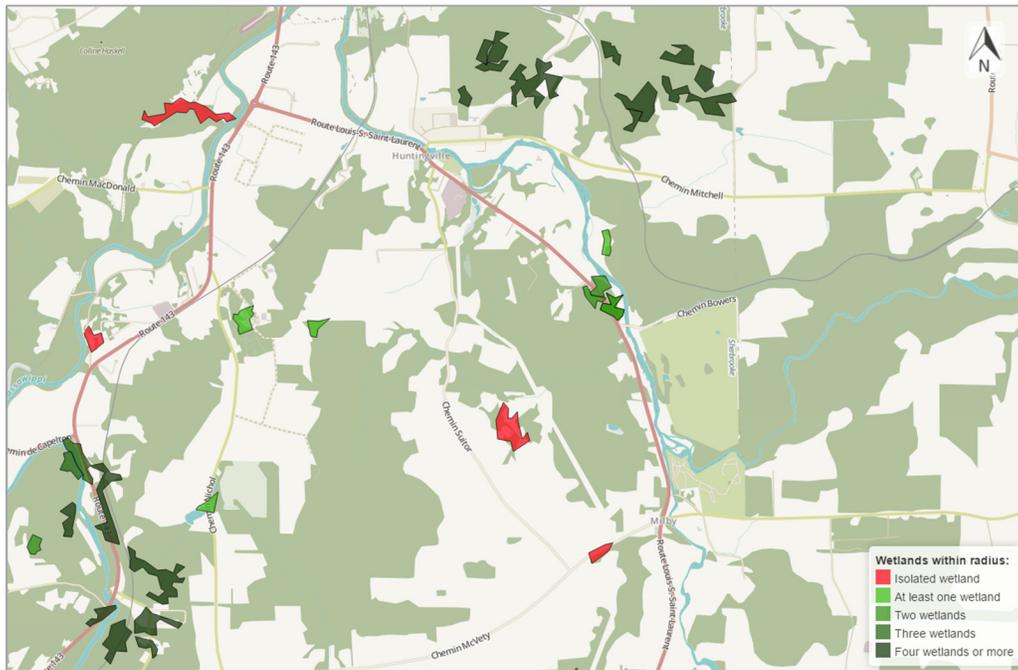


Figure 20 — Exemple d’indicateur de proximité

5.3.2 Indicateur de densité

L’indicateur de densité quantifie la densification des milieux humides par km². Il offre l’identification des milieux humides solitaires à l’intérieur d’un km². La Figure 21 démontre le résultat pour la MRC de Drummond. On dénote que l’ensemble de milieux humides dans le paysage est particulièrement dense dans cette MRC malgré la douzaine de milieux humides solitaires. Le gestionnaire peut analyser l’ensemble du résultat afin de prédire le potentiel de détérioration. Dans l’encadré orange, on peut remarquer qu’un milieu humide (rouge) est sous le seuil minimal de 2 entités par km²; celui tout juste à sa droite (vert pâle) est au seuil minimal et finalement celui à sa droite, bien qu’il soit de très haute densité, sa forme irrégulière, non naturelle, laisse présager une diminution causée par l’activité humaine. Si cette tendance persiste, le milieu humide étant au seuil minimal (vert pâle) deviendra probablement lui aussi sous le seuil. Cette réaction en chaîne défavorise la connectivité et la supplémentation de l’ensemble des milieux

humides de la région. Ainsi, le gestionnaire peut centraliser ses efforts de conservation sur ces milieux à risque de devenir solitaire.

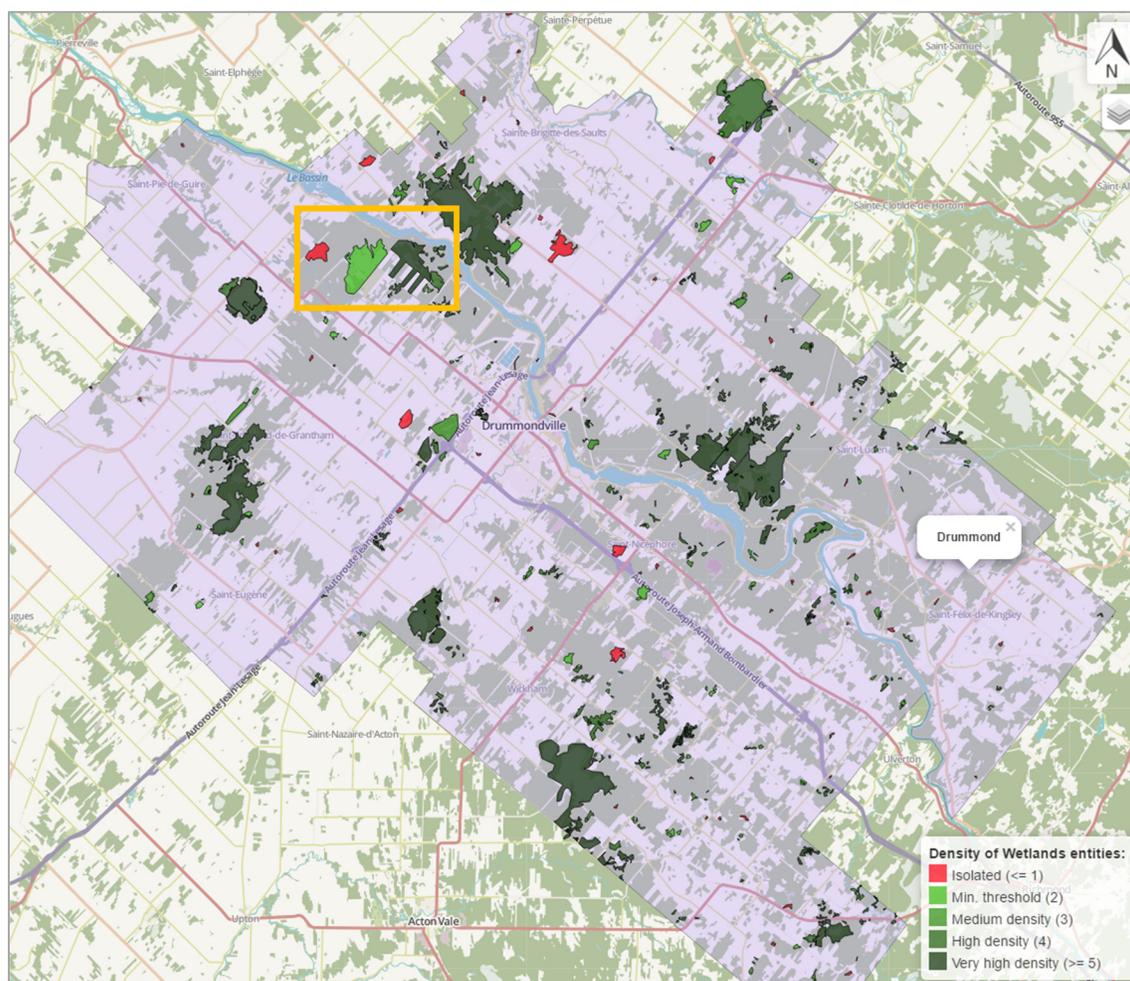


Figure 21 — Exemple d'indicateur de densité sur la MRC de Drummond

5.3.3 Indicateur d'intégrité relative

Dans une région comme à la Figure 22A, sans avoir de données supplémentaires, il est difficile pour un gestionnaire d'identifier et de prioriser les milieux humides en fonction de leur état écologique. Or, l'indicateur d'intégrité relative offre un aperçu sur l'état écologique des milieux humides. À la Figure 22B, les résultats de l'indicateur d'intégrité permet au gestionnaire la localisation des endroits où la pression des perturbations anthropiques est importante. L'encadré contient des milieux humides de classe de Très faible et de Faible intégrité relative. Ces indices d'intégrité basse se justifient et se devinent aisément par la présence de deux autoroutes sur le fond de carte. Néanmoins, les ensembles de milieux humides encadrés proposent des exemples

insoupçonnés sur lesquels le gestionnaire pourrait porter son attention. Ces milieux sont de classe moyenne à faible intégrité, alors qu'ils ne sont pas apparemment près de zone urbaine ou de tronçon important du réseau routier. Ainsi, l'indicateur d'intégrité relative laisse transparaître des problématiques insoupçonnées pouvant aider le gestionnaire à mettre plus d'emphasis sur la conservation de ces zones.

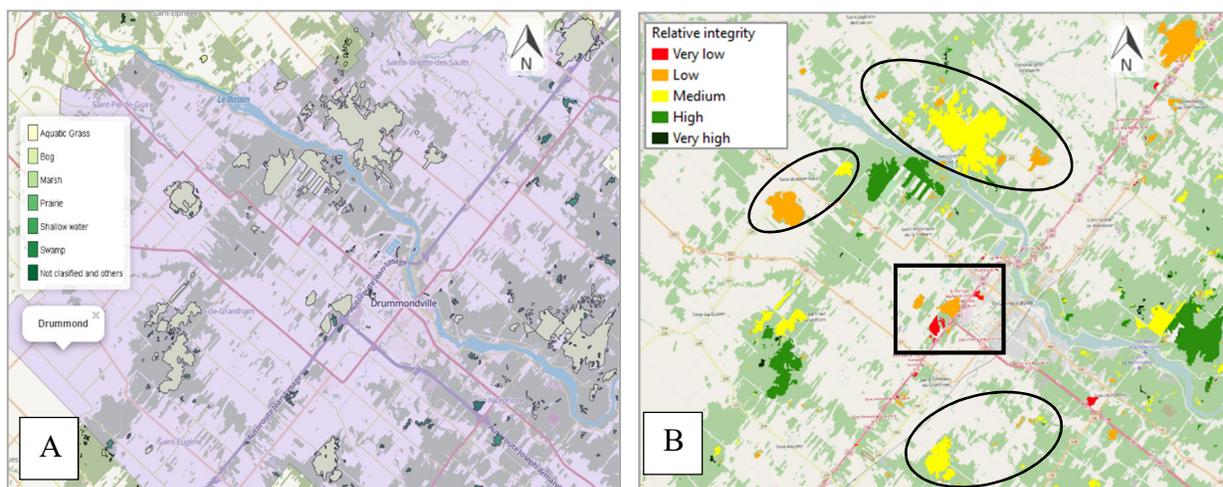


Figure 22 — Exemple d'indicateur d'intégrité relative, A : Classe de milieux humides, B : Indicateur d'intégrité relative

6. Discussion des résultats

6.1 Évaluation de l'approche de développement

L'approche utilisée répond au besoin du projet. Premièrement, elle intègre les principes de géotraitement accessibles en ligne et est apte à gérer des données hétérogènes provenant de différentes sources. Ainsi, l'approche offre les capacités de répondre aux demandes de calcul d'indicateurs. Deuxièmement, l'évolution du système n'a utilisé que des éléments fondés sur le principe du code ouvert, que ce soit le langage, les bibliothèques, les protocoles, le cadre de développement d'applications Web, la SGBDR ou l'API cartographique. Troisièmement, l'approche met en place des outils d'aide à la décision orientés vers la gestion du territoire en vue de la planification de la conservation des milieux humides, par l'intégration des indicateurs de métapopulation et d'intégrité. Quatrièmement, l'approche comprend la mise en œuvre du principe d'interopérabilité. Ainsi, le système est apte à gérer et recevoir les requêtes WMS et WFS par l'entremise de n'importe quels outils supportant les services de l'OGC. Bien que la littérature démontre un intérêt pour la norme WPS, cette approche a été évaluée dans ce projet, mais elle s'est avérée difficile à mettre en œuvre pour les besoins du projet.

Ce constat permet d'affirmer que l'approche répond au besoin sans mettre en œuvre la norme WPS. Le WPS pourrait être envisagé dans le cadre d'une poursuite du présent projet.

6.2 Interprétation de l'aide à la décision

6.2.1 Indicateurs de métapopulation

Les indicateurs de métapopulation sont une approche très utile pour les gestionnaires du territoire, car ils permettent très rapidement de connaître la situation des milieux humides.

Les seuils minimaux des indicateurs de métapopulation catégorisent intuitivement les milieux humides en trois groupes distincts en fonction de leurs arrangements spatiaux. Le premier groupe représente les milieux humides ayant des classes au-dessus des seuils minimaux, soit un arrangement spatial favorable. Le deuxième groupe regroupe les milieux humides ayant des classes au-dessous des seuils minimaux, soit un arrangement spatial défavorable. Le troisième groupe rassemble les milieux humides à la limite des seuils minimaux, soit un arrangement spatial moyennement favorable. Le Tableau 6 en résume les caractéristiques.

La taille du milieu humide joue aussi un rôle important dans le processus de supplémentation. Plus la taille est grande, plus il y aura de possibilités de survie des espèces (Burel, 1999). Elle doit être ainsi considérée dans l'observation des arrangements spatiaux.

Tableau 6 — Caractéristiques des trois types arrangements spatiaux

Arrangement spatial		
Favorable	Moyennement favorable	Défavorable
<ul style="list-style-type: none"> – Très forte résilience naturelle – Très fort potentiel de migration, déplacement et de colonisation – Très faible risque d'extinction local 	<ul style="list-style-type: none"> – À la limite des seuils minimaux – Fragilité de la résilience naturelle – Risque potentiel d'extinction local 	<ul style="list-style-type: none"> – Forte limitation de la percolation et de la perméabilité dans le paysage – Très faible résilience naturelle – Très fort risque d'extinction local

Dans la suite, des exemples de situation sont présentés permettant d'illustrer la force des indicateurs mis en œuvre.

6.2.1.1 Arrangement spatial favorable

Un arrangement spatial favorable représente les milieux humides fortement groupés et possédant une forte résilience naturelle (Figure 23). Le potentiel de migration/déplacement et de colonisation des espèces fauniques et de la flore suffit à soutenir les espèces advenant des changements majeurs dans le paysage connexe. Ainsi, les indicateurs de proximité et de densité indiquent un arrangement spatial de ces milieux humides offrant un fort processus de supplémentation favorisant la possibilité de survie des milieux humides ainsi que des espèces y nichant (Burel, 1999). De plus, la plupart de ces milieux humides, de la Figure 23, possèdent une taille dépassant le km², favorisant la résilience naturelle de cet ensemble de milieux humides. Sans même lancer l'indicateur d'intégrité relative, la matrice d'intégrité en fond de carte nous révèle un contexte à proximité relativement naturalisé dont l'agriculture reste en périphérie éloignée.

Ces milieux représentent un élément important dans la résilience de la métapopulation. Dans une optique de conservation, des milieux humides, le schéma d'aménagement et de développement de cette région devrait planifier une limitation de l'expansion urbaine près de ces milieux et prendre en compte la valeur écologique potentielle.



Figure 23 — Arrangement spatial favorable, MRC de Drummond, Carte de fond : matrice d'intégrité, Densité

6.2.1.2 Arrangement spatial défavorable

Un arrangement spatial défavorable représente les milieux humides isolés. La percolation et la perméabilité de la métapopulation dans ce type de paysage s'en retrouvent limitées (Burel, 1999). La résilience naturelle des milieux humides s'en retrouve détériorée. Advenant la disparition d'un milieu humide, le potentiel de survie amoindri engendre un risque d'extinction locale des espèces en présence. La Figure 24 démontre un arrangement spatial défavorable qui se compose majoritairement de petits milieux humides isolés. Par la matrice d'intégrité, en fond de carte, on dénote la grande présence de la classe d'intégrité moyenne (orange) signifiant un contexte fortement agricole.

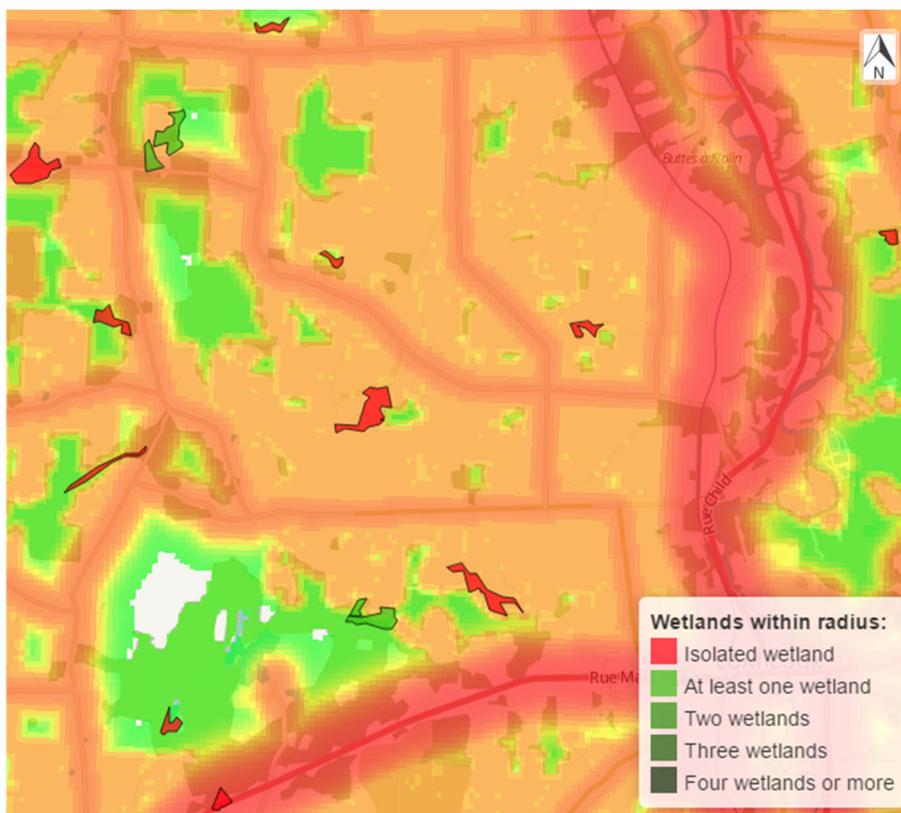


Figure 24 — Arrangement spatial défavorable, MRC de Coaticook, Carte de fond : matrice d'intégrité, Carte de fond : Proximité

6.2.1.3 Arrangement spatial moyennement favorable

Les milieux humides avec un arrangement spatial moyennement favorable représentent de petites grappes de zones humides groupées, généralement en duo. La Figure 25 démontre un arrangement spatial moyennement favorable se composant d'environ une dizaine de duo de milieux humides. En considérant, les milieux humides contigus localisés à l'intérieur des cercles bleus comme une entité à part entière, ces 8 duos sont tous à la limite des seuils minimaux. De plus, on remarque trois milieux humides classés sous les seuils minimaux. Ainsi, la résilience naturelle reste particulièrement fragile dans cette région. Dans le cas d'une baisse additionnelle du processus de supplémentation, les espèces risquent d'être isolées et peuvent connaître l'extinction locale (Burel, 1999). La matrice d'intégrité, en fond de carte, affiche un contexte rural particulièrement boisé et segmenté par le réseau routier, où la démographie reste en bordure de ce réseau.

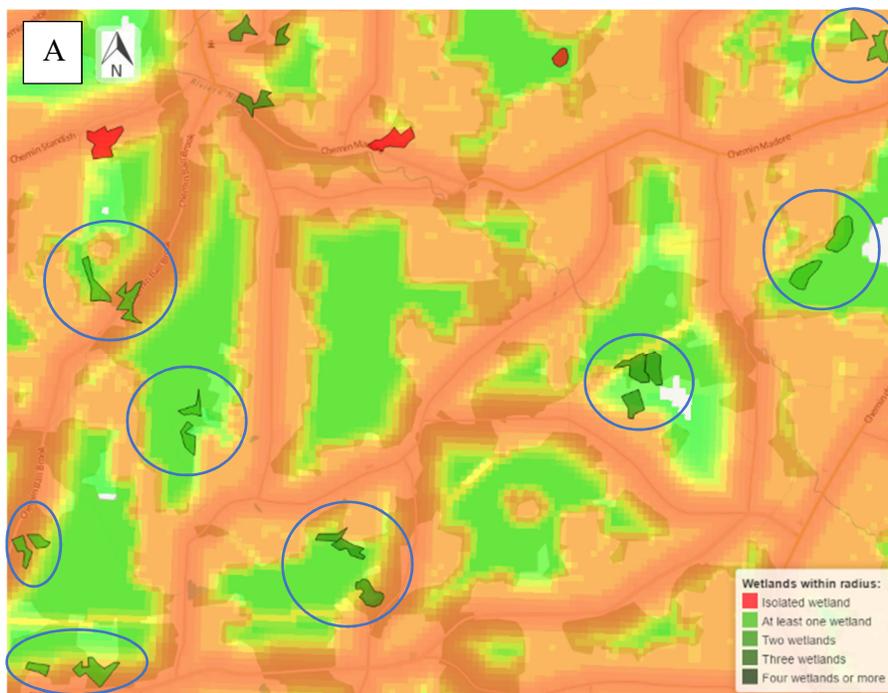


Figure 25 — Arrangement spatialement favorable, MRC de Coaticook, Carte de fond : matrice d'intégrité, Proximité,

6.2.2 Indicateur d'intégrité relative

6.2.2.1 Caractérisation de l'intégrité des milieux

L'indice d'intégrité relative se compose de l'addition des stress induits par l'ensemble des agents perturbateurs énoncés dans le Tableau 3. Il permet de cumuler le stress relatif induit par les éléments perturbateurs du paysage à proximité de chaque milieu humide. La classification très faible à très haute intégrité relative caractérise une possible tendance temporelle de l'évolution des conditions écologiques relatives des milieux humides.

Un milieu humide représenté par une classe de mauvaise intégrité indique un risque de dégradation progressif dans le temps. Comme le démontre la Figure 26, le Marais-de-la-Rivière-aux-Cerises, classé avec une intégrité faible (masse orange), est situé en plein dans la municipalité de Magog. Dans cet exemple, l'indice d'intégrité relative offre un aperçu de l'état écologique du milieu humide. Ce milieu humide, affecté par les routes, les habitations et les chemins de fer à proximité, subissent de fortes pressions anthropiques depuis plusieurs décennies (LAMRAC, 2017). L'eau à l'exutoire du Marais est classée de mauvaise qualité (Langlois, 2008). De plus, l'important apport en sédiment laisse présager des changements importants dans le milieu humide (Langlois, 2008).

Ces indices locaux laissent présager que l'intégrité de ce milieu ne s'améliorera pas et qu'il aurait probablement déjà disparu sans l'intervention de l'Association du Marais-de-la-Rivière-aux-Cerises (LAMRAC).

Sans utiliser des informations précises à une échelle locale, l'indicateur d'intégrité relative réussi à bien caractérisé l'intégrité de ce milieu. Ainsi, l'indice d'intégrité relative pourrait permettre à la LAMRAC de mieux identifier les milieux humides à préserver.

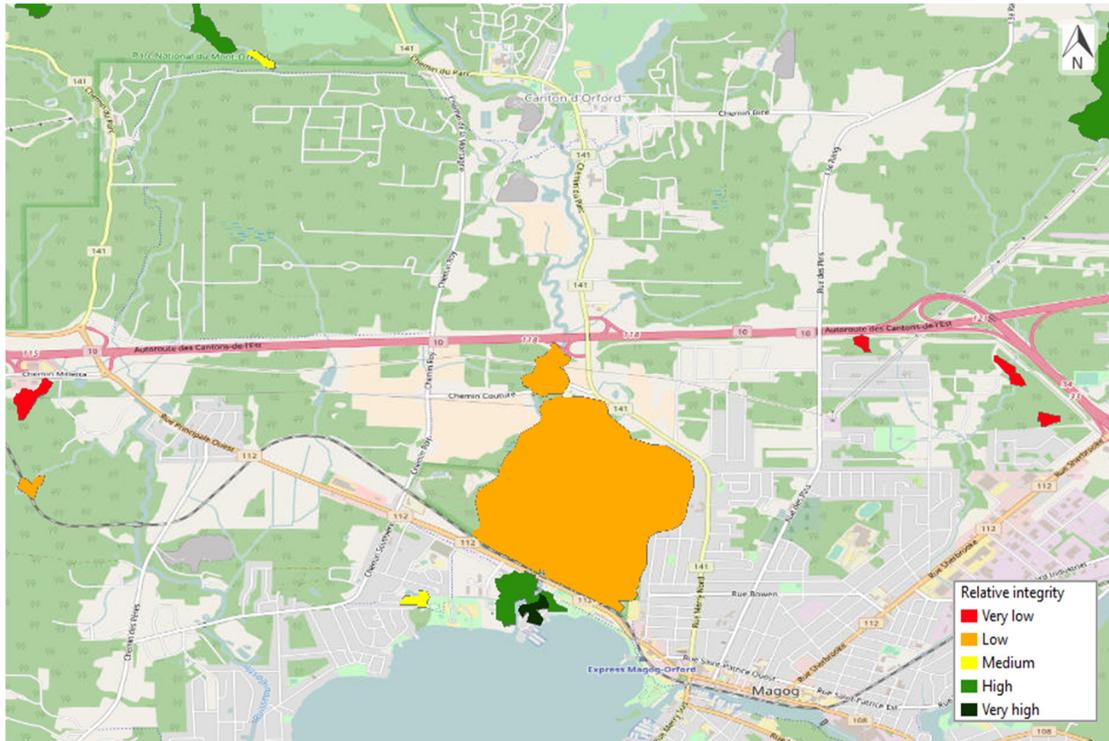


Figure 26 — Indicateur d'intégrité relative du Marais-de-la-Rivière-aux-Cerises

6.2.2.2 Comparaison entre l'indicateur et des informations d'échelle de niveau 1 et 2

Le rapport synthèse de la cartographie détaillée des milieux humides du territoire du Centre-du-Québec (Beaulieu, 2012) traite de divers résultats de leurs inventorisations, de leurs caractérisations et de l'identification des pressions anthropiques à partir d'orthophotographies et d'observations sur le terrain. La Figure 27A illustre les milieux humides subissant des pressions de la part de la culture de la canneberge, des canaux de drainage et de creusage. À l'aide des informations d'évaluation d'échelle de niveau 2 par orthophotographie (régional) et d'échelle de niveau 1 par observation sur le terrain (Local), l'impact anthropique a été classé à forte pression par Beaulieu (2012). La Figure 27B illustre l'indicateur d'intégrité relative. Ce principal milieu humide a été classé avec

une intégrité relative moyenne. L'ensemble des autres milieux humides environnants se caractérisent par une classification moyenne à très haute intégrité relative.

L'ensemble des milieux humides du secteur sont représentés par des classes d'intégrité trop élevées selon le contexte paysager. Ce secteur est affecté localement par la culture intense de la canneberge (Beaulieu, 2012); l'influence de la pondération de la classe d'entité Terre cultivée, dont la pondération est de 0,3, ne semble pas affectée adéquatement l'indicateur.

L'incohérence des valeurs de l'indicateur provient de la couche de données publiées par la Financière agricole du Québec. La Financière agricole du Québec publie l'une des bases de données de thématiques des terres agricoles, la plus juste, la plus précise, renouvelée annuellement et couvrant l'étendue du Québec. Néanmoins, les parcelles représentent exclusivement les productions agricoles de leurs clientèles. Or, les cannebergières de cette région ne font pas partie de leurs clients. Ainsi, le paysage de la région se retrouve sous-représenté en matière de perturbation issue des terres cultivées.

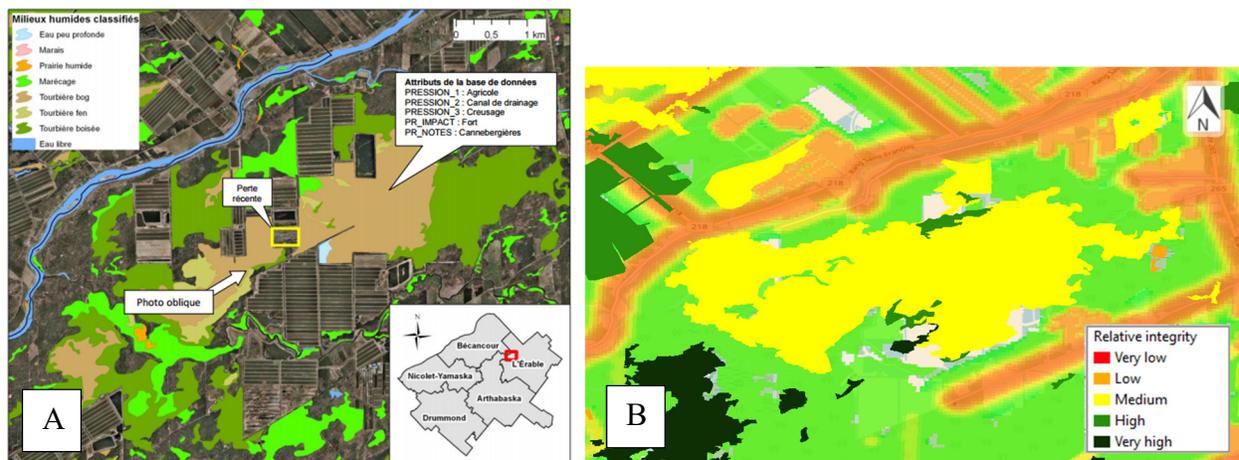


Figure 27 — Comparaison entre observations et indicateur A : Pressions anthropiques observées et documentées, extrait de Beaulieu (2012), B : Indicateur d'intégrité relative

Malgré cette sous-représentation des terres cultivées, la plupart des milieux humides possèdent une classe de Moyenne intégrité, grâce à l'influence de réseaux routiers et de la faible démographie à proximité. L'écart de classe de l'ensemble des milieux humides est ainsi diminué.

6.2.2.2 Identification de la nature de la fragmentation.

Les indicateurs de proximité, de densité ainsi que la taille se complètent pour l'évaluation de la fragmentation des milieux humides. La nature de la fragmentation peut être naturelle ou

anthropique. Malheureusement, ces trois indices de métapopulation ne peuvent donner aucune information sur la nature de la fragmentation, alors que l'indicateur d'intégrité relative le peut. En effet, la présence d'activités et d'éléments anthropiques comme l'expansion du réseau routier ou l'urbanisation affecteront négativement la valeur d'intégrité relative alors que la présence de forêt l'augmentera. Chaque zone fragmentée, dont l'agrégation spatialement est inhérente, aura un contexte d'intégrité paysagère similaire. Ainsi l'indice d'intégrité relative ressortira cette même similarité.

Par exemple, la Figure 28A illustre les milieux humides au sud de la MRC de Sherbrooke, dont les cercles regroupent visuellement les ensembles de fragments de milieux humides. La Figure 28B affiche les mêmes milieux humides classifiés selon leur valeur issue du calcul de l'indicateur d'intégrité relative. On remarque deux regroupements (Cercle vert) de milieux humides tous classifiés de haute intégrité relative. Cette valeur n'est atteignable que par une grande présence de forêt. Ainsi, la fragmentation est fort probablement naturelle. De plus, on remarque trois regroupements (Cercle rouge) de milieux humides tous classifiés de très basse intégrité relative. Ces regroupements de même intégrité relative laissent transparaître des indices sur la nature des mécanismes et des perturbations de leur contexte paysager. En effet, ces regroupements se retrouvent près de routes ou de chemins de fer et des zones urbaines, indiquant une forte probabilité de fragmentation de nature anthropique.

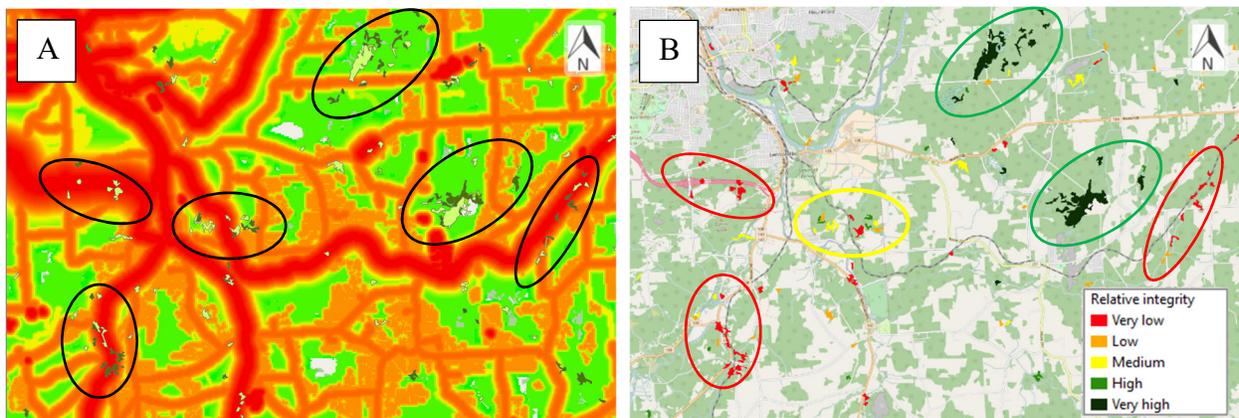


Figure 28 — Identification de la nature de la fragmentation par l'intégrité
A : Matrice d'intégrité, B : Indicateur d'intégrité

6.2.3 Intérêt des indicateurs

Les quelques exemples fournis dans les sections précédentes permettent d'illustrer l'intérêt des indicateurs implémentés. Les indicateurs permettent de mettre en relief des problématiques sur une

région. Le gestionnaire disposera d'informations supplémentaires afin d'adapter les stratégies de planification de la conservation selon les problématiques mises en relief. De plus, le gestionnaire pourra utiliser des données complémentaires pour expliquer les problèmes relevés.

6.3 Limites du système

L'état actuel du système comporte certaines limites. Elles concernent principalement la lourdeur des processus de densité, l'aspect temporel, l'influence de la vectorisation et des classes des milieux humides et les conflits de bibliothèques.

6.3.1 Lourdeur du calcul de l'indicateur de densité

Le lancement de processus de l'indicateur de la densité déclenche une suite de géotraitements particulièrement lourds. Son exécution nécessite environ 6 secondes, lorsque lancées sur la MRC de Sherbrooke qui contient 95 entités à traiter sur une étendue spatiale d'environ 600 km². Alors que la MRC Des Chenaux de la région de la Mauricie comptant 654 entités à traitées sur une étendue d'environ 2250 km² prend environs 2,5 minutes à s'exécuter. Les mêmes traitements ont été convertis, testés et évalués sur une solution privée à licence payante. Cette plateforme SIG privée sur ordinateur de bureau montre des différences négligeables dans les temps de chargement et d'exécution de traitement. Le code n'est donc pas en cause, mais bien la nature des processus. Il existe une bibliothèque, *RasterStat*, pouvant faire le travail plus rapidement; malheureusement, elle est dépendante de la bibliothèque problématique *RasterIO*. Néanmoins, il existe des solutions. Elles sont proposées dans la section recommandations.

6.3.2 Aspect temporel

Que ce soit par la métapopulation ou l'intégrité relative, l'aspect temporel reste peu exploité. L'utilisation des indicateurs de proximité ou de densité n'intègre pas l'aspect temporel. L'indicateur d'intégrité relative offre un aperçu des perturbations à proximité et laisse entrevoir des scénarios (stagnants, positifs ou négatifs) sur un ensemble de milieux humides étudiés. Par contre, il ne permet aucunement de quantifier des tangentes temporelles. Ainsi, l'aspect temporel pourrait être développé davantage.

6.3.3 Influence de la vectorisation et des classes des milieux humides

Lors de l'inventaire des milieux humides, ils sont généralement caractérisés par différentes classes comme la tourbière, le marais, le marécage, la prairie humide, etc. À l'état actuel, les indicateurs ne gèrent pas les différentes classes de milieux humides. En fait, les indicateurs de métapopulation

gèrent chaque polygone comme un milieu humide à part entière, peu importe la classe. À la Figure 29A, on remarque une grande masse classée Bog (vert pâle) ayant à l'intérieur plusieurs zones classées Prairie (vert foncé).

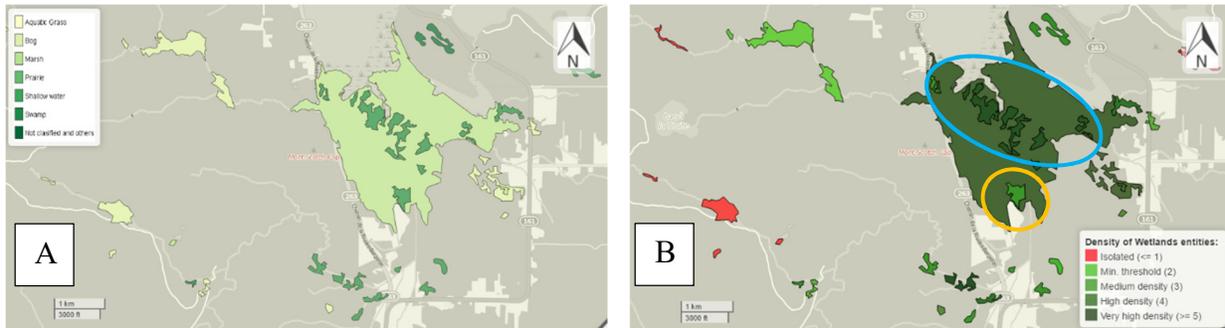


Figure 29 — Démonstration de surestimation, A : Classe des milieux humides, B : Indicateur de densité

Un milieu humide caractérisé en plusieurs classes comme celui-ci créera une surestimation et une sous-estimation dans les indicateurs. Cette surestimation apparaîtra aussi lorsque le milieu humide a été vectorisé en plusieurs morceaux, afin de former son ensemble. On peut observer sur la Figure 29B, que le résultat de l'indicateur de densité dans le cercle bleu surestime le nombre de milieux humides en comptant chaque zone comme étant un milieu humide à part entière alors qu'en réalité il s'agit de plusieurs sous-divisions du même milieu humide. De plus, dans le cas de certaines zones, une sous-estimation survient comme le démontre le cercle orange de la Figure 29B par une zone possédant une densité inférieure à celle de la masse qui l'englobe.

Ainsi, la manière dont la vectorisation a été effectuée influence le résultat des indicateurs de métapopulation.

6.3.4 Conflits de bibliothèques

Le développement de géotraitement dans *Geodjango* a mené à l'identification d'une problématique importante. L'extension *Geo* de *Django* fonctionne grâce à l'intégration de certaines bibliothèques géospatiales essentielles, tout particulièrement *GDAL*, *OSR* et *OGR*. Il s'avère que l'intégration native de ces bibliothèques n'est pas complète dans *Geodjango* et cela doit être développé dans le futur (Django Software Foundation and Individual Contributors, 2016d). Lors du développement des géotraitement des bogues majeurs survenus lors de l'utilisation de certaines bibliothèques empêchent définitivement leurs utilisations. Par exemple, l'importation de la bibliothèque *RasterIO*, basée sur *GDAL*, entre en conflit avec l'environnement de *GDAL* nativement intégré à

Geodjango lorsque l'environnement est sous Windows (GitHub, 2017). Sans être explicite sur la nature du problème, le conflit réside dans la manière dont la mémoire est utilisée lorsque l'on fait appel aux fonctions (GitHub, 2017). Une fois *RasterIO* utilisé, le *GDAL* de *Geodjango* et le *GDAL* de *RasterIO* sont en conflit et deviennent inutilisables. La conjugaison de *Geodjango* et de la librairie *RasterIO* n'a pas été prévue par les auteurs de la librairie *RasterIO* et ils n'auraient pas pris les précautions nécessaires (GitHub, 2017).

Un environnement de développement sous le système d'exploitation (OS) Linux aurait le potentiel de résoudre cette problématique, car les librairies Python ne nécessiteraient plus de compilation complexe qu'exige l'OS Windows.

Néanmoins, suite à ces expériences, on remarque une très faible disponibilité du support spécifiquement aux problèmes de manipulation de géotraitements personnalisés sur *Geodjango*. Le nombre de développeurs dans ce domaine spécifique est très faible, la littérature récente l'est tout aussi.

7. Conclusion

Les objectifs principaux de ce projet étaient de faire évoluer une plateforme existante en mettant en place des géotraitements accessibles au niveau du Web tout en respectant les technologies Code ouvert. Les résultats présentés démontrent que les objectifs ont été atteints et que les indicateurs proposés sous la forme de géotraitements apportent des informations très utiles aux gestionnaires.

Le système possède les capacités de gestion de données hétérogènes provenant de différentes sources. Il possède des facultés d'adaptation à différentes données pouvant être disséminées chez différents pourvoyeurs de données.

La solution proposée repose sur la mise en place d'outils d'aide à la décision permettant la conservation des milieux humides et des espèces grâce à l'intégration des indicateurs de métapopulation et d'intégrité relative.

Les indicateurs de métapopulation permettent de définir l'arrangement spatial d'un ensemble de milieux humides et d'évaluer s'il est favorable ou non à la métapopulation. Grâce aux indicateurs de proximité et de densité, le gestionnaire œuvrant à la conservation de la biodiversité peut analyser la résilience naturelle des milieux humides et des espèces qui en dépendent face aux perturbations extérieures. Néanmoins, une surestimation et une sous-estimation peuvent survenir et le gestionnaire doit en être conscient.

Grâce à la compilation des stress induits par l'ensemble des agents perturbateurs de la matrice d'intégrité, l'indicateur d'intégrité relative est apte à offrir des indices sur l'état de santé, plus spécifiquement sur l'intégrité écologique du milieu. Le gestionnaire est en mesure d'avoir une mesure relative de la pression anthropique et d'identifier la nature de la fragmentation des milieux humides. Le bon fonctionnement de cet indicateur dépend grandement de la représentation des classes d'entités lors de la création de la matrice d'intégrité. Les couches de données doivent être complètes, à jour et représenter la réalité autant que faire se peut.

En combinant le niveau de résilience et le niveau de perturbation, il devient plus simple de discerner les ensembles de milieux humides nécessitant des interventions et de les prioriser en fonction de l'écart qu'il y a entre ces deux niveaux.

Enfin, le gestionnaire dispose d'informations additionnelles permettant de mieux aborder la problématique de la conservation des milieux humides et de la biodiversité, d'adapter les stratégies selon les régions et de mieux diriger les efforts des intervenants par une identification et une priorisation des secteurs problématiques.

8. Recommandations et perspectives

8.1 Optimisation des processus

Pour pallier les longs délais d'exécution, une solution envisageable se retrouve dans l'optimisation basée sur le multiprocesseur. Les géotraitements les plus lourds pourraient être parallélisés afin d'augmenter l'efficacité de leur exécution. Il faudrait faire un travail de recherche sur ce point.

8.2 Ajout d'un portrait synthétique des indicateurs

Un portrait synthétique des indicateurs pourrait faire l'objet d'un ajout substantiel pour l'aide à la décision. Ce portrait pourrait être produit à l'aide d'une transformation de la donnée spatiale en informations graphiques agrégées sous forme de graphique à bulles, et introduit à l'interface comme un tableau de bord. La Figure 30 représente en A une sélection de milieux d'intérêt et en B un portrait synthétique des indicateurs de ces milieux humides sélectionnés dans la MRC.

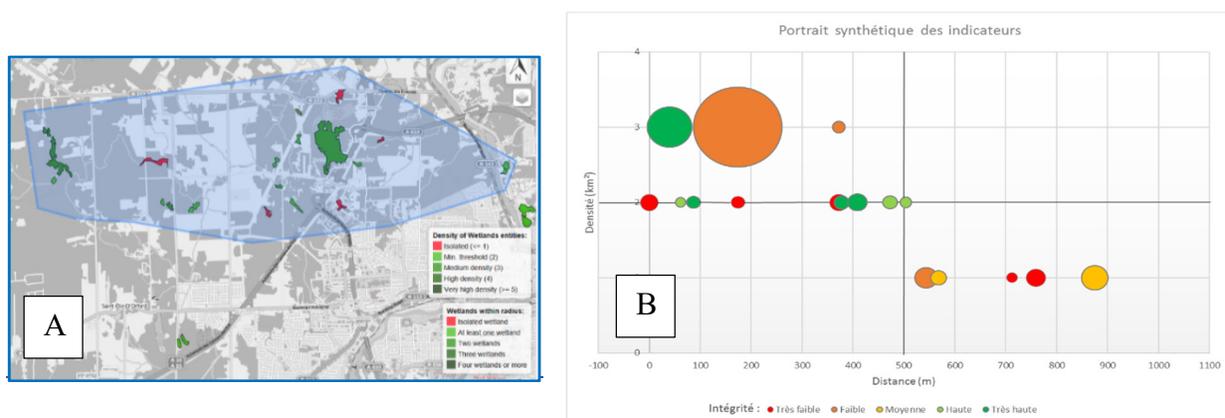


Figure 30 — Portrait synthétique des indicateurs, A : Sélection de milieux d'intérêt, B : Portrait synthétique issu de la sélection

Le principe serait de représenter pour chaque milieu humide l'indice de proximité sur l'axe des X, l'indice de densité sur l'axe des Y et la taille du milieu sous la forme de bulles.

La couleur indique la classe de l'indicateur d'intégrité relative. Chaque milieu humide serait caractérisé en fonction de son positionnement dans le graphique par rapport aux quadrants délimités par les seuils minimaux. Le dynamisme entre la carte et le graphique du portrait serait souhaitable et augmenterait l'interactivité de l'utilisateur. L'interprétation de la position de la bulle dans le diagramme permettrait de souligner la priorité des actions sur le terrain. Ce développement pourrait être envisagé dans la poursuite du projet.

8.3 Division spatiale par le Cadre écologique de référence du Québec

Le volet multiéchelle basé sur les limites administratives demeure une délimitation anthropique artificielle qui n'a que peu à voir avec le paysage naturel. Il pourrait être remplacé par la cadre écologique de référence du Québec (CERQ) qui se veut déjà un outil de cartographie et de classification écologique spatiale. Le CERQ délimite le territoire en unités spatiales en considérant la morphologie terrain, le réseau hydrographique et l'assemblage spatial. Ils possèdent un système hiérarchique à plusieurs niveaux de perception, donc multiéchelle, grâce à des tables relationnelles prédéfinies, voir Figure 31.

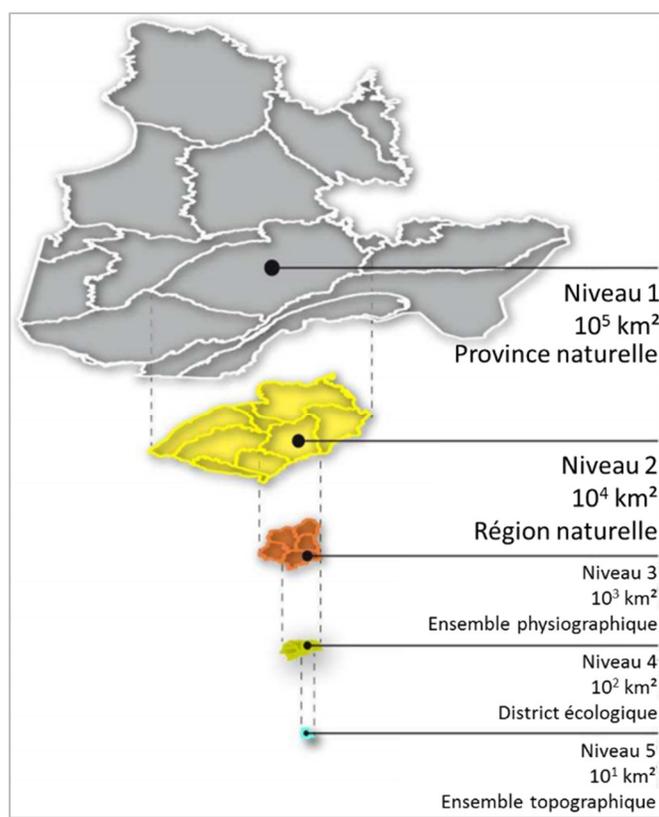


Figure 31 — Niveaux de perception du cadre écologique de référence du Québec, modifié de MDDEFP (2013)

8.4 Exploitation des outils puissants de PySAL

Selon les critères de base de la statistique, l'utilisation des divisions du Cadre écologique de référence du Québec offrirait un nombre suffisant de polygones hétérogène et contigus pour l'utilisation de PySAL. De plus, les attributs calculés par les indicateurs de ce projet pourraient être utilisés conjointement comme un nuage de points avec cette librairie. Ces deux éléments pourraient

permettre l'utilisation des outils de cette puissante librairie comme l'analyse d'autocorrélation spatiale (étude de la dispersion et de l'agrégation des milieux humides) ou l'indice d'«*Anselin Local Moran's I*», et ce à n'importe quel niveau de perception.

Ainsi, davantage d'informations pourraient être extraites du contexte paysager par géostatistique et par généralisation spatiale pour une meilleure orientation de la conservation des milieux humides.

8.5 Création automatisée de la matrice d'intégrité et aspect temporel

À l'heure actuelle, la matrice d'intégrité se construit par une opérationnalisation de géotraitements à l'aide de données téléchargées manuellement. Cette séquence pourrait être opérationnalisée à même *Geodjango* tout en allant chercher les couches de données par WFS chez les différents pourvoyeurs de données. Une mise à jour répétée et automatisée de cette matrice à un intervalle hebdomadaire ou mensuel permettrait d'obtenir suffisamment d'informations datées pour élaborer un indicateur représentant l'aspect temporel de l'intégrité relative. Ainsi, il serait possible de mettre l'accent sur les tendances temporelles de l'intégrité des milieux humides.

8.6 Ajout d'indicateurs de connectivité hydrologique relative

La condition des milieux humides dépend beaucoup de l'apport en eau. Alors, afin de compléter les géotraitements déjà implémentés dans le système, une approche basée sur l'analyse morphologique des motifs spatiaux sur les milieux humides et les réseaux hydrologiques pourrait être intéressante. Elle a été mise de l'avant dans un rapport de la Commission Européenne (European Commission, 2017). Cette approche produirait une structure représentant la connectivité des milieux humides, incluant un certain degré de connectivité hydrologique similaire à la Figure 32.

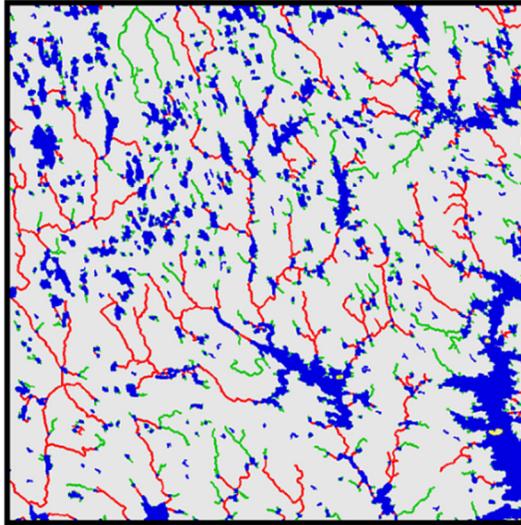


Figure 32 — Détection des structures de connexion hydrologique par analyse morphologique des motifs spatiaux

8.7 Analyse pour une future mise à jour de l'API cartographique

La mise à jour des technologies est la clé du succès pour une application efficace et pérenne. Le développement de l'interface du prototype SIG Web est basé sur l'API *Leaflet* version 0.7 datant de 2013. Les autres versions de *Leaflet* ne sont pas rétro-compatibles avec cette dernière. Ainsi, elle ne peut être mise à jour sans modifications majeures. Depuis septembre 2015, aucune nouvelle fonctionnalité n'a été mise en œuvre pour la version 0.7 (Vladimir, 2017a). Ainsi, la plupart des extensions nécessitent la version 1.0 publiée en septembre 2016. La version 1.03 la plus récente a été publiée en janvier 2017 (Vladimir, 2017b). Il devient de plus en plus difficile de trouver des extensions compatibles.

Une mise à jour serait à prévoir avant tout autre développement. Une analyse des nouvelles versions d'API faciliterait ce choix technologique. En plus, de la version 1.03 de *Leaflet*, la nouvelle mouture de l'API *Openlayers*, publiée en février 2017 (Hocevar, 2017), pourrait être considérée dans une évolution du projet. Cette version 4 d'*Openlayers* offre de nouveaux moyens de développement simplifiés et contient nombreuses fonctionnalités additionnelles.

8.8 Pérennité incertaine de *Geodjango*

L'extension *Geo* de *Django* 1.10 utilise des bibliothèques en Python 2.7. Or, *Django* 2.0 prévue pour la fin 2017 terminera tout support avec Python 2.7 et n'utilisera que les versions supérieures à 3.5. Actuellement, aucune documentation ne stipule l'état de l'avancement du développement de

l'extension *Geo* pour *Django 2.0*. L'imposante communauté d'utilisateurs et le nombre de développeurs impliqués dans le développement devraient permettre à la plateforme d'exister. Mais à l'heure actuelle, sans aucune confirmation, la pérennité de l'extension *Geo* pour *Django 2.0* reste incertaine, alors que le cycle de vie de la version 1.10 se termine en décembre 2017.

8.9 Environnement Linux

Tout le développement de ce projet a été exécuté sous le système d'exploitation Windows. Il permet une grande convivialité et une simplicité intéressante pour les géomaticiens, thématiciens et autres utilisateurs de technologies de l'information. Par contre, dans le domaine du développement et de la programmation, un environnement Linux présente un avantage considérable comparativement à Windows. Cet avantage réside principalement dans la création simplifiée d'un environnement de développement virtuel plus stable et plus compatible à de nombreuses bibliothèques python. Lorsqu'utilisées avec Windows, plusieurs bibliothèques Python écrites en langage C nécessitent des procédures de compilation complexe. Dans certains cas, la stabilité et l'efficacité de l'architecture en sont affectées. L'utilisation de Linux permettrait de contourner les procédures hasardeuses de compilation complexe et pourrait potentiellement régler le problème de compatibilité de bibliothèques rencontrée. Actuellement, toutes les composantes de l'architecture supportent déjà l'environnement Linux.

9. Bibliographie

Akçakaya, H.R. *et al.* (2007) The role of metapopulations in conservation. *Macdonald/Key Topics in Conservation Biology*, 64-84

Ball, I.R. *et al.* (2000) MARXAN (V1.8.2): Marine Reserve Design Using Spatially Explicit Annealing, a Manual, 70 p.

Ballatore, A. *et al.* (2011) A comparison of open source geospatial technologies for Web mapping. *International Journal of Web Engineering and Technology*, vol. 6, n° 4, 354–374

Beaulieu, J. *et al.* (2012) Cartographie détaillée des milieux humides du territoire du Centre-du-Québec, Rapport synthèse, Canards Illimités, Bureau du Québec et le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Direction du patrimoine écologique et des parcs, 44 p.

Boucher, P. (2013) Une stratégie de conservation axée sur la connectivité pour les Laurentides au Québec, Essais de l'Université de Sherbrooke, Centre Universitaire de Formation en Environnement, 87 p.

Burel, F. *et al.* (1999) *Écologie du paysage : concepts, méthodes et applications*, Paris-Lavoisier, Technique et documentation, 359 p.

Bryan G. (2014) Southern Shield conservation planning concepts, Presentation september 26, Bracebridge, Ontario, 54 p.

Butler, *et al.* (2016) The GeoJSON Format, Standards Track, Internet Engineering Task Force, 28 p.

Comer P. *et al.* (2013) Assessing Ecological Integrity of Wetlands From National to Local Scales: Exploring the Predictive Power, and Limitations, of Spatial Models, *National Wetlands Newsletter*, vol. 35, n°3, 20-22

Conseil nord-américain de conservation des terres humides Canada (1999) *Terres humides et le gouvernement, Politique et législation concernant la conservation des terres humides au Canada*, Communication n. 1, 67 p.

Cosentino, B. *et al.* (2010) Wetland hydrology, area, and isolation influence occupancy and spatial turnover of the painted turtle, *Chrysemys picta*, *Landscape Ecology* (2010) Vol. 25, 1589–1600

Cumming, G. S. (2011) *Spatial resilience in social-ecological systems*, Springer, 254 p.

Deane, D.C. *et al.* (2017) Future extinction risk of wetland plants is higher from individual patch loss than total area reduction, *Biological Conservation* Vol. 209, 27-33

Delavenne J. *et al.* (2011) Systematic conservation planning in the eastern English Channel: comparing the Marxan and Zonation decision-support tools, *ICES Journal of Marine Science* December 2011, vol. 69, n°1, 75-83

Divay, G. (2008). « L'émergence du gestionnaire local, dans B. Mazouz, *Le métier de gestionnaire public à l'aube de la gestion par les résultats*, p.333-360.

Django Software Foundation and individual contributors (2017a) Django 1.10 documentation, <https://docs.djangoproject.com/fr/1.10/>

Django Software Foundation and individual contributors (2017b) GeoDjango 1.10 Database API, <https://docs.djangoproject.com/fr/1.10/ref/contrib/gis/db-api/#compatibility-tables>

Django Software Foundation and individual contributors (2017c) GeoDjango Dev Documentation, Django 2.0 release notes - Under development, <https://docs.djangoproject.com/en/dev/releases/2.0/>

Django Software Foundation and individual contributors (2017d) GeoDjango 1.10 Documentation, GeoDjango, <https://docs.djangoproject.com/fr/1.10/ref/contrib/gis/>

Environnement Canada (2013) Quand l'habitat est-il suffisant ? Troisième édition, environnement Canada, 138 p.

Eppler, M. J. (2011) A Framework for Information Overload Research in Organizations -- Insights from Organization Science, Accounting, Marketing, MIS, and Related Disciplines.

European Commission (2017) The European Commission, science and knowledge service, MSPA (Morphological Spatial Pattern Analysis), <http://forest.jrc.ec.europa.eu/download/software/guidos/mspa/>

Erwin, K. L. (2008) Wetlands and global climate change: the role of wetland restoration in a changing world, *Wetlands Ecology and Management*, vol. 17, 71-84

Faber-Langendoen, D., *et al.* (2012a) Assessment of wetland ecosystem condition across landscape regions : A multi-metric approach. Part A. Ecological Integrity Assessment overview and field study in Michigan and Indiana. EPA/600/R-12/021a. U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development, Washington, DC.

Faber-Langendoen, D. (2012b) Assessment of wetland ecosystem condition across landscape regions : A multi-metric approach. Part B. Ecological Integrity Assessment protocols for rapid field methods (L2). EPA/600/R-12/021b. U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development, Washington, DC.

Falcone, A.J. *et al.* (2010) Quantifying human disturbance in watersheds: Variable selection and performance of a GIS-based disturbance index for predicting the biological condition of perennial streams, *Ecological Indicators* Vol. 10, 264-273

Fryxell, J. M. *et al.* (2014) *Wildlife ecology, conservation, and management*, Chichester, West Sussex, UK : Wiley Blackwell, 528 p.

GeoServer (2017a) GeoServer User Manual, Python, <http://docs.geoserver.org/2.2.3/user/community/python/index.html>

Geoserver (2017b) GeoServer 2.11.x User Manual, Web Processing Service (WPS), Installing the WPS extension, <http://docs.geoserver.org/latest/en/user/services/wps/install.html>

Gibbs, J. P. (2000) Wetland Loss and Biodiversity Conservation, *Conservation Biology*, vol. 14, 314–317.

- Gillies S. (2016) The Fiona User Manual, Fiona 1.7.0.post2 documentation, <http://toblerity.org/fiona/manual.html>
- GitHub (2017) Issues, Importing rasterio leads to OGR Failure in GeoDjango, <https://github.com/mapbox/rasterio/issues/888>
- Gouvernement du Canada (1991) The Federal Policy on Wetland Conservation, Minister of Environment. 13 p.
- Guay J.F. *et al.* (2010) Revue critique de trois outils de modélisation intégrée du territoire et de l'environnement pour la planification en Amérique du nord, Développement durable et territoires, Vol. 1, n ° 2, 18 p.
- Guay, J.F. (2015) Contributions méthodologiques à la modélisation intégrée pour la planification du territoire et de l'environnement (Thèse de doctorat, non publiée), Université du Québec à Montréal, Institut des Sciences de l'environnement. UQAM, 319 p.
- Hamer, A.J. *et al.* (2016) Road density and wetland context alter population structure of a freshwater turtle, *Austral Ecology* Vol. 41, 53–64
- Hanson, A. (2008) Wetland Ecological Functions Assessment: An Overview of Approaches, Canadian Wildlife Service Technical Report Series, No. 497, 59 pp
- Herring, J. R. (2010). OpenGIS implementation specification for geographic information – Simple feature access – Part 2: SQL option. Open Geospatial Consortium.
- Herring, J. R. (2011). OpenGIS implementation specification for geographic information – Simple feature access – Part 1: Common architecture. Open Geospatial Consortium.
- Hocevar, A. (2017) Openlayers Github Repository, Openlayers, v4.0.0, <https://github.com/openlayers/openlayers/releases/>
- Holling, C.S. (1973) Resilience and stability of ecological systems, *Annual Review of Ecology and Systematics*, Vol. 4, 1-23
- Holovaty, A. *et al.* (2009) Definitive Guide to Django: Web Development Done Right, <http://djangobook.com>
- Institut de la statistique du Québec (2017a) Statistiques et publications, Population et démographie, Estimation de la population des municipalités du Québec, http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/population-demographie/structure/mun_15000.htm
- Institut de la statistique du Québec (2017b) Statistiques et publications, Population et démographie, Estimation de la population des régions administratives, http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/population-demographie/structure/ra_total.htm
- Internet Engineering Task Force (2017) Geographic JSON (geojson), About, <https://datatracker.ietf.org/wg/geojson/charter/>
- Jean M. *et al.* (2011) Changements dans les milieux humides du fleuve Saint-Laurent de 1970 à 2002. Rapport technique n 511, Environnement Canada, Direction générale des sciences et de la technologie, Monitoring et surveillance de la qualité de l'eau au Québec, 302 p.

Joly, M. *et al.* (2008) Guide d'élaboration d'un plan de conservation des milieux humides, Première édition, Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Direction du patrimoine écologique et des parcs, 68 p.

LAMRAC (2017) Le marais de la Rivière aux Cerises, Environnement : Particularité anthropique, <https://maraisauxcerises.com/lamrac/environnement/particularite-anthropique.php>

Langlois G. (2008) Plan d'actions visant à limiter et diminuer la prolifération des cyanobactéries dans le lac Memphrémagog, Essai, Université de Sherbrooke, 121 p.

Lehtomäki J. *et al.* (2016) Running a Zonation planning project, C-BIG, The Biodiversity Informatics Conservation Group, University of Helsinki, 60 p.

Lorant M. *et al.* (2013) Développez votre site Web avec le framework Django, Siteduzero, 204 p.

Lynch-Steward P. *et al.* (1996) The Federal Policy on Wetland conservation Implementation Guide for Federal Land Managers, Wildlife Conservation Branch, Canadian Wildlife Service, Environment Canada, 33 p.

Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (2013) Guide d'utilisation du Cadre écologique de référence du Québec (CERQ), Direction du patrimoine écologique et des parcs, 19 p.

Melé A. (2015) Django By Example, Packt, 474 p.

Mitsch, W.J. (2000) The value of wetlands: importance of scale and landscape setting, Ecological Economics, Vol. 35, 25-33

Moilanen, A. *et al.* (2005). Prioritizing multiple-use landscapes for conservation : methods for large multi-species planning problems. Proceeding of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences, vol. 272, n° 1575, p. 1885-1891.

Ontario Ministry of Natural Resources (2012) Natural Heritage assessment guide, Ontario Ministry of Natural Ressources, second edition, 109 p.

OpenGeo Suite (2017a) OpenGeo Suite User Manual, Creating WPS processes with Java, <http://suite.opengeo.org/docs/latest/processing/wpsjava/index.html>

OpenGeo Suite (2017c) OpenGeo Suite User Manual, Executing processes using WPS Builder, <http://suite.opengeo.org/opengeo-docs/processing/wpsbuilder/index.html>

OpenGeo Suite (2017 b) GeoServer User Manual, WPS Processes, <http://suite.opengeo.org/docs/latest/geoserver/extensions/wps/processes.html>

OpenGeo Suite (2017c) OpenGeo Suite User Manual, Scripting, <http://suite.opengeo.org/opengeo-docs/processing/scripting/processcreate.html>

Open Source Geospatial Foundation (2017) GeoServer User Manual, PostGIS, <http://docs.geoserver.org/stable/en/user/data/database/postgis.html>

Oracle Corporation (2017) MySQL 5.7 Reference Manual, Functions That Test Spatial Relations Between Geometry Objects, <https://dev.mysql.com/doc/refman/5.7/en/spatial-relation-functions.html>

- Oracle (2017) Ressources d'aide, En quoi le langage JavaScript est-il différent de Java ?, https://www.java.com/fr/download/faq/java_javascript.xml
- OSGeo (2014), WMS Benchmarking 2011, Cadcorp GeognoSIS, Constellation-SDI, GeoServer, Mapnik, MapServer, QGIS Server, Open Source Geospatial Foundation, 30 p.
- Pedroni S. *et al.* (2002) Jython Essentials, Rapid Scripting in Java, O'Reilly Media, 302 p.
- Pellerin S. (2013) Analyse de la situation des milieux humides au Québec et recommandations à des fins de conservation et de gestion durable, Rapport Final, Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, 78 p.
- Pornon, H. (2011) SIG : la dimension géographique du système d'information. InfoPro. Management des systèmes d'information, Paris, Dunod, 271 p.
- PostGIS Project Steering Committee (2017), PostGIS, Spatial and Geographic objects for PostgreSQL, <http://postgis.net/features/>
- Python Software Foundation (2017a) Python, PyPI the Python Package Index, <https://pypi.python.org/pypi>
- Python Software Foundation (2017 b) Python, Applications for Python, <https://www.python.org/about/apps/>
- PyWPS Development Team (2017a) Welcome to the PyWPS 4.0.0, Documentation, <http://pywps.readthedocs.io/en/latest/>
- PyWPS Development Team (2017b) Welcome to the PyWPS 4.0.0, Installation, <http://pywps.readthedocs.io/en/latest/install.html>
- Quesnelle P.E. *et al.* (2015) Relative effects of landscape-scale wetland amount and landscape matrix quality on wetland vertebrates: a meta-analysis, Ecological Applications, vol. 25, n° 3, 812–825
- Queste, C. (2011) Les milieux humides dans le sud du Québec : entre destruction et protection. Analyse critique et élaboration d'une stratégie de conservation. Rapport de stage présenté à Nature Québec, à l'Université du Littoral Côte d'Opale, et à l'Université des Sciences et Technologies de Lille 1, Nature Québec, 44 p.
- Ronald E.J. (2016) Manual TerrSet Geospatial Monitoring and Modeling System, Clark University, 391 p.
- Roth, R. E. *et al.* (2008) Web-based geovisualization and geocollaboration: Applications to public health, 4 p.
- Roth, R. E. *et al.* (2014) A Process for Keeping Pace with Evolving Web Mapping Technologies, Cartographic Perspectives, Number 78, 28p.
- Salt D. *et al.* (2006) Resilience thinking: Sustaining, Ecosystems and people in a changing world, Island Press, Washington, D.C., USA

- Schaeffer, B. *et al.* (2012) A Service-Oriented Framework for Real-Time and Distributed Geoprocessing. Geospatial Free and Open Source Software in the 21st Century: Proceedings of the first Open Source Geospatial Research Symposium, 3-20.
- Schooley, R. L. *et al.* (2016) Metapopulation Dynamics of Wetland Species, The Wetland Book: I: Structure and Function, Management and Methods, 1-7
- Sodhi, N. (2009) Causes and consequences of species extinctions, The Princeton Guide to Ecology, Princeton University Press, 514-520
- Steiniger S. *et al.* (2013) The 2012 free and open source GIS software map - A guide to facilitate research, development, and adoption, Computers, Environment and Urban Systems, Volume 39, 136-150.
- Steinke, V. A. *et al.* (2013) Priority wetlands for conservation of waterbird's diversity in the Mirim lagoon catchment area (Brazil-Uruguay), Pan-American Journal of Aquatic Sciences (2013), Vol. 8, n° 4, 221-239
- Swain N. R. *et al.* (2015) A review of open source software solutions for developing water resources web applications, Environmental Modelling & Software, Volume 67, May 2015, Pages 108-117
- Tardy, G. *et al.* (2006) Le complexe tourbeux du delta de Lanoraie : État de situation en 2005, Rapport déposé au Ministère du Développement durable de l'Environnement et des Parcs du Québec, Direction du patrimoine écologique et du développement durable, 65 p.
- The jQuery Foundation (2017a) jQuery Learning Center, Ajax, <http://learn.jquery.com/ajax/>
- The jQuery Foundation (2017b) jQuery user interface, jQuery UI 1.12 API Documentation, <http://api.jqueryui.com>
- Uden D.R. (2014) The role of reserves and anthropogenic habitats for functional connectivity and resilience of ephemeral wetlands, Ecological Applications, Vol. 24, n°7, 1569–1582
- University of Helsinki, (2017) Metapopulation Research Centre combining Ecological, Molecular, Computational and Theoretical Research, SOFTWARE : Zonation, <https://www.helsinki.fi/en/researchgroups/metapopulation-research-centre/software#section-14300>
- Union des producteurs agricoles (2017) L'agriculture au Québec, L'agriculture en chiffres, <https://www.upa.qc.ca/fr/statistiques/>
- Vladimir A. (2017a) an open-source JavaScript library for mobile-friendly interactive maps, Leaflet 0.7.5 Release, <http://leafletjs.com/2015/09/01/leaflet-0.7.4-released.html>
- Vladimir A. (2017 b) an open-source JavaScript library for mobile-friendly interactive maps, Leaflet Developer Blog, <http://leafletjs.com/blog.html>
- Watts, M. *et al.* (2008) Marxan with Zones (V1.0.1): Conservation Zoning using Spatially Explicit Annealing, a Manual, 41 p.
- Watts, M. (2009) Marxan with Zones: Software for optimal conservation based land- and sea-use zoning, Environmental Modelling & Software, Vol. 24, n.12, December 2009, Pages 1513–1521

Wintle, B.A. (2008) A review of biodiversity investment prioritization tools. A report to the Biodiversity Expert Working Group toward the development of the Investment Framework for Environmental Resources, 24 p.