



HAL
open science

Contributions de la géomatique à l'étude et la gestion des environnements marins

Rodolphe Devillers

► **To cite this version:**

Rodolphe Devillers. Contributions de la géomatique à l'étude et la gestion des environnements marins. Géographie. Paris Est, 2020. tel-04369024

HAL Id: tel-04369024

<https://hal.science/tel-04369024>

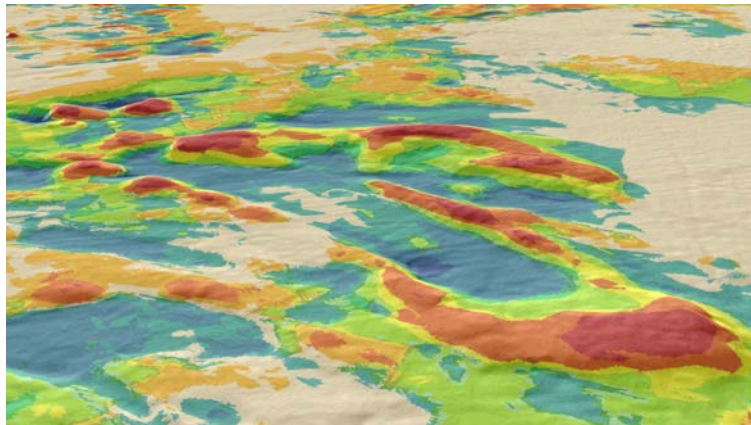
Submitted on 2 Jan 2024

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

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

CONTRIBUTIONS DE LA GEOMATIQUE A L'ÉTUDE ET LA GESTION DES ENVIRONNEMENTS MARINS

Synthèse de travaux de recherche présentée en vue d'obtenir
l'habilitation à diriger des recherches par l'université Paris-Est,
spécialité « Sciences de l'Information Géographique »



RODOLPHE DEVILLERS

Institut de Recherche pour le Développement (IRD)

UMR Espace-Dev

Présentée le 8 juin 2020 devant le jury composé de :

- Mme Sidonie CHRISTOPHE, *Rapporteur, Directeur de Recherche, IGN*
- M. Christophe CLARAMUNT, *Rapporteur, Professeur, Institut de Recherche de l'Ecole navale*
- M. Christophe DELACOURT, *Rapporteur, Professeur, U. de Bretagne Occidentale*
- Mme Françoise GOURMELON, *Examineur, Directeur de Recherche, CNRS*
- M. Guillaume TOUYA, *Examineur et Président du jury, Directeur de Recherche, IGN*

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	II
1 INTRODUCTION	1
1.1 AVANT-PROPOS	1
1.2 APERÇU DES CONTRIBUTIONS A LA RECHERCHE	1
1.2.1 QUALITE DES DONNEES GEOGRAPHIQUES	2
1.2.2 GEOMATIQUE MARINE	4
1.2.3 CONCLUSIONS	9
1.3 REFERENCES	9
2 GEOVISUAL ANALYTICS OF MARINE DATA	13
2.1 INTRODUCTION	13
2.2 MARINE GEOVISUAL ANALYTICS IN SUPPORT OF FISHERIES ENFORCEMENT	13
2.2.1 CONTEXT	13
2.2.2 APPROACH AND CONTRIBUTIONS	15
2.3 SPATIO-TEMPORAL ZOOM AND PAN INTERFACE IN MULTI-TOUCH ENVIRONMENTS	18
2.3.1 CONTEXT	18
2.3.2 APPROACH AND CONTRIBUTIONS	19
2.4 REFERENCES	25
3 MARINE GEOMORPHOMETRY	27
3.1 INTRODUCTION	27
3.2 TOWARDS A FRAMEWORK FOR TERRAIN ATTRIBUTE SELECTION IN ENVIRONMENTAL STUDIES	28
3.2.1 CONTEXT	28
3.2.2 APPROACH AND CONTRIBUTIONS	29
3.3 COMPARING SELECTIONS OF ENVIRONMENTAL VARIABLES FOR ECOLOGICAL STUDIES	33
3.3.1 CONTEXT	33
3.3.2 APPROACH AND CONTRIBUTIONS	33
3.4 REFERENCES	38
4 CROWDSOURCING OF MARINE DATA	41
4.1 CROWDSOURCED REGIONAL BATHYMETRY	41
4.1.1 CONTEXT	41
4.1.2 APPROACH AND CONTRIBUTIONS	42
4.2 REFERENCES	50
5 SYNTHESE ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE	53
5.1 SYNTHESE	53
5.1.1 GEOVISUALISATION DE DONNEES MARINES	53

5.1.2	GEOMORPHOMETRIE MARINE	54
5.1.3	UTILISATION DE DONNEES GEOGRAPHIQUES VOLONTAIRES POUR LA CREATION DE DONNEES BATHYMETRIQUES REGIONALES	55
5.1.4	META-SYNTHESE	56
5.2	QUI SUIS-JE, OU VAIS-JE, DANS QUEL ETAT J'ERE ? – PERSPECTIVES DE RECHERCHE	56
5.2.1	GEOMATIQUE MARINE ET COTIERE ET SCIENCES PARTICIPATIVES	56
5.2.2	HABITATS MARINS : DU MACRO AU MICRO	57
5.2.3	CONSERVATION MARINE : VERS UN MEILLEUR EQUILIBRE	59
6	ÉLÉMENTS DE CV	61
6.1	RENSEIGNEMENTS PERSONNELS	61
6.1.1	ÉDUCATION	61
6.1.2	ACTIVITES PROFESSIONNELLES	61
6.1.3	POSTES DE PROFESSEUR ASSOCIE	62
6.2	ACTIVITES D'ENCADREMENT DE LA RECHERCHE ET D'ENSEIGNEMENT	62
6.2.1	SUPERVISION D'ETUDIANTS	62
6.2.2	SUPERVISION D'ASSISTANTS DE RECHERCHE	65
6.2.3	SUPERVISION D'INGENIEURS DE RECHERCHE	66
6.3	ADMINISTRATION ET ANIMATION DE LA RECHERCHE	66
6.3.1	DIRECTION DE PROJETS DE RECHERCHE (2006-2020)	67
6.4	ÉVALUATION DE LA RECHERCHE	70
6.4.1	JURY DE THESES ET MEMOIRES	70
6.5	PRODUCTION SCIENTIFIQUE	71
6.5.1	LIVRES / VOLUMES EDITES / MONOGRAPHIE	71
6.5.2	CHAPITRES DE LIVRE	71
6.5.3	ARTICLES DANS DES REVUES AVEC COMITE DE LECTURE	73
6.6	AUTRES PUBLICATIONS AVEC COMITE DE LECTURE	76
7	BIBLIOGRAPHIE	85

1 INTRODUCTION

1.1 AVANT-PROPOS

Ma carrière en recherche a débuté il y a 22 ans avec ma première publication dans une revue à comité de lecture. Ayant étudié en sciences de la terre (1997-1999) puis en géomatique (1999-2004), avant de faire une carrière de 14 ans en tant qu'enseignant-chercheur dans un département de géographie au Canada (2005-2019), mes intérêts de recherche ont évolués et sont aussi assez large.

Ce mémoire d'habilitation à diriger des recherches ne vise pas à décrire en détail l'ensemble de mes contributions à la recherche mais à sélectionner certains thèmes spécifiques, fournissant une vision plus synthétique de certains axes de recherche ayant émergés dans le cadre de ma carrière.

Je présente, dans ce premier chapitre, un aperçu de haut niveau de l'ensemble de mes travaux principaux depuis 1998, incluant des informations sur des thèmes de recherche qui ne sont pas repris dans le reste du mémoire. Les chapitres 2 à 4 fournissent un aperçu de contributions de recherche organisé selon trois axes de recherche sélectionnés autour d'apports de ma recherche au domaine de la géomatique marine : l'apport de la géovisualisation à l'analyse de données de mouvement de bateaux de pêche, la conception d'un cadre général d'étude en géomorphométrie marine pour l'analyse de modèles numériques de terrain marins, et finalement l'apport de données collectées par des bateaux de pêche à la création de données bathymétriques régionales de qualité. Le chapitre 5 présente des perspectives de recherche pouvant être explorées dans ma nouvelle carrière de Directeur de recherches à l'IRD. Finalement, le chapitre 6 du mémoire introduit le lecteur à mon profil plus général, fournissant des éléments de mon CV qui illustrent mes contributions à la recherche (p.ex. publications) et à la direction de travaux de recherche (p.ex. direction de projets, d'étudiants).

1.2 APERÇU DES CONTRIBUTIONS A LA RECHERCHE

Mes activités de recherche ont débuté lors de mon master (maîtrise de recherche) en sciences de la terre effectué à l'Université du Québec à Montréal (1997-1999) et ont évolué avec les années pour s'étendre de recherche fondamentale à de la recherche appliquée dans un ensemble de thèmes reliés à l'étude de l'environnement physique. Pendant les vingt dernières années de recherche, *deux axes principaux* ressortent, qui sont pendant longtemps restés distincts et ont convergé récemment : les questions de *qualité des données géographiques* et la *géomatique marine*. Le premier axe de recherche s'est développé lors de ma thèse de doctorat et est toujours un thème de recherche dans lequel je suis actif, bien que la grande majorité de mes travaux actuels soient maintenant sur le thème général de la géomatique marine. De manière générale, mes travaux de recherche reflètent ma formation et sont caractérisés par une grande interdisciplinarité tout en étant généralement centrés sur les questions d'espace géographique. Une telle interdisciplinarité a représenté une force dans le système canadien du fait des connexions que j'ai pu créer avec les domaines de la

biologie, de la géologie, des sciences de l'environnement, mais aussi des sciences de l'ingénieur, de l'archéologie et d'autres disciplines. Ces collaborations m'ont permis de promouvoir des approches géographiques nouvelles permettant également d'alimenter des réflexions dans différentes disciplines. Je vais dans un premier temps décrire mes contributions au domaine de la qualité des données géographiques avant de présenter celles apportées dans le domaine de la géomatique marine, pour finalement parler de leur intégration en résumant mes principales contributions à la recherche.

1.2.1 Qualité des données géographiques

Les cartes sont par nature des représentations simplifiées du monde réel entachées d'incertitude. Par conséquent, le domaine de la cartographie a fait face depuis ses débuts à des questions de qualité. Dans les premiers temps, la qualité d'une carte était souvent associée à celle du cartographe la produisant (p.ex. de la période grecque à la renaissance). Au cours du XX^{ème} siècle, les agences nationales chargées de la cartographie, comme l'Institut Géographique National (IGN) en France, ont développé des méthodes pour qualifier ou quantifier de manière plus systématique les erreurs des cartes, aidant du même coup à améliorer les processus de production. La transition de la cartographie de supports analogiques à numériques dans les années 70-80 a mené à l'adaptation et la diversification de ces méthodes, permettant de mesurer numériquement différents types d'erreurs et de les décrire sous la forme de métadonnées. Dans les années 90 et 2000, la croissance du réseau Internet et d'autres technologies a facilité l'échange et la réutilisation de données entre organisations, apportant de nouveaux problèmes en termes d'évaluation de la qualité : comment évaluer si des données géographiques produites par un tiers sont adéquates pour une utilisation spécifique (le concept de « *fitness for use* » en anglais) ?

1.2.1.1 *Des métadonnées à la visualisation de la qualité de données géographiques*

C'est dans ce cadre que mes travaux de thèse se sont inscrits de 2001 à 2004, ainsi que beaucoup de contributions qui ont suivies. Ma thèse s'est intéressée à la manière dont on peut communiquer des informations sur la qualité de données géographiques à l'aide d'approches plus efficaces que la diffusion de métadonnées. Mes travaux se sont intéressés à l'utilisation de tableaux de bord de gestion qui permettent de communiquer de manière visuelle des informations complexes. Dans ma thèse, les métadonnées étaient sélectionnées, agrégées et représentées sous la forme d'indicateurs de qualité, permettant de rapidement identifier des problèmes possibles pouvant survenir lors de leur utilisation (Devillers *et al.* 2004, 2006 et 2007). La communication de ces informations avait pour objectif de mieux informer les utilisateurs de données géographiques non-experts en cartographie et ainsi de minimiser les risques de mauvaise utilisation de données dans un contexte donné (p.ex. des données pas assez précises, non mises à jour ou ne représentant pas les objets du monde réel nécessaires). Ma thèse s'inscrivait dans le cadre du projet Européen REVIGIS (FP6), m'ayant aussi permis de collaborer et publier avec un groupe plus large de chercheurs s'intéressant aux mêmes thèmes. Mes travaux de thèse ont aussi indirectement mené, grâce à une collaboration avec mon directeur

de thèse français Robert Jeansoulin, à la publication de deux livres qui sont devenus deux ouvrages de référence sur le domaine de la qualité de l'information géographique en France (Devillers et Jeansoulin 2005) mais aussi internationalement (Devillers et Jeansoulin 2006). La qualité et l'incertitude de données géographiques sont des thèmes de recherche importants existants depuis les années 80-90 dans beaucoup d'agendas de recherche en sciences de l'information géographique. On compte parmi les chercheurs connus dans ce domaine le géographe Américain Michael Goodchild qui a aidé à avancer les travaux sur ces questions depuis les années 80. Cette reconnaissance dans ce domaine scientifique m'a permis dans les années qui ont suivies d'organiser la conférence internationale sur la qualité des données géographiques ISSDQ (*International Symposium on Spatial Data Quality*) à St. John's (Canada) en 2009 (Devillers et Goodchild 2009) et de piloter un article de synthèse sur ce domaine de recherche (Devillers et al. 2010) avec les chercheurs les plus réputés internationalement sur ce sujet. J'ai à nouveau aidé à co-organiser la conférence ISSDQ en 2015 à Montpellier, France, avec des collègues français du domaine.

1.2.1.2 Réduire les risques de mauvaise utilisation des données dans les SIG

Un fois ma thèse finie en 2004, et après un cours post-doc sur le thème de la normalisation en géomatique, j'ai débuté en 2005 comme professeur adjoint (équivalent maître de conférences) en géographie à l'Université Memorial et ai obtenu mon premier financement individuel de recherche auprès du conseil de recherche en sciences naturelles et génie du Canada (CRSNG) – équivalent canadien de l'ANR en France. Ce financement donné à un chercheur de manière individuelle (vs d'autres qui sont en équipe) est très important à obtenir pour développer sa recherche et obtenir une permanence. Le CRSNG a financé mon programme de recherche relié à la qualité des données géographiques pour 5 ans, ce qui m'a permis d'approfondir mes travaux dans ce domaine et de recruter un étudiant en Master. Ce premier étudiant que j'ai encadré en recherche s'est intéressé à la manière dont les métadonnées sur la qualité peuvent être exploitées directement par les systèmes d'information géographiques pour éviter de mauvaises utilisations (p.ex. informer un utilisateur de SIG que les données sont précises à $\pm 10\text{m}$ lors d'analyses de distance) (Zargar et Devillers 2009). En 2008, j'ai pris la codirection d'un projet international financé et piloté par le Canada qui visait à étudier les questions de protection des utilisateurs de données géographiques, incluant les questions d'éthique, légales et sociales. Ce projet de 3 ans (2008-2011) financé par le réseau GEOIDE impliquait un groupe de chercheurs interdisciplinaire, dont trois juristes spécialisés dans les questions de responsabilité civile et de droit d'auteur des données numériques, un sujet peu exploré à cette époque. Une étudiante en maîtrise sous ma direction a exploré dans ce projet de nouvelles méthodes pour visualiser l'information sur la qualité dans les environnements de visualisation 3D (Jones et al. 2014). Certains de ces travaux ont aussi été présentés à la conférence américaine des géographes AAG (*American Association of Geographers*) de 2009 (Bédard et al. 2009) et j'ai co-organisé un atelier sur l'éthique dans le domaine de l'information géographique à la conférence AAG de 2013.

1.2.1.3 *Qualité de l'information géographique volontaire*

Mon financement CRSNG sur les questions de qualité a été renouvelé en 2011, avec une augmentation du financement et l'attribution d'un supplément permettant d'accroître mes activités. Ce supplément est très prestigieux car il est donné au top-5% des demandes financées (les projets financés étant déjà une fraction de ceux soumis). Ce nouveau cycle de financement du CRSNG m'a permis de poursuivre mes travaux sur la qualité, les orientant vers la question émergente de la qualité de l'information géographique volontaire (p.ex. systèmes de cartographie volontaire en ligne OpenStreetMap qui permettent à n'importe quelle personne ayant accès à Internet de modifier/améliorer une carte collaborative en ligne). A travers ce projet, un stagiaire postdoctoral et moi-même avons exploré comment des méthodes informatiques basées sur la mesure de similarité sémantique dans un espace géographique peuvent être utilisées pour améliorer les processus de production de données géographiques sur OpenStreetMap (Vandecasteele et Devillers 2015). J'ai également recruté deux étudiants en thèse, une étudiante regardant comment l'utilisation d'ontologies peut permettre d'améliorer l'intégration de données géographiques volontaires avec des données gouvernementales (Martinez Ramos et al. 2013) et un autre s'intéressant à comment les contributeurs à des systèmes de cartographie volontaire sont recrutés, restent actifs dans le projet puis quittent le projet (Bégin et al. 2017a, 2017b, 2018).

J'ai toujours quelques collaborations sur ce thème de la qualité des données géographiques, dont la participation récente à un ouvrage collectif piloté par un groupe de travail du réseau géomatique français MAGIS dans lequel j'ai coordonné la rédaction d'un chapitre sur la qualité des données géographiques (Devillers et al., 2019) et collaboré sur un autre chapitre présentant les concepts d'intégrité et de confiance et leur utilisation pour évaluer la qualité de données collectées à l'aide de capteurs (Iphar et al., 2019).

1.2.2 Géomatique marine

Mon second axe de recherche principal s'intéresse à la conception, l'adoption et l'utilisation de méthodes basées sur la géomatique permettant de mieux mesurer, comprendre, représenter et gérer le milieu marin. Mes tout premiers travaux de recherche faits lors de ma maîtrise en sciences de la terre (1998-1999) visaient à exploiter des bases de données géologiques et environnementales afin d'estimer certains paramètres environnementaux océaniques dans les dernières centaines de milliers d'années (Devillers et de Vernal 2000). Pendant ce projet, j'ai acquis des compétences en SIG, bases de données et statistiques qui ont créé les fondations d'un certain nombre de travaux futurs.

1.2.2.1 *Analyses spatiales et géovisualisation en support à la gestion des pêches*

Lors de mon début de carrière comme professeur adjoint en 2005 j'ai obtenu le financement d'un projet national nommé « GeoCod » visant à améliorer la gestion durable des stocks de poissons à l'aide de méthodes géographiques. La province canadienne de Terre-Neuve et Labrador (TNL) est très orientée sur la mer et la pêche. Ce projet m'a permis d'aligner ma recherche sur des problématiques régionales d'importance. Ce projet que j'ai dirigé impliquait des experts en

géographie, géomatique et biologie du Canada, de France (IFREMER) et d'Angleterre, et a mené à un ensemble de contributions. Sur un plan plus technique, une étudiante en maîtrise que j'ai co-dirigé a testé comment la structure de données spatiale Voronoi et des méthodes de modélisation basées sur la logique floue peuvent modéliser en 2D et en 3D des populations de poissons (Carette et al. 2008). J'ai aussi dans ce projet collaboré à des recherches permettant de définir de nouvelles méthodes statistiques géographiques permettant de mieux comprendre les liens existants entre les populations de poissons et les paramètres environnementaux tels que la température de l'eau, la salinité, etc. (Ruppert et al. 2008 et 2010). Finalement, j'ai codirigé mon premier étudiant en thèse qui a été le premier à utiliser la méthode des régressions géographiques pondérées (*geographically weighted regressions* – GWR) en milieu marin (Windle et al. 2010 et 2012). Nos articles expliquaient l'importance de la dimension géographique dans la construction de modèles statistiques en océanographie biologique. Ce premier projet d'envergure dans mon nouveau poste m'a aussi permis de me rapprocher de la communauté marine de TNL, dont le gouvernement canadien (le Ministère des Pêches et Océans du Canada) qui est resté jusqu'en 2019 un de mes collaborateurs principaux.

Un second projet d'envergure financé de 2009 à 2012 a permis d'explorer l'utilisation des méthodes *geovisual analytics*, une forme nouvelle de géovisualisation, pour l'analyse de données de pêches. Le *geovisual analytics* est une extension géographique du *visual analytics*, approche permettant la création de nouvelles connaissances à partir d'une exploration visuelle de grands jeux de données. En collaboration avec des experts du domaine de l'informatique (visualisation de l'information) et de la biologie (pêches), nous avons été la première équipe au monde à explorer comment ces nouvelles méthodes pouvaient être utilisées dans le domaine marin. Un étudiant sous ma direction a exploré comment les méthodes *geovisual analytics* peuvent être utilisées en support à des activités de contrôle des activités de pêche faites par le gouvernement, travaillant étroitement avec le gouvernement canadien (voir détails dans le chapitre 2). Entre autres choses, ce projet a permis d'adapter des méthodes du domaine de la biologie qui permettent d'étudier le mouvement d'animaux suivis par des systèmes de géolocalisation (p.ex. GPS) à l'analyse de mouvements de navires de pêche. Ces travaux ont permis, à l'aide par exemple d'analyses fractales, d'étudier à différentes échelles spatiales les mouvements des navires afin d'identifier automatiquement les segments des mouvements correspondant aux activités de pêche (Enguehard et al. 2012 et 2013), une tâche normalement faite manuellement par des experts. Une autre étudiante sous ma direction a développé une nouvelle méthode pour faire des zooms temporels sur des environnements tablette dans des données de pêche couvrant plusieurs décennies (Lee et al. 2014), travaux publiés dans IJGIS, le journal phare du domaine des SIG. Finalement, j'ai collaboré avec deux stagiaires postdoctoraux en informatique afin de développer de nouvelles méthodes de visualisation de données spatio-temporelles complexes dans le domaine des pêches (p.ex. Wilson et al. 2010 et 2011 ; Hoeber et al. 2011). De manière générale, ces projets m'ont permis de contribuer aux méthodes d'analyse et de visualisation de données marines en apportant de nouvelles améliorations méthodologiques (p.ex. le

GWR et le *geovisual analytics*) dans des domaines d'application où ces méthodes n'avaient jamais été utilisées.

1.2.2.2 *Coraux d'eaux froides : Cartographie et modélisation*

Un axe plus appliqué de recherche s'intéressant aux coraux vivants dans les eaux froides du Canada s'est développé peu après mon début comme professeur adjoint par une collaboration avec un collègue de mon département, Evan Edinger. Mon collègue est spécialisé dans l'étude des coraux d'eaux froides, soulevant à la fois des questions en biogéographie et en biologie. Mon expertise en SIG a mené à une première collaboration dans laquelle j'ai principalement apporté un support à la production de produits cartographiques demandant des analyses spatiales simples. Contrairement aux coraux tropicaux, les coraux d'eaux froides sont encore très méconnus du fait qu'ils se retrouvent à de grandes profondeurs (typiquement allant de centaines à des milliers de mètres) et étant donc beaucoup plus difficiles à observer. Ces coraux sont reconnus internationalement par les Nations Unies comme étant des habitats très importants pour d'autres espèces marines et sont également très fragiles, encourageant les pays à les cartographier et les protéger. Evan Edinger et moi-même avons obtenu en 2006 un petit financement du fonds mondial pour la nature (WWF) nous permettant d'analyser la distribution spatiale des coraux à partir de bases de données gouvernementales, analysant aussi l'impact de la pêche commerciale (c.à.d. les dommages causés par les différents engins de pêche). Nos résultats, communiqués dans un rapport publié par le WWF (Edinger et al. 2007), ont eu de très grandes répercussions au niveau politique, menant à la fermeture de zones à la pêche sur le plan international et à la création de zones de conservation. Ce projet est un bel exemple de contribution de la recherche universitaire à des problématiques de société, apports très encouragés dans le système universitaire canadien et que j'ai développé depuis à travers différents projets.

Depuis ce projet, j'ai continué de travailler sur les coraux en eaux froides. En 2010 je suis parti 3 semaines en mer sur un navire océanographique pour coordonner la collecte de données bathymétriques haute résolution dans les habitats de coraux en eaux profondes à l'est du Canada et pour la collecte de données vidéo sur les coraux à l'aide d'engins autonomes de type ROV (*Remotely Operated Vehicles*). Plus récemment, j'ai piloté un projet financé par le gouvernement canadien visant à modéliser (prédire) la distribution d'espèces de coraux au large de TNL à l'aide de méthodes statistiques et de fouille de données (Gullage et al. 2017), faisant une cartographie au niveau de l'espèce de la distribution probable des coraux pour l'ensemble de la région de TNL.

1.2.2.3 *Cartographie des habitats marins*

Peu après mes débuts comme professeur adjoint, j'ai aussi été sollicité par deux collègues de mon département, Trevor Bell et Evan Edinger (deux géographes spécialisés en géomorphologie marine et en biogéographie), pour contribuer à des projets de cartographie des habitats marins financés par le gouvernement canadien. Ce thème de recherche a pris de plus en plus d'importance dans mes activités de recherche et s'est diversifié afin de combiner des projets plus appliqués (p. ex.

projets de cartographie pour le gouvernement) à de la recherche beaucoup plus fondamentale visant à transférer des approches géographiques dans les méthodes utilisées dans ce domaine. Les projets financés dans les premières années par le gouvernement canadien et publiés soit sous la forme de rapports techniques, soit parfois sous la forme d'articles (p.ex. Copeland et al. 2013) m'ont permis de me familiariser avec les méthodes de collecte de données biologiques, géologiques et bathymétriques, ainsi que les analyses statistiques requises pour créer des cartes d'habitat. J'ai à travers ces projets acquis les compétences me permettant d'effectuer ce type de projet de la collecte de données sur le terrain à la production des cartes (compétences très rares qui sont souvent distribuées entre hydrographes, biologistes et géographes). Ces projets ont été financés par deux ministères différents : Pêches et Océans Canada et Parc Canada. L'un de ces projets visait à cartographier l'aire marine protégée (AMP) de Gilbert Bay, une des deux AMPs de la province de TNL. Par la suite, j'ai piloté moi-même plusieurs projets à l'aide de subventions ou de contrats avec Pêches et Océans, dont un en 2014 visant à cartographier l'habitat d'une espèce de poisson à risque de disparition (le *wolffish*) et un projet en 2014-2015 visant à cartographier la seconde aire marine protégée de la province, Eastport. Ces deux projets ont aussi contribué à la recherche présentée dans la prochaine section, touchant à des méthodes permettant de protéger les écosystèmes marins. Le recrutement de deux étudiants en thèse sur ces thèmes, le premier ayant terminé sa thèse en 2016 (Vincent Lecours, maintenant, *Assistant Professor* à l'Université de Floride, USA) et la seconde qui finira sa thèse en 2020 (Emilie Novaczek) a permis d'explorer des questions de recherche beaucoup plus complexes. Avec Vincent Lecours, nous avons mobilisé la géomorphométrie (l'analyse quantitative des reliefs), une science issue de la géographie physique, pour l'analyse des paysages sous-marins et la cartographie des habitats. Certains de ces travaux sont présentés plus en détail dans le chapitre 3 de ce mémoire. Nous avons dans un premier temps publié un article de synthèse mettant l'accent sur l'importance de concepts géographiques tels que l'échelle dans la cartographie des habitats marins (Lecours et al. 2015), appelant la communauté s'intéressant à ce domaine à adopter des méthodes prenant mieux en compte le contexte géographique. Nous avons ensuite étudié différents éléments méthodologiques reliés à la création de cartes d'habitats marins, tels que la sélection de variables décrivant les modèles numériques de surface issus de SIG (Lecours et al. 2017a et 2017b) - comme la pente et la rugosité - et l'impact de données caractérisées par des erreurs introduites à l'acquisition sur les cartes d'habitat, mobilisant ainsi des principes étudiés dans mon premier axe de recherche sur la qualité (Lecours et al. 2017c et 2017d). Dans nos travaux avec Emilie Novaczek, nous explorons le potentiel de cartes bathymétriques créées de manière collaborative (Novaczek et al. 2019) pour la cartographie des habitats, et sommes en train d'utiliser ces données afin de mieux comprendre l'impact de la fragmentation des habitats sur les mouvements d'espèces causés par les changements climatiques (manuscrit en préparation).

1.2.2.4 Aires Marine Protégées (AMP) et conservation marine

Finalement, mes travaux de recherche se sont concentrés de plus en plus sur la manière dont la géographie et la géomatique marine peuvent contribuer à la protection des écosystèmes marins, incluant la planification d'aires marines

protégées (c.à.d. parcs marins). Mes travaux initiaux sur les coraux et sur les populations de poissons m'ont rapidement mis en contact avec le domaine de la conservation. Bien que mes compétences en sciences de l'information géographique étaient utiles dans ce domaine, je n'avais pas de formation en conservation ou en planification de la conservation, des domaines d'étude en soi. Comme le système Canadien permet de prendre une année sabbatique tous les 7 ans, j'ai décidé pour ma première année sabbatique de passer un an à l'Université James Cook en Australie au sein d'une des meilleures équipes au monde spécialisée dans la planification d'aires marines protégées. Pendant cette année j'ai mené une étude internationale montrant l'importance de la géographie et planification de la conservation, c.à.d. que l'emplacement des zones de protection est crucial et démontrant que souvent, les AMPs sont créées à des endroits où il est aisé de créer ces parcs (c.à.d. moins de conflits avec les usagers du territoire), et pas nécessairement aux endroits les plus importants à protéger (Devillers et al. 2015). Cet article est le plus cité de ma carrière et m'a positionné sur la scène internationale dans le domaine de la conservation. Afin de réorienter mes efforts vers ce thème, mon dernier financement CRSNG a été réorienté vers la conception de nouvelles méthodes permettant d'informer la planification d'AMPs (financé pour 5 ans – 2017-2022) pour lequel j'ai une fois de plus été jugé comme l'une des meilleures demandes de financement au Canada et ai reçu un autre supplément CRSNG pour accélérer mes travaux sur le sujet. J'ai depuis ma première année sabbatique développé cet axe, m'intéressant à comment la géographie pourrait aider à mieux créer des zones écologiques (Fontaine et al. 2015), au rôle de la taille des AMP dans la protection des habitats (Novaczek et al. 2017), à l'utilisation de nouvelles méthodes permettant de consulter les pêcheurs lors de la création d'AMP (de Oliveira Leis et al. 2019), ainsi qu'à l'analyse de l'impact du bruit créé par les bateaux sur les baleines (Cominelli et al. 2018) et la conception d'outils SIG pour minimiser cet impact (Cominelli et al. 2019). Simone Cominelli, qui avait fait ces articles dans le cadre d'une maîtrise sous ma direction, a d'ailleurs commencé une thèse en 2019 sous ma direction sur un thème relié. Certains travaux en cours, financés par le réseau de recherche canadien CHONe, visent à rapprocher les domaines de l'écologie du paysage (*landscape ecology*), un domaine très influencé par la géographie qui s'intéresse aux questions d'échelle et de structure spatiale, et s'intéressent à la planification spatiale de parcs marins (deux articles soumis). Aussi, deux de mes étudiantes en thèse (Mairi Miller et Julie Reimer) travaillent actuellement sur des questions reliées à l'intégration des sciences sociales dans la planification de parcs marins (p.ex. du domaine des systèmes socio-écologiques), en collaboration avec des collègues des sciences sociales (dont la géographie) du Canada et de France. Je suis devenu depuis 4-5 ans l'un des experts canadiens les plus reconnu sur les aires marines protégées et suis souvent invité à titre d'expert à contribuer à des initiatives gouvernementales. J'ai été dans les deux dernières années invité deux fois au Parlement canadien pour fournir mon expertise à des comités parlementaires en charge de dossiers impliquant la protection des milieux marins et était bénévole dans des bureaux de direction de trois organisations environnementales travaillant dans le domaine de la conservation. A travers cet axe de recherche, j'essaie de connecter les résultats de recherches scientifiques à la prise de décision et la création de nouvelles lois, afin d'encourager une meilleure

utilisation de la science dans les mécanismes de prise de décision. J'ai d'ailleurs contribué à plusieurs articles axés sur les politiques publiques dans le domaine des aires marines protégées, incluant Bailey et al. 2016, Hameed et al. 2017, Lemieux et al. 2019, Devillers et al. 2019 et Claudet et al. 2019. J'ai passé une deuxième année sabbatique, pendant l'année 2018-2019, à Perpignan avec un chercheur du CNRS spécialisé dans la conception de parcs marins. Mon hôte, Joachim Claudet, intègre des approches des sciences sociales avec des méthodes plus classiques des sciences naturelles pour la conception d'AMP, expérience qui m'a permis de renforcer mon expertise à l'interface entre sciences naturelles et sociales, quelque chose qui devrait m'aider à mieux me positionner dans ce domaine d'étude dans l'avenir.

1.2.3 Conclusions

Depuis ma première publication scientifique il y a plus de vingt ans, et du fait de ma formation universitaire, mes travaux de recherche m'ont rapidement positionné dans un environnement interdisciplinaire, connectant différentes disciplines à la question d'espace géographique physique mais aussi humain. Dans ce rapport, j'ai essayé de présenter une sélection de certains de mes travaux les plus importants. Géologue de formation, puis géomaticien, j'ai évolué pendant 14 ans dans un département de géographie canadien, apprenant à explorer mon environnement sous différents angles, une approche qui a je crois enrichi énormément mes travaux. La majorité de mes travaux ont été publiés sur le plan international et ont contribué à faire avancer la pensée géographique dans d'autres disciplines, mettant par exemple l'accent sur les questions d'échelle, de relations à l'espace, montrant l'importance de la visualisation cartographique pour supporter des décisions complexes ou encore montrant l'importance des statistiques spatiales et de l'analyse spatiale dans l'étude de problèmes complexes. De manière générale, mes contributions principales ont consisté à souligner l'importance de la qualité externe (*fitness for use*) dans le domaine des sciences de l'information géographique, et proposer des méthodes permettant de communiquer cette qualité aux utilisateurs de données n'ayant pas une expertise technique en science de l'information géographique. Mes travaux ont aussi renforcé l'importance de l'éthique et la protection légale des utilisateurs d'information géographique. Dans le domaine marin, mes travaux ont souvent visé à transférer la pensée géographique à l'aide de la création ou adoption de méthodes et outils géographiques permettant d'aider à la gestion et la compréhension des milieux marins. Cela inclus par exemple l'usage de statistiques spatiales, de géovisualisation et *geovisual analytics*, d'outils d'aide à la décision utilisant la cartographie comme mécanisme principal d'exploration des données, ou encore l'utilisation de la géomorphométrie pour l'amélioration de la qualité des cartes d'habitat marines. Les chapitres 2 à 4 présentent en anglais des contributions de recherche faites dans le domaine de la géomatique marine. Par la suite, le chapitre 5 fera une synthèse de ses contributions et présentera des perspectives de recherche pour les années à venir.

1.3 REFERENCES

Bailey M., Charles A., Cheung W., Devillers R., Duck T., Favaro B., Hoover C., Mason T., Milley C., Otto S., Pauly D., Sumaila R., et Tyedmers P. 2016. Canada at a *crossroad*: The imperative for realigning ocean policy with ocean science. *Marine Policy*, 63: 53-60.

- Ban N.C., Bax N.J., Gjerde K.M., Devillers R., Dunn D.C., Dunstan P.K., Hobday A.J., Maxwell S.M., Kaplan D.M., Pressey R.L., Ardron J.A., Game E.T. et Halpin P.A. 2014. Systematic Conservation Planning: a better recipe for managing the high seas for biodiversity conservation and sustainable use. *Conservation Letters*, 7(1): 41-54.
- Bégin D., Devillers R. et Roche S. 2017a. Contributors' enrollment in collaborative online communities: the case of OpenStreetMap. *Geo-spatial Information Science*, 20(3): 282-295.
- Bégin D., Devillers R. et Roche S. 2017b. Contributors' Withdrawal from Online Collaborative Communities: The Case of OpenStreetMap. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(11): 340.
- Bégin D., Devillers R. et Roche S. 2018. The life cycle of contributors in collaborative online communities-the case of OpenStreetMap. *International Journal of Geographical Information Science*, 32(8): 1611-1630.
- Carette V., Mostafavi M.A., Devillers R., Rose G. et Hashemi L. 2008. Extending Marine GIS capabilities: 3D Dynamic and interactive representation of fish aggregations using 3D Delaunay Triangulation and Alpha Shapes. *Geomatica*, 62(4): 361-374.
- Claudet J., Bopp L., Cheung W.W., Devillers R., Escobar-Briones E., Haugan P., ... et Mullineaux L. 2019. A Roadmap for Using the UN Decade of Ocean Science for Sustainable Development in Support of Science, Policy, and Action. *One Earth*.
- Cominelli S., Devillers R., Yurk H., MacGillivray A., McWhinnie L. et Canessa R. 2018. Noise exposure from commercial shipping for the southern resident killer whale population. *Marine Pollution Bulletin*, 136: 177-200.
- Cominelli S., Lehy M., Devillers R. et Hall B. 2019. Geovisualization tools to inform the management of vessel noise in support of species' conservation. *Ocean and Coastal Management*, 169: 113-128.
- Copeland A., Edinger E., Devillers R., Bell T., LeBlanc P. et Wroblewski J. 2013. Marine habitat mapping in support of marine protected area management in a sub-arctic fjord: Gilbert Bay, Labrador, Canada. *Journal of Coastal Conservation*, 17(2): 225-237.
- de Oliveira Leis M., Devillers R., Medeiros R. P. et Chuenpagdee R. 2019. Mapping fishers' perceptions of marine conservation in Brazil: An exploratory approach. *Ocean & Coastal Management*, 167: 32-41.
- Devillers R. et de Vernal A. 2000. Dinocyst distribution in surface sediments of the northern North Atlantic in relation with nutrients and productivity in surface waters. *Marine Geology*, 166(1-4): 103-124.
- Devillers R., Bédard Y. et Gervais M. 2004. Indicateurs de qualité pour réduire les risques de mauvaise utilisation des données géospatiales. *Revue Internationale de Géomatique*, 14(1): 35-57.
- Devillers R. et Jeansoulin R. (Eds). 2005. *Qualité de l'information géographique*. In: IGAT Series (Information géographique et aménagement du territoire), Hermès, France, 349p.
- Devillers R. et Jeansoulin R. (Eds). 2006. *Fundamentals of Spatial Data Quality*. ISTE, London, UK, 312p.
- Devillers R., Bédard Y. et Jeansoulin R. 2006. Multidimensional management of geospatial data quality information for its dynamic use within Geographical Information Systems. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing (PE&RS)*, 71(2): 205-215.
- Devillers R., Bédard Y., Jeansoulin R. et Moulin B. 2007. Towards Spatial Data Quality Information Analysis Tools for Experts Assessing the Fitness for Use of Spatial Data. *International Journal of Geographical Information Science*, 21(3): 261-282.
- Devillers R., Stein A., Bédard Y., Chrisman N., Fisher P. et Shi W. 2010. 30 years of research on Spatial Data Quality – Achievements, failures and opportunities. *Transactions in GIS*, 14(4): 387-400.
- Devillers R., Lemieux C. J., Gray P. A. et Claudet J. 2019. Canada's uncharted conservation approach. *Science*, 364(6447): 1243-1243.

- Devillers R., Desjardin E. et de Runz C. 2019. Concepts et terminologies de l'imperfection de l'information géographique. In: *Imperfections des données géographiques: de la théorie aux applications* (Pinet F., Batton-Hubert M. and Desjardin E., eds). ISTE Publishing.
- Edinger E., Baker K., Devillers R. et Wareham V. 2007. *Deep-sea coral distribution and bycatch from commercial fisheries off Newfoundland and Labrador*. World Wildlife Fund Canada (WWF), 41p.
- Enguehard R., Hoeber O. et Devillers R. 2012. Interactive exploration of movement data: A case study of geovisual analytics for fishing vessel analysis. *Information Visualization*, 12(1): 65-84.
- Enguehard R., Devillers R. et Hoeber O. 2013. Comparing interactive and automated mapping systems for supporting fisheries enforcement activities – A case study on Vessels Monitoring Systems (VMS). *Journal of Coastal Conservation*, 17(1): 105-119.
- Hameed S.O., Cornick L.A., Devillers R. et Morgan L.E. 2017. Incentivizing More Effective Marine Protected Areas with the Global Ocean Refuge System (GLORES). *Frontiers in Marine Science*, 4: 208.
- Iphar C., Costé B., Napoli A., Ray C. et Devillers R. 2019. Intégrité et confiance de la donnée géographique. In: *Imperfections des données géographiques: de la théorie aux applications* (Pinet F., Batton-Hubert M. and Desjardin E., eds). ISTE Publishing.
- Jones K., Devillers R., Bédard Y. et Schroth O. 2014. Visualizing perceived spatial data quality of 3D objects within virtual globes. *International Journal of Digital Earth*, 7(10): 771-788.
- Lecours V., Devillers R., Simms A.E., Lucieer V.L. et Brown C.J. 2017a. Towards a Framework for Terrain Attribute Selection in Environmental Studies. *Environmental Modelling & Software*, 89: 19-30.
- Lecours V., Brown C.J., Devillers R., Lucieer V.L. et Edinger E.N. 2017b. Comparing selections of environmental variables for ecological studies: a focus on terrain attributes. *PLoS one*, 11(12): e0167128
- Lecours V., Devillers R., Lucieer V.L. et Brown C.J. 2017c. Artefacts in marine digital terrain models: a multiscale analysis of their impact on the derivation of terrain attributes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(9): 5391-5406.
- Lecours V., Devillers R., Edinger E.N., Brown C.J. et Lucieer V.L. 2017d. Influence of artefacts in marine digital terrain models on habitat maps and species distribution models: a multiscale assessment. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 3(4): 232-246.
- Lee C., Devillers R. et Hoeber O. 2014. Navigating spatio-temporal data with temporal zoom and pan in a multi-touch environment. *International Journal of Geographic Information Science*, 28(5): 1128-1148.
- Lemieux C.J., Gray P.A., Devillers R., Wright P.A., Dearden P., Halpenny E.A., Groulx M., Beechey T.J. et Beazley K. 2019. How the race to achieve Aichi Target 11 could jeopardize the effective conservation of biodiversity in Canada and beyond. *Marine Policy*, 99: 312-323.
- Novaczek E., Howse V., Pretty C., Devillers R., Edinger E. et Copeland A. 2017. Limited Contribution of Small Marine Protected Areas to Regional Biodiversity: The Example of a Small Canadian No-Take MPA. *Frontiers in Marine Science*, 4: 174.
- Ruppert J., Fortin M.-J., Rose G.A. et Devillers R. 2009. Atlantic cod distribution: changing benthic and abiotic environments alter site fidelity. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 66(6): 909-918.
- Ruppert J., Fortin M.-J., Rose G.A. et Devillers R. 2010. Environmentally mediated effects on the importance of cod abundance patterns to fish community composition in the Gulf of St. Lawrence, 1991 – 2003. *Marine Ecology Progress Series*, 411: 189-201.
- Vandecasteele, A. et Devillers, R. 2015. Improving Volunteered Geographic Information Quality Using a Tag Recommender System: The Case of OpenStreetMap. In: *OpenStreetMap in GIScience* (J. Jokar Arsanjani et al., eds.). Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, Springer, p.59-80.

- Windle M., Rose G., Devillers R. et Fortin M.-J. 2010. Exploring spatial non-stationarity of fisheries survey data using geographically weighted regression (GWR): an example from the Northwest Atlantic. *ICES Journal of Marine Science*. 67(1): 145-154.
- Windle M., Rose G., Devillers R. et Fortin M.-J. 2012. Spatio-temporal variations of invertebrate cod-temperature relationships on the Newfoundland shelf, 1995-2009. *Marine Ecology Progress Series*, 469: 263-278.
- Zargar, A. and Devillers, R. 2009. An Operation-Based Communication of Spatial Data Quality. International Conference on Advanced Geographic Information Systems and Web Services (GEOWS 2009), Cancun, Mexico, February 5th, 2009, 10 p.

2 GEOVISUAL ANALYTICS OF MARINE DATA

2.1 INTRODUCTION

My research aimed in many cases at designing/developing new methods and tools that could help users of the marine environments handle or make sense of large amounts of data. For this, I have worked on different projects on using geographic visualisations as an approach that can be used to inform decision-makers or help them explore data to find patterns or new information. If this research theme has been present in my research in various contexts (e.g. we used geographic visualisations recently to help mitigate the impact of ocean noise on marine mammals in the work from Cominelli et al. 2018 and 2019), I will focus here on contributions that all emerged from a same project. This project, funded by the Canadian research agency, was conducted in partnership with the Canadian government (the Department of Fisheries and Oceans Canada). One of the responsibilities of this department is to create laws for managing fisheries in Canadian waters and then enforce fisheries activities to ensure that fishers do not break the law (e.g. that fishers fish in locations and at times where fishing activities are allowed, catch fishes they have licences for, using fishing gears that are allowed to use in this context). To do this, fisheries enforcement officers had access to rudimentary data visualization tools as well as traditional reporting mechanisms, making their task challenging due to the large amount of information made available to them when compared to the short time they have to process it and act on it.

In this chapter I will illustrate some of my research contributions through two different research contributions. First, the Masters' project of René Enguehard (section 2.2) looked at using methods from the field of geovisual analytics to provide new geovisualization tools that can help fisheries enforcement officers explore data to identify potential infractions to fisheries regulations. This work has been published in two journal papers: Enguehard et al. 2012 and 2013. Second, the project of Master's student Cassandra Lee (section 2.3) helped develop new tools on multi-touch environments that helped users explore the data spatially but also temporally (e.g. providing temporal zoom functionalities). This work has been published in the journal paper Lee et al. (2014). The following sections provide an outline of these publications, looking at the context of the study and the main research findings and contributions.

2.2 MARINE GEOVISUAL ANALYTICS IN SUPPORT OF FISHERIES ENFORCEMENT

2.2.1 Context

Government fisheries enforcement officers use various data types to support their activities. Fishing vessel movement data is a key dataset enforcement officers have to rely on. Fishing vessels collect positioning data while at sea using an on-board GPS-based navigation system called Vessel Monitoring System (VMS). Those data are then shared in near real-time with the government and fisheries enforcement officers (Figures 2.1 and 2.2 for example of movement data collected by VMS). While there is only a handful of officers on duty at a given time, they can be

required to analyze large movement datasets. The lack of time often makes them focus on specific fishing vessels that have an history of illegal fishing, preventing them to explore most of the data made available to them. The analysis of the entire dataset could provide useful insights into the behavior of moving objects, helping officers to identify trends, patterns, or outliers within the data that could lead to the identification of additional infractions. While movement data can be visualized in a non-spatial manner, geovisualization systems can provide effective ways for dealing with various aspects of the complexity of movement data.

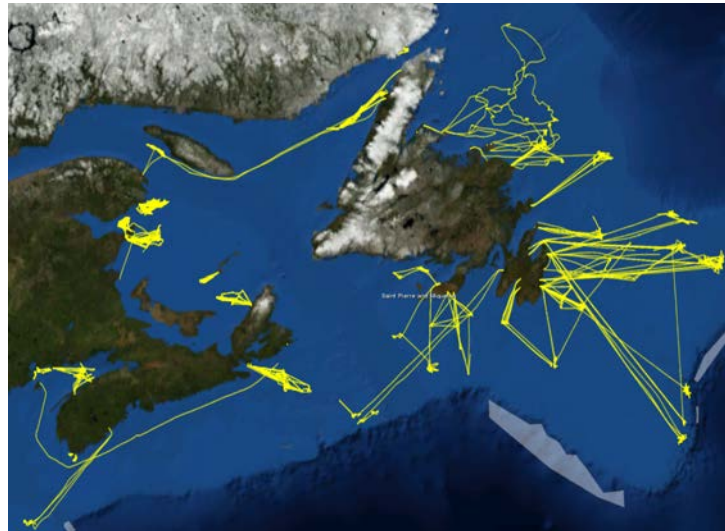


Figure 2.1. Example of a month of fishing vessel movement data in Eastern Canada.



Figure 2.2. Example of one specific fishing vessel trajectory: the yellow curves represent the interpolated vessel tracks and the chevrons indicate the position of collected data points as well as the direction of movement.

2.2.2 Approach and contributions

Our research used approaches from the field of geovisual analytics to help reduce the amount of data an analyst needs to investigate when searching for specific movement patterns and help identify patterns and potential infractions to fisheries regulations. Such an approach helps the analyst discover information through an interaction with the system. Our research was implemented through a system called the Hybrid Spatio-Temporal Filtering (HSF) system. HSF provides analysts with an interface that employs different filtering mechanisms and uses visual representations to address the inherent congestion within the movement data. The approach taken exploits physical characteristics of the data (i.e. vessel velocity, heading), temporal constraints, and the tortuosity of the movement path, quantified using fractal dimension, to increase the ability of analysts to specify interactive filters for the data. These filters address the problem of information overload when showing all of the movement data. An interactive geovisualization interface is provided to graphically show the aspects of the data that match the filter, as well as to illustrate the possible extent of travel between the logged locations (Figure 2.3).

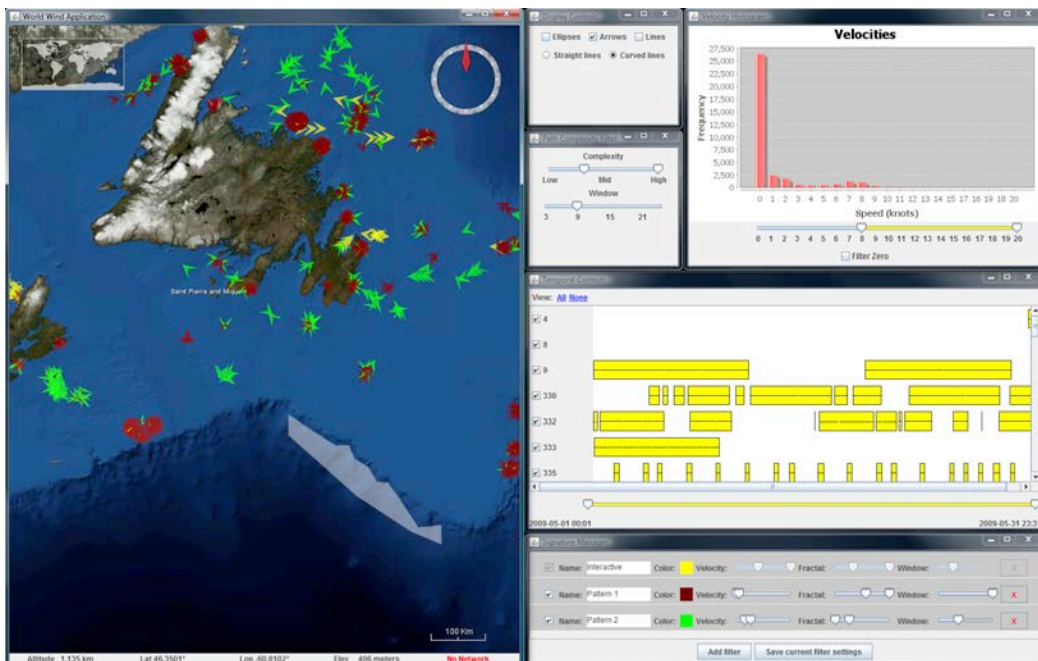


Figure 2.3. Full HSF interface, showing the spatial view on the left, and the various filtering views and controls on the right (e.g. velocity, complexity and temporal filters). Chevrons of different colors on the map correspond to different signatures specified by the user (using a specific set of filters' settings).

Although others have explored methods for filtering movement data using velocity and time, a novel aspect of HSF was the use of an adjustable moving window fractal dimension technique to filter the data. Fractal dimension gives a quantitative measure of how much an object, or a movement path, fills its theoretical space (Mandelbrot 1967; Theiler 1990). Fractal dimension is scale invariant in the spatial domain, which affords it robustness to movements of different spatial scales and

gaps in datasets. This allowed the comparison of movements that differ not only in scale but also in geometry. It was specifically useful in the context of fishing activities as fishing methods using different gears can be characterized by different spatial patterns or set of characteristics related to the geometry of the path and the vessel speed.

Three filtering modes (i.e, fractal dimension, velocity and temporal) have been developed and can function separately or in conjunction with one another in the HSF approach. Analysts can select filter settings to isolate specific behaviors, based on the tortuosity and velocity inherent to the patterns that make up those behaviors. They can further filter the data to focus on a timeframe in which they suspect some behavior is occurring.

The approach was evaluated through a case study using Canadian Vessel Monitoring System (VMS) movement data collected in 2009 from vessels fishing in the Northwest Atlantic region. These data were provided by Fisheries and Oceans Canada (DFO), the Canadian government agency responsible for managing activities with Canadian waters. The data used in this study consisted of approximately six million records spread over a full year (2009), with each record being only composed of a vessel identifier, latitude, longitude, and timestamp. These data were collected in the course of DFO's VMS program, and records the location of over 2000 fishing vessels on an hourly basis, from the time they leave port to the time they return. The data cover the Northwest Atlantic fishing area, which encompasses an area of approximately seven million square kilometers. While several ancillary sources of information do exist, detailing licenses, infractions, and vessel parameters, these were not made available for this research due to privacy concerns.

The evaluation was conducted as a field trial wherein experts from DFO, whose primary duties include fisheries enforcement, performed their normal data analysis activities using the HSF prototype. Experts were asked to complete a questionnaire based on the Technology Acceptance Model (TAM), which provides measures of the perceived ease of use (PEU) and perceived usefulness (PU) of software systems. The purpose of this primarily qualitative evaluation was to establish whether the experts found this geovisual analytics approach to data analysis useful and easy to use, and to assess its suitability for various different types of data analysis activities (see Figures 2.4 and 2.5 for examples of results)

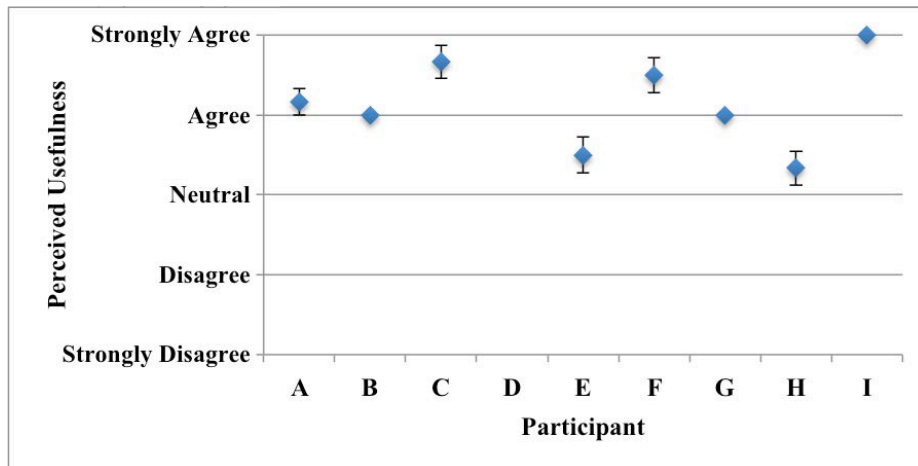


Figure 2.4. Mean Perceived Usefulness (PU) responses by participant. The error bars represent the standard error of the mean.

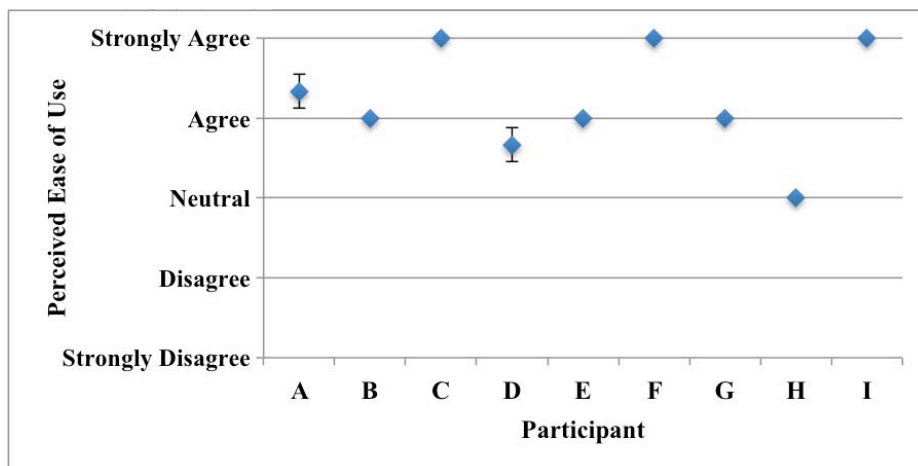


Figure 2.5. Mean Perceived Ease of Use (PEU) responses by participant. The error bars represent the standard error of the mean.

While HSF could benefit from additional features to replace the normal data analysis tool used by experts in an operational setting, there was strong support for the perceived usefulness of the specific data filtering and analysis features implemented in the prototype. The velocity filter and the ability to define complex signatures based on velocity and fractal dimension were mentioned by multiple participants as having the potential to make data analysis task much more efficient. The idea of being able to look at specific patterns or behaviors in isolation, providing insight regarding the spatial or temporal distributions, as well as being able to look at multiple patterns together, was appealing to most participants. In addition, the perceived usefulness and perceived ease of use of this approach were shown to be high.

This work added to the growing body of literature showing the potential utility of geovisual analytics approaches for exploring complex spatio-temporal datasets. It was to our knowledge the first time a geovisual analytics approach was used in the marine environment and, while some other studies looked at the analysis of fisheries vessels movements, this was the first real attempt to use geovisual

analytics in such a context and also the first time a measure of path's complexity was used (i.e. fractal dimension in our case). HSF opened the door to new tools that could help experts save significant amounts of time, while allowing for a more thorough analysis of these types of data. In the context of fisheries enforcement, this approach can help in detecting and preventing illegal fishing, contributing to the management of complex marine ecosystems.

2.3 SPATIO-TEMPORAL ZOOM AND PAN INTERFACE IN MULTI-TOUCH ENVIRONMENTS

2.3.1 Context

Most data used to study geographic phenomena are complex and multidimensional in nature, consisting of spatial, thematic, and temporal dimensions (Sinton 1978). The ability to manipulate the data along these dimensions using geospatial technologies allows users to answer questions about 'what' happened, 'where' it happened, and 'when' it happened (Peuquet 2002). Exploring data and seeking answers for complex research questions requires approaches that allow users to easily navigate among the dimensions of the data. Tools for navigating the spatial dimension have been available since early GIS systems, allowing users to zoom (in or out) and pan through data that cover an area too large to be effectively displayed at one time (Harrower and Sheesley 2005). 'Zooming' changes the scale of the map, allowing users to see a larger or smaller spatial extent on the screen, whereas 'panning' moves the map in the display window while maintaining the same spatial scale.

Navigation along the thematic dimension can be accomplished by adding and subtracting layers for different attributes, or by using queries and filters. Such queries can be specified through several approaches. For example, Structured Query Language (SQL) can be used to define criteria for choosing points from a dataset, or a hierarchical menu can be used to make selections from a collection of pre-defined settings (Neumann 2010). The temporal dimension has been recognized as being important for answering complex questions and supporting decision-making processes (Peuquet and Duan 1995, Andrienko et al. 2007). Pioneering work from Hägerstrand (1970) proposed using time-space prism visualizations to represent the movement of people over time, an approach that has been often used and expanded upon in temporal GIS research. Works such as that by Hornsby and Egenhofer (2002), Kraak (2003), and Kwan and Lee (2003) have their roots in Hägerstrand's time geography and focus on the visualization of the temporal dimension of spatio-temporal data. While visualization of the temporal dimension is a dominant component in spatio-temporal research, being able to temporally navigate within spatio-temporal datasets is also important.

GIS technologies have typically handled temporal data by either having different layers for different time slices (e.g. layers for each year of data), or by including temporal data such as timestamps or dates of objects' existence (e.g. 'from' and 'to') in the database. To navigate the data temporally, users could then either display the layers they require, or treat time as an attribute and create queries to select data for specific temporal ranges. The use of simple time sliders in GIS and

virtual globes provides users with an interactive representation of temporal data. However, these tools do not allow users to navigate temporal data with the same ease as that provided by tools used to navigate the spatial dimension. These limitations call for more advanced temporal navigation tools and techniques, a need that is likely to increase as temporal data become increasingly available.

Based on the existing concept of temporal zoom and pan, we proposed and tested two novel approaches for navigating the temporal dimension of geographic data within a multi-touch environment. Temporal zoom and pan can be defined in multiple ways. For the purposes of this research, temporal zoom was defined as the narrowing or broadening of the temporal range of data being selected and temporal pan was defined as moving the data selection to a different time period while maintaining the same temporal extent. Since the extent of the data was being selected and adjusted when navigating data either spatially or temporally, the new approaches were based on the interaction paradigm for spatial zoom and pan. The underlying hypothesis in this work was that applying a familiar data navigation paradigm may simplify temporal navigation for users. These approaches also supported temporal manipulations over multiple granularities. Both approaches were implemented in software prototypes on a multi-touch tablet computer, and have been tested together with two other temporal data exploration methods using a formal user evaluation.

2.3.2 Approach and contributions

Temporal zoom and pan are approaches for enabling users to easily navigate within their temporal data and assist them in their data analysis activities. It follows on Peuquet's Triad framework (Peuquet 1994), where a temporal-based view is needed for answering temporal-based questions. Temporal zoom changes the temporal range of the data that are displayed on-screen, essentially acting as a filter on the data. The user can either 'zoom in' to select a narrower temporal range or 'zoom out' to select a wider range. This allows users to quickly and easily expand or contract their temporal selections and prevents them from having to reconceptualize their entire selection each time a change is required.

Temporal pan allows users to change their temporal selection while maintaining the same temporal extent. This can be especially useful when a temporal range is selected, but then must be modified. The range can easily be moved through time without the user having to re-specify the entire selection. The user can interactively control the selection move instead of having to mentally recalculate the dates. Temporal data can often be described at multiple temporal granularities (e.g. months, days, hours); users need to be able to navigate such data at a granularity that is appropriate for their data analysis needs (Bertino et al. 2010). In the following approaches, temporal zoom and pan may occur at a single temporal granularity or dynamically across multiple granularities. Temporal data can be visualized as time points or as time intervals (Aigner et al. 2008) and users may require different options depending on the analysis they would like to conduct. Zooming and panning can occur using both point and interval selections. Users may wish to zoom from a range of data to a narrower or wider data range or from a point

to a range (or *vice versa*). Users may also wish to pan using a point selection or with a range of data.

Temporal zoom and pan may be considered forms of querying or data filtering, allowing for the display of the data for the desired temporal extent and eliminating extraneous data from the field of view. This allows users to eliminate visual clutter and focus on the data that are important for their analysis (Andrienko and Andrienko 2006). Such an approach follows Shneiderman's (1996) Visual Information Seeking Mantra design guideline: 'overview first, zoom and filter, then details on demand'.

Both of the approaches proposed in our work to temporal zoom and pan, Multiple Linked Time Sliders and Dynamic Radial Navigation, have been designed as visual temporal navigation tools. Since the inability to support precise temporal selections has been a critique of this type of navigation approach in the past (Andrienko and Andrienko 2006), the use of temporal zoom and pan within these approaches is intended to address this shortcoming and allow precise date and time selections.

Both approaches have been designed for, and implemented in, a multi-touch environment on a tablet computer. Many tablet computers offer a larger screen size than smartphones and include global positioning system (GPS), gyroscopes, and the capability to connect to the Internet, allowing users to access their data in the field and relate them spatially. For example, a fisheries officer in a port may want to access data on ship movements for the days before inspecting it. Since tablet computers are often characterized by smaller screen sizes compared to desktop computers, the screen size limitation has been a guiding issue during the design of both approaches.

The interfaces for each approach are located at the bottom of the screen and are intended to occupy a minimal amount of screen space to provide maximum space for the map view where data will be displayed. By minimizing the amount of screen space that the zoom and pan interfaces occupy, the information to interface ratio is increased (Harrower and Sheesley 2005). By doing so, there is a risk of making the interfaces too compact, since the touchpoints have to be large enough so that users can easily select them with their fingers.

Multiple Linked Time Sliders is a linear temporal navigation approach that consists of a series of user-controlled time sliders (Figure 2.6). This approach is based on traditional time sliders frequently used in geospatial technologies (e.g. Google Earth, ArcGIS) but was expanded to provide users with the ability to easily make a more detailed selection than most time sliders allow. Sliders are available for each level of temporal granularity within the data set; finer granularity sliders are accessed by using a drag up gesture from the parent slider. Since all of the data cannot always be displayed on the finer grained sliders at once, they are designed to automatically scroll through the remaining data when the users approach the end of the slider with their finger. Users only need to bring up as many sliders as is required for their specific selection, resulting in an efficient use of display space and maximizing the area available for viewing the selected data.

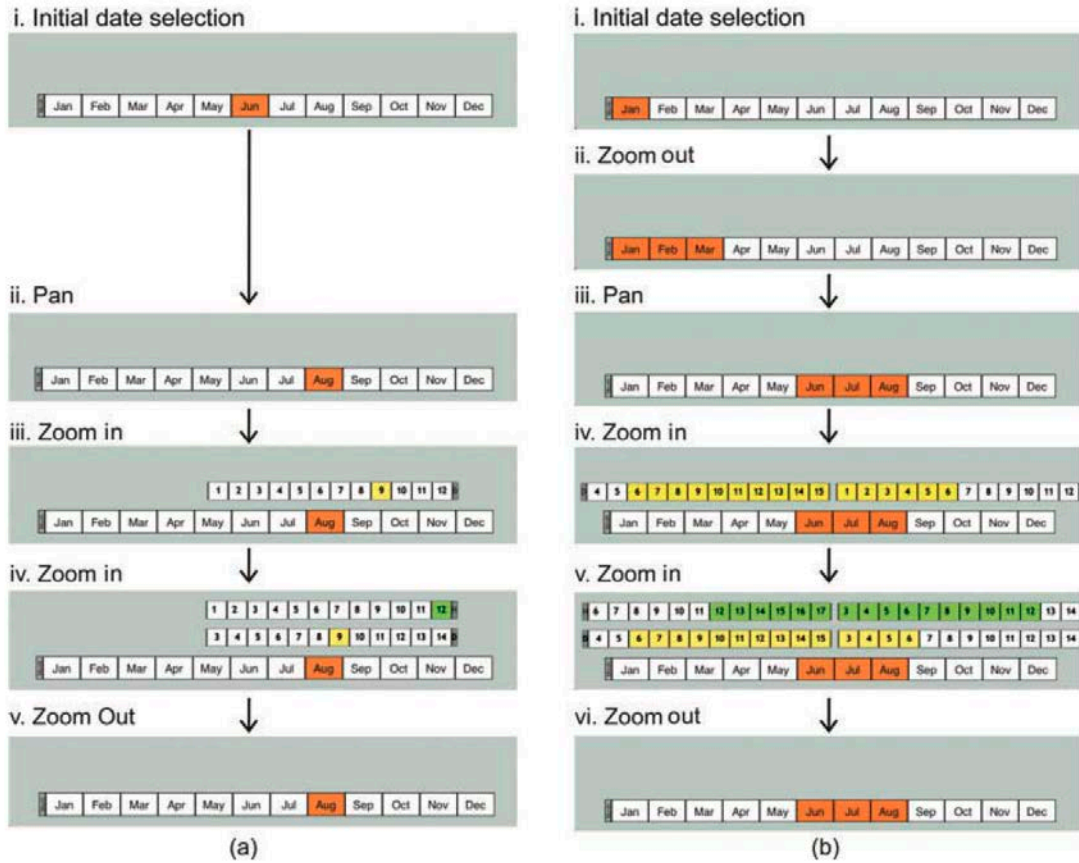


Figure 2.6. Zooming and panning with Multiple Linked Time Sliders using a single date/time selection (a) and a range date/time selection (b). The bottom (initial) slider is displaying months, the middle slider(s) is (are) displaying days, and the top slider(s) is (are) displaying hours.

A single point of time on the initial slider can be selected with a tap, after which a finer level of temporal granularity can be readily accessed by performing a drag up gesture on the point (Figure 2.6a). The data selected on the initial slider are then displayed on the new slider at a finer level of resolution. The users can then tap on the date/time they wish to select. If they wish to access an even finer level of temporal granularity, they can pull up additional sliders (to the limit of the temporal granularity of the data set).

A range of time on the initial slider can be selected with a reverse pinch gesture. In order to access finer levels of temporal granularity, drag up gestures can be performed on the range, resulting in two side-by-side sliders showing finer levels of resolution (Figure 2.6b). One slider displays the data from the starting point of the main selection (e.g. all of the days in June if the previous selection is from June to August) and the second displays the data from the end point (e.g. all of the days from August). The users can then select their desired selection start point from the first slider and selection end point from the second slider. Additional sliders can be pulled up if the users wish to further refine their selection. By allowing the use of simple gestures to interactively ‘move’ their selections, we are intending to provide users with a quick way of altering their selections and navigating through their data.

The pinch and reverse pinch gestures are used for zooming out and in (narrowing or expanding the selection) along each slider, while panning is achieved by using a drag gesture along the slider. Note that even though panning might be done at a coarse level of granularity, the selections made at finer levels of granularity are preserved. This is similar to the method that Neumann (2010) found to be preferred for temporal zooming and panning but applied to a multi-touch interface.

To further enhance the awareness of the different levels of temporal granularity on the different sliders, the selected data point/data range is highlighted in a different colour on each granularity of slider. In the current examples, orange is used for the months, yellow is used for the days, and green is used for the hours. Additional perceptually distinct colours can be used for even lower levels of granularity.

Dynamic Radial Navigation is a temporal navigation approach that consists of a time slider for the coarsest temporal granularity and radial selectors for finer levels of granularity (Figures 2.7 and 2.8). The slider works the same as the initial slider in the previously described approach, allowing a single selection with a tap gesture, a range selection with a reverse pinch gesture, and panning with a dragging gesture. What is different is the way in which the finer levels of temporal granularity are represented.

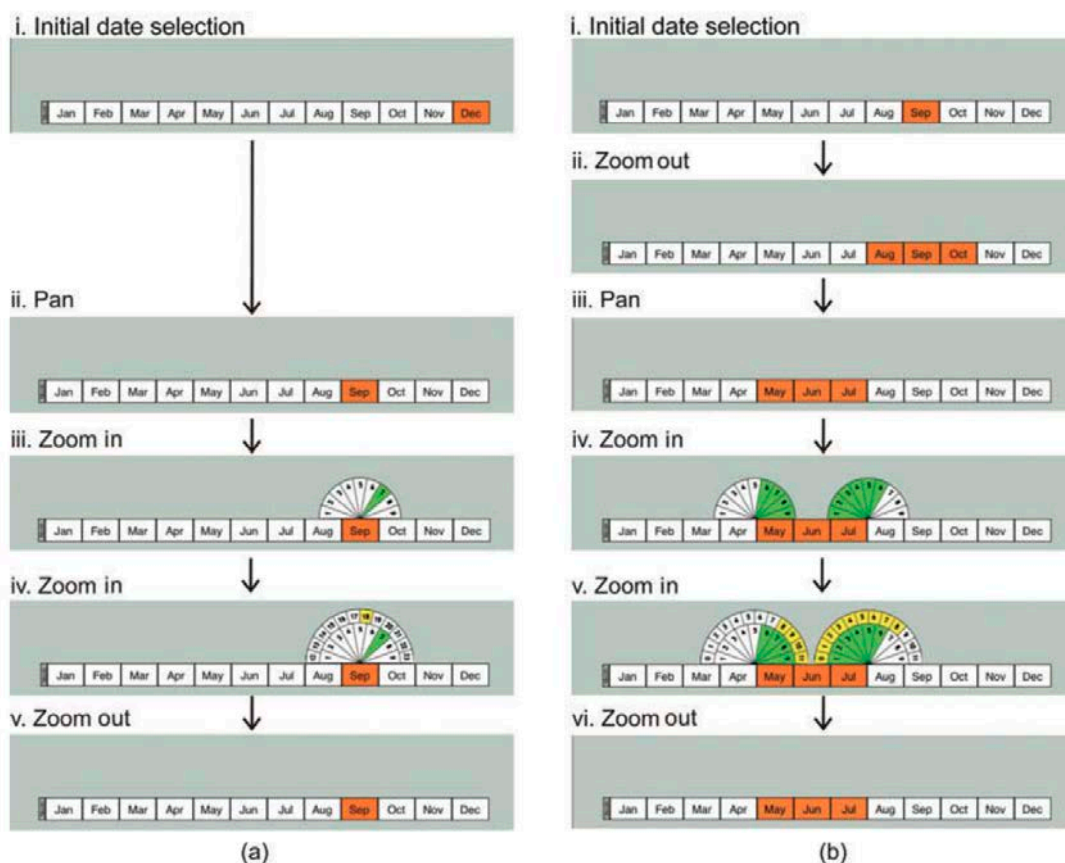


Figure 2.7. Zooming and panning with Dynamic Radial Navigation using a single date/time selection (a) and a range date/time selection (b). The slider is displaying months, the initial selector(s) is (are) displaying days, and the outer selector(s) is (are) displaying hours.

After tapping to select a single point of time on the initial slider, a single radial selector can be accessed by performing the drag up gesture on the selection. The radial selector displays the data from the initial selection at a finer resolution (Figure 2.7a). Only a subset of the data is displayed on the selector at once; the selector can be rotated to access the rest of the data set. A date/time on the radial selector can be selected with a tap. If finer levels of temporal granularity are required, and are available within the data set, additional nested selectors can be accessed with the drag up gesture.

To access finer temporal resolutions with a range of time, the drag up gesture is performed on the initial range selection on the slider. Two radial selectors are accessed, one over the beginning of the initial selection and another over the end (Figure 2.7b). Tapping is used to select a starting time/date from the first selector and an end time/date from the second selector. To further refine their selection, the drag up gesture can be used to access additional nested selectors.

The semi-circular shape of the selectors was chosen because it is compact and helps to prevent occlusions of the data by the user's hand (Brandl et al. 2009). The use of a shape that is different from that of a traditional time slider also allows the users to spin the selectors and interact with them in a different way than they could interact with a time slider. As with the previously described approach, the selected data point/data range is highlighted on the slider using a different colour for each level of granularity in order to assist users in visualizing the granular features of the data selection that they have made. The two approaches were implemented as software prototypes in order to study them via user evaluations.



Figure 2.8. (a) A full screen view of Dynamic Radial Navigation with the data from May 26th at 12:00 pm to July 12th at 12:00 pm selected. (b) A full screen view of Dynamic Radial Navigation zoomed in to select July 5th.

Two additional data selection methods based on more commonly used temporal selection approaches were also implemented for comparison. The first method, 'Date/ Time Spinners', is based on picker wheels, the most commonly used method for selecting time in mobile devices (e.g. smart phones and tablet computers), found for instance in many calendar and alarm clock applications. The 'Date/Time Spinners' consists of two picker wheel widgets that are made up of a series of wheels of temporal values. Users can spin the wheels using a swipe gesture and then tap to stop the wheels from spinning and select the desired value. There are two picker wheels, each one allowing a selection of temporal information at different levels of temporal granularity (i.e., months, days, and hours). The first wheel is used to select a single time or the beginning of a temporal range and the second wheel is used to select the end of a temporal range.

The second method, 'Drop-Down List', is based on drop-down menus and uses a series of drop-down menus, which are commonly used for selecting data in pointer-based devices, for selecting dates and date ranges. There are two groups of drop-down menus, each of which contains a menu for each level of temporal resolution in the data. The first group allows the users to select a single date or the start of a date range and the second group allows the users to select the end date of range. The Date/Time Spinners and Drop-Down List were implemented using components from the iOS SDK, whereas the Linked Time Sliders and Dynamic Radial Navigation were custom-built due to the lack of availability of suitable SDK components.

A laboratory-based user evaluation was used to maintain control of multiple design aspects of the study and create measurable and comparable tasks (Carpendale 2008). The user evaluation employed a 4×4 (interface × task type) between-subjects design where each participant used each interface once and completed each task type once. With a total of 40 participants, this resulted in 10 participants for each interface/task combination and the subsequent statistical analyses were performed with this group size in mind. The time to task completion was measured to provide an indication of the efficiency of the prototypes. After completing the tasks, the participants' answers were marked to assess their accuracy, providing an indication of the effectiveness of the interfaces for each of the different task types. Perceived ease of use and perceived usefulness were measured using the Technology Acceptance Model (TAM) instrument (Davis 1989), providing evidence of the overall usability of the prototypes. Each TAM questionnaire consisted of six questions addressing ease of use and six addressing usefulness. Participants' likes, dislikes, and general opinions were also gathered through open-ended questions at the conclusion of the study to assess overall participant satisfaction.

This evaluation found that overall, all of the approaches were perceived as useful and easy to use although Date/Time Spinners were often rated higher than

other prototypes and Dynamic Radial Navigation was often rated lower. There was no difference in accuracy between any of the approaches. While there was no difference in time to task completion for three of the tasks, the Date/Time Spinners were faster to use and Dynamic Radial Navigation was slower to use than the rest of the approaches for the most complicated task. Specific issues that affect the usability and ease of use of the proposed approaches were identified. These included difficulty in spinning the radial selectors, confusion about scrolling the fine-grained time sliders, and small touch points on the radial selectors and fine-grained time sliders. Participant comments indicated that while they tended to find the Date/Time Spinners and Drop-Down List familiar and easy to use, they liked the appearance and visualization capabilities of the Dynamic Radial Navigation and Linked Time Sliders.

A key outcome in this study is in relation to the trade-offs between the sizes of the controls, their utility, and the novelty of the approach. Although the Date/Time Spinners showed all levels of temporal granularity in full at all times, wasting valuable space in the display, the sizes of the touch points and the familiarity with its operation lead to positive impressions. The new approaches that were designed to be compact, and provided dynamic access to the temporal granularity as necessary, were deemed to be less desirable because of the difficulty of interacting with the small touch points and the novelty of the interaction. Generally, this study provided some insights on the potential for developing more advanced temporal navigation tools in multi-touch environments that could help users navigate through complex spatio-temporal datasets.

2.4 REFERENCES

- Aigner, W., et al., 2008. Visual methods for analyzing time-oriented data. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 14 (1), 47–60.
- Andrienko, N. and Andrienko, G., 2006. *Exploratory analysis of spatial and temporal data*. Berlin: Springer.
- Andrienko, G., et al., 2007. Geovisual analytics for spatial decision support: setting the research agenda. *International Journal of Geographical Information Science*, 21 (8), 839–857.
- Bertino, E., Camossi, E., and Bertolotto, M., 2010. Multi-granular spatio-temporal object models: concepts and research directions. In: M.C. Norrie and M. Grossniklaus, eds. *Object databases*. Berlin: Springer, 132–148.
- Brandl, P., et al., 2009. Occlusion-aware menu design for digital tabletops. In: D.R. Olsen Jr., et al., eds. *ACM SIGCHI conference on human factors in computing systems*. Boston, MA: ACM Press, 3223–3228.
- Carpendale, S., 2008. Evaluating information visualizations. In: A. Kerren, et al., eds. *Information visualization: human centered issues and perspectives*. Berlin: Springer, 19–45.
- Cominelli S., Devillers R., Yurk H., MacGillivray A., McWhinnie L. et Canessa R. 2018. Noise exposure from commercial shipping for the southern resident killer whale population. *Marine Pollution Bulletin*, 136: 177-200.
- Cominelli S., Lehy M., Devillers R. et Hall B. 2019. Geovisualization tools to inform the management of vessel noise in support of species' conservation. *Ocean and Coastal Management*, 169 : 113-128.
- Davis, F.D., 1989. Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. *Management Information Systems*, 13 (3), 319–340.
- Enguehard R., Hoeber O. et Devillers R. 2012. Interactive exploration of movement data: A case study of geovisual analytics for fishing vessel analysis. *Information Visualization*, 12(1): 65-84.
- Enguehard R., Devillers R. et Hoeber O. 2013. Comparing interactive and automated mapping systems for supporting fisheries enforcement activities – A case study on Vessels Monitoring Systems (VMS). *Journal of Coastal Conservation*, 17(1): 105-119.

- Hägerstrand, T., 1970. What about people in regional science? *Papers of the Regional Science Association*, 24, 7–21.
- Harrower, M. and Sheesley, B., 2005. Designing better map interfaces: a framework for panning and zooming. *Transactions in GIS*, 9 (2), 77–89.
- Hornsby, K. and Egenhofer, M.J., 2002. Modeling objects over multiple granularities. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, 36, 177–194.
- Kraak, M.-J., 2003. The space-time cube revisited from a geovisualization perspective. In: *International cartographic conference*, 10–16 August, Durban, 10–16. Available from: http://icaci.org/files/documents/ICC_proceedings/ICC2003/Papers/255.pdf.
- Kwan, M.-P. and Lee, J., 2003. Geovisualization of human activity patterns using 3D GIS: A time-geographic approach. In: M.F. Goodchild and D.G. Janelle, eds. *Spatially integrated social science: examples in best practice*. Oxford: Oxford University Press, 48–66.
- Lee C., Devillers R. et Hoeber O. 2014. Navigating spatio-temporal data with temporal zoom and pan in a multi-touch environment. *International Journal of Geographic Information Science*, 28(5): 1128-1148.
- Mandelbrot BB. 1967. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. *Science*, 156(3775): 636-638.
- Neumann, A., 2010. *Spatial, temporal and thematic navigation: visualizing biographies of European artists using a task oriented user interface design approach*. Thesis (PhD). Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zurich.
- Peuquet, D.J., 1994. It's about time: a conceptual framework for the representation of temporal dynamics in geographic information systems. *Annals of the Association of American Geographers*, 84 (3), 441–461.
- Peuquet, D.J., 2002. *Representations of space and time*. New York: The Guilford Press.
- Peuquet, D.J. and Duan, N., 1995. An event-based spatiotemporal data model (ESTDM) for temporal analysis of geographical data. *International Journal of Geographical Information Systems*, 9 (1), 7–24.
- Sinton, D., 1978. The inherent structure of information as a constraint to analysis: mapped thematic data as a case study. *Harvard Papers on Geographic Information Systems*, 6, 1–17.
- Theiler J. Estimating fractal dimension. 1990. *J Opt Soc Am A*, 7(6): 1055-1073.

3 MARINE GEOMORPHOMETRY

3.1 INTRODUCTION

Geomatics and GIS are often used to help collect, manage, analyze, and visualize marine data. One of the geospatial data types typically used in the marine environment is digital elevation models (DEMs), and more specifically digital bathymetric models (DBMs). Bathymetric measurements have a long history that traces back to the antiquity, with evidences that Egyptians used lead lines to measure the depth of the Nile river in order to ensure safe navigation. Generally, bathymetric data became key to ensure safe navigation on the world's seas and oceans. Much like most countries have a national mapping agency in charge of producing topographic maps and other products, most countries also have a hydrographic service in charge of producing marine charts that can be used to inform mariners.

Beyond its benefit to navigation, bathymetric products are also increasingly useful to a number of other fields. For instance, those data are key to allow physical oceanographers to produce ocean current models. They have been extensively used in marine geology to understand geological properties and dynamics of sediments on the seafloor. They are also routinely used in marine ecology as a parameter that helps explain the distribution of marine species. Research on DBMs and mostly how they can be used in quantitative analyses is however not as mature as research making use of terrestrial DEMs. For instance, while physical geographers, including hydrographers, have been extensively using terrestrial DEMs to better model and understand surficial hydrology, work on the use of DEM in quantitative analyses in marine ecology is more anecdotal. Geomorphometry is a sub-discipline looking at those questions. It can be defined as the field that provide methods for quantitatively describing DEMs using attributes such as slope, orientation or rugosity. If the field of geomorphometry finds its origins in the first digital representations of terrestrial DEMs, little work has however been done in the marine environment to explore methods that could help generate value-added information from DEMs.

In this chapter, I provide an overview of two studies that I have conducted with Vincent Lecours, a former PhD student that worked under my supervision. Vincent Lecours came to our program with an undergraduate degree in geomatics and was interested in looking at methodological aspects of the field of marine geomatics. We presented our work at the international geomorphometry conference, being the only people at this conference looking at those methods in the marine environment. This encouraged Vincent and I to explore some key questions and provide some foundations for the field of marine geomorphometry, theme on which Vincent led the first review paper during his PhD (Lecours et al. 2016). Vincent published five journal papers as part of his PhD and I will focus here on two specific papers that looked at optimizing the selection of terrain attributes in environmental studies (Lecours et al. 2017a et b).

3.2 TOWARDS A FRAMEWORK FOR TERRAIN ATTRIBUTE SELECTION IN ENVIRONMENTAL STUDIES

3.2.1 Context

Combining georeferenced species data with environmental datasets has become common practice in environmental studies both in the terrestrial (Elith and Leathwick, 2009) and marine realms (Brown et al., 2011). Exploring species-environment relationships is important for habitat mapping, biogeographical classification, conservation, and management (Harris and Baker, 2012). Research in these fields has been fueled by progresses in remote sensing and Geographic Information Systems (GIS), along with the increase in data availability and computing power (Wiersma et al., 2011; Vierod et al., 2014). In parallel, these elements have motivated the development of geomorphometry (Bishop et al., 2012; Zhou and Zhu, 2013), the field that helps quantitatively describe digital terrain models (DTM) using terrain attributes such as slope, orientation or rugosity (Pike, 1995). Terrain attributes have been found to be linked with the distribution of many terrestrial and marine species in different types of environments (e.g. forests, agroecosystems, deep-sea, continental shelf) and are now routinely integrated in environmental studies (Bouchet et al., 2015; Lecours et al., 2016a). Other environmental disciplines that make use of terrain attributes include hydrology, soil mapping, vegetation mapping, geomorphology, meteorology and agriculture (Florinsky and Kuryakova, 1996; Florinsky et al., 2002; Lacroix et al., 2002; Hengl and Reuter, 2009; Schwanghart and Heckmann, 2012; Bispo et al., 2016).

Led by the increasing availability of different types of intuitive GIS tools that “automatically” derive terrain attributes from DTMs (Bishop et al., 2012; e.g. Klingseisen et al., 2008; Han et al., 2012; Rigol-Sanchez et al., 2015) - either digital elevation (DEM) or bathymetric (DBM) models - ecologists and other GIS users often select a small subset of terrain attributes to perform their analyses. Non-expert GIS users do not always understand the underpinnings of the numerous options available (Bishop and Shroder, 2004; Bouchet et al., 2015), and a lack of guidance can lead them to select an arbitrary and sub-optimal set of terrain attributes. Such selections are often based on the availability and simplicity of the GIS tools rather than on statistical grounds or ecological, biological, or geomorphological relevance. An inappropriate selection of terrain attributes can however produce results that do not accurately represent the observed phenomenon, fail to capture the key properties of the terrain relevant to the question or problem, and influence subsequent analysis (e.g. species-environment relationship measurements).

A same terrain attribute derived using different algorithms can also produce significantly different outcomes. For instance, Dolan and Lucieer (2014) demonstrated that five different slope algorithms derived from DBMs resulted in different slope surfaces, confirming previous work performed on DEMs (Jones, 1998a) and artificial surfaces (Jones, 1998b). Since the algorithms used by GIS tools are not always made explicit within the software, users are often left with little choice on which one to use and sometimes are not free to decide the details of particular parameters such as the neighbourhood size. These elements, combined

with the lack of explicit statements in the ecological literature of algorithms and parameters used for deriving terrain attributes (Dolan and Lucieer, 2014), may lead to misleading and incorrect comparisons of results from different studies. To add to the confusion, geomorphometry is a field recognized for its ambiguous terminology (Bishop et al., 2012), where terrain attributes measuring a same terrain characteristic can be named differently depending on the source or software.

Finally, a poor selection of terrain attributes may cause covariation between variables. Being all derivatives of the same DTM, terrain attributes are likely to covary and induce redundancy in the analysis (Pittman et al., 2009), violating the basic assumptions of many statistical analysis methods used. For instance, Rooper and Zimmermann (2007) calculated a correlation of 0.90 between their measures of slope and rugosity. Assessing covariation between variables is however rarely performed (Graham, 2003), despite being recognized to obscure the influence of individual drivers on a response variable, and to impact statistical models, species distribution models and regression analyses (Hijmans, 2012; Dormann et al., 2013).

Selecting a suitable set of independent variables, including terrain attributes, is essential to ensure robust analyses and increase reliability of results in environmental studies (King and Jackson, 1999). A theoretical and operational framework to geomorphometric analysis is still to be defined (Pike, 1995), and “the use of quantitative geomorphological knowledge must be revisited in an analytical framework” (Bishop et al., 2012, p.6).

This study bridged geomorphometry and environmental studies by proposing an operational framework that addresses the common issue of terrain attribute selection in environmental applications like ecology. It aimed to identify combinations of available terrain attributes that minimize covariation between attributes and optimize the information given on the characteristics of a terrain. The specific objectives were to 1) explore existing GIS software to compute available local terrain attributes, 2) identify groups of local terrain attributes that represent unique morphological terrain characteristics, 3) and explore the relationship between the importance of these groups and terrain complexity.

3.2.2 Approach and contributions

A summary of the methods used in our study is presented in Figure 3.1. First, artificial DBMs were generated and used to derive terrain attributes. Then, three iterative statistical methods were used to explore independence and both linear and non-linear relationships amongst terrain attributes: Principal Component Analysis (PCA), Variable Inflation Factor (VIF), and Mutual Information (MI).

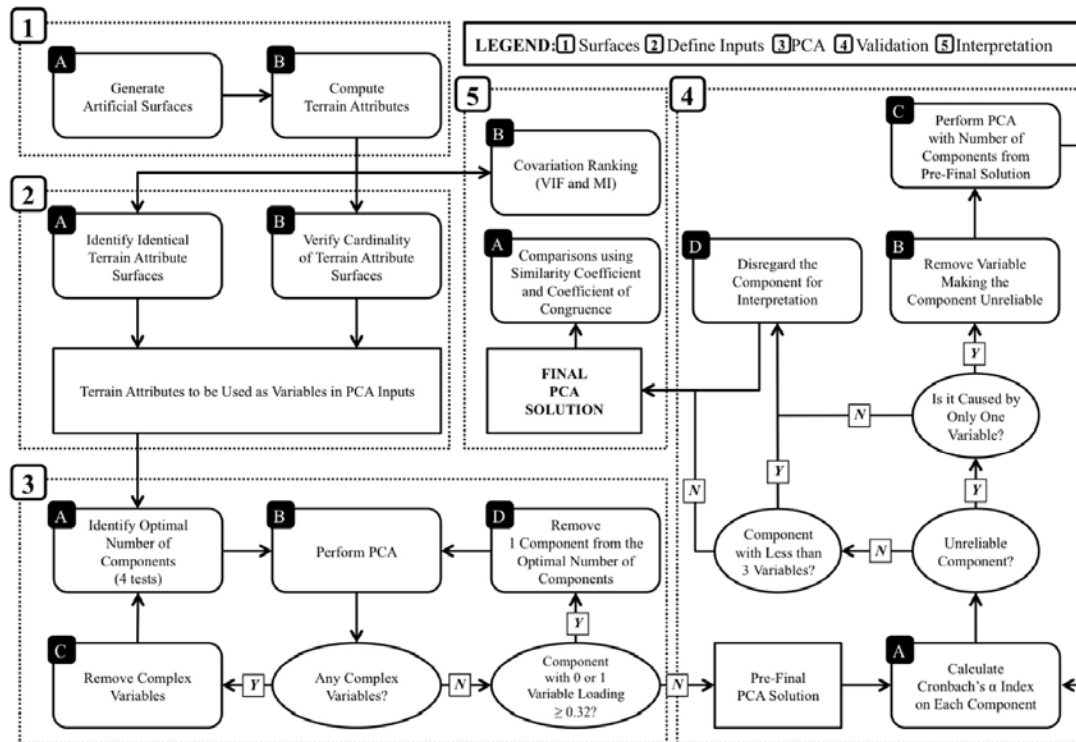


Figure 3.1. Conceptual model of the analysis performed on each artificial surface.

Artificial surfaces have proven to be valuable tools in ecology (With and King, 1997) and geomorphometry (Jones, 1998b). Since terrain attributes are sensitive to DTM errors and uncertainty (Raaflaub and Collins, 2006; Kinsey-Henderson and Wilkinson, 2013), artificial surfaces provide a controlled environment in which to test hypotheses (Halley et al., 2004). Nine artificial surfaces of 106m x 106m, with a 1m spatial resolution, and presenting different complexity levels were created using spectral synthesis in LandSerf 2.3 (step 1A in Figure 3.1; Figure 3.2). The spectral synthesis technique, developed by Peitgen and Saupe (1988), is one of the methods that provide the most realistic artificial landscapes (Chipperfield et al., 2011). It generates surfaces so that their correlative characteristics, which are studied in this study, are present at all spatial scales (Keitt, 2000). LandSerf requires a user-specified fractal dimension to create surfaces. Fractal dimension expresses and encodes the degree of complexity of objects (Dimri, 2005) and is a “useful simple summary of roughness distribution” that can be used to compare DTM characteristics (Lloyd, 2014, p.152). Fractal dimension was chosen to differentiate surfaces because of its scale-invariance properties (Pfeifer, 1984). These properties and the preservation of the correlative characteristics of the surfaces make results from this study generalizable to other surfaces with the same fractal dimension at different scales. The fractal dimension of the computed surfaces ranges from 2.06 to 2.79 (Figure 3.2), covering most complexity levels found in real terrain (2.20-2.60, Hofierka et al. (2009)) and other natural elements (2.28-2.61 in coral reefs, Zawada and Brock (2009)).

For each of the nine surfaces, 230 terrain attribute surfaces were derived (step 1B in Figure 3.1) using 11 different commercial and open-source software (Table 3.1). A 3 x 3 analysis window was used as several software packages use this

as default and do not allow modifying it. As commonly performed in ecology, measures of aspect (orientation) were transformed into northerness and easterness to remove circularity in the data (Olaya, 2009). To eliminate edge contamination, the outer 3m were removed from all resulting attribute surfaces, reducing the extent to 100m x 100m surfaces.

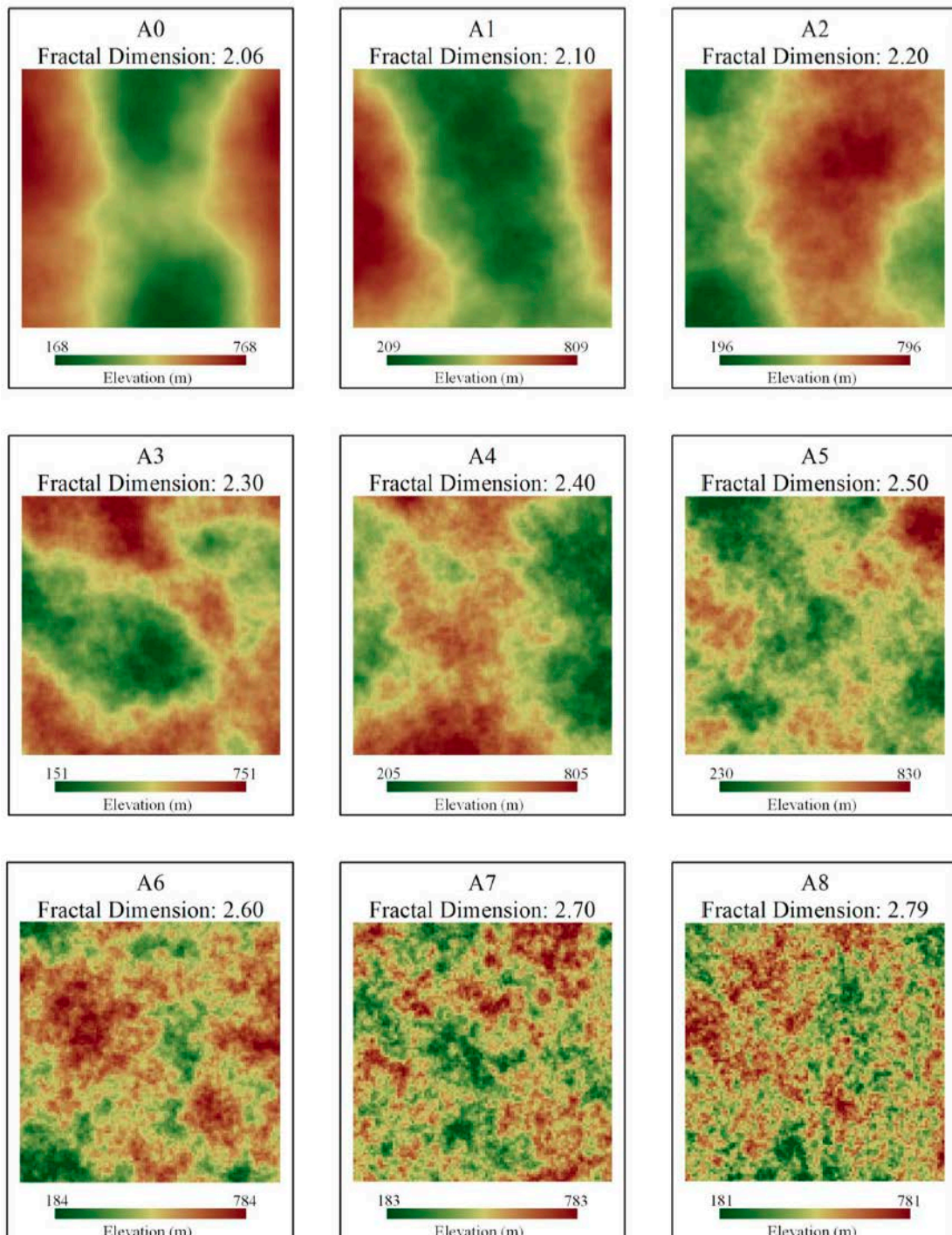


Figure 3.2. Artificial surfaces computed and analysed in this study, from least complex (A0) to most complex (A8).

Table 3.1. List of software used, number of terrain attributes that were computed using each of them, and percentage of these terrain attributes that reached the final PCA solution for each surface.

Software and versions	Number of attributes computed	Percentage of terrain attributes in the final solution									
		A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	
ArcGIS 10.2.2 with Python 2.7.8	22	86	91	82	77	73	77	77	82	82	
ArcGIS 10.2.2 with DEM Surface Tools (v.2.1.399)	17	82	76	76	76	71	65	65	71	65	
ArcGIS 10.2.2 with Benthic Terrain Modeler 3.0 rc3	12	83	92	83	83	83	83	83	83	67	
Diva-GIS 7.5.0	7	86	86	100	100	100	100	100	100	100	
Idrisi Selva 17.0	7	86	86	71	71	86	86	86	86	86	
LandSerf 2.3	12	75	58	58	58	58	50	50	42	42	
Quantum GIS 2.4.0 Chugiak	13	100	100	100	100	100	100	100	100	85	
SAGA GIS 2.0.8	96	76	74	80	80	78	58	71	68	66	
TNTmips Free 2014 (Microlimages)	25	100	100	80	84	96	56	92	84	80	
uDig 1.4.0b	9	89	100	78	67	78	78	78	56	56	
Whitebox GAT 3.2.1 Iguazu	10	90	90	100	90	90	70	80	80	70	
Total Number of Attributes:	230	83	83	81	80	81	67	77	74	70	

If the use of terrain attributes in environmental studies is now common, selecting an appropriate set of terrain attributes is a challenge rarely approached carefully in these studies. This can have potential consequences that can invalidate the analyses and not make the best use of terrain data. We conducted an extensive analysis to suggest a suitable selection of terrain attributes that optimizes the information derived from DTMs. Three methods were used to iteratively assess the relationships between 230 terrain attribute surfaces computed from nine artificial surfaces of different complexity using 11 different software packages (Figure 3.1). Results confirm that (1) different algorithms computing a same terrain attribute (e.g. slope, curvature) can produce different outcomes, that (2) terrain attributes are highly covarying, that (3) there is some ambiguity in the denomination of terrain attributes, and that (4) their selection for any application needs to be carefully performed.

Based on our analysis, we recommended the use of six local terrain attributes that optimize the local topographic structure accounted for when performing environmental studies: (1) relative difference to mean value (a measure of relative position), (2) local standard deviation (a measure of rugosity), (3) easternness and (4) northerness (measures of orientation), (5) local mean, and (6) slope (preferably computed with Horn's method). The proposed selection reduces redundancy, covariation and ambiguity, and improves generality and replicability, and can be applied across a wide range of terrain complexity. While the six proposed attributes can easily be computed using any GIS package, an ArcGIS toolbox was provided with this study to easily generate these attributes (Lecours, 2015). Our work has also identified unique terrain attributes that were not considered by the PCA analysis but that showed potential to represent different characteristics of a terrain and that needs to be further explored.

Our recommendations provided an operational framework to any users willing to incorporate topography or bathymetry and their derivatives (i.e. terrain attributes) in environmental models and analyses. While the six proposed attributes may not necessarily be useful for all applications and should be tested separately, for instance as effective surrogates, their combination ensures that the amount of topographic structure accounted for is optimized in the analysis. The proposed operational framework can help users make more robust analyses and bridge geomorphometry with disciplines like ecology, biogeography, habitat mapping and distribution modelling. Our conclusions highlight the importance to explicitly report

the software, algorithms, and parameters used to generate terrain attributes in ecological studies to allow careful interpretation of the results and comparison between studies. We also encourage software and tools developers to be explicit in their documentation or metadata about the methods or algorithms used by their products.

3.3 COMPARING SELECTIONS OF ENVIRONMENTAL VARIABLES FOR ECOLOGICAL STUDIES

3.3.1 Context

Section 3.2 presented a more theoretical approach, identifying a set of terrain attributes that can best capture unique properties of a DEM. This first study was conducted using artificial surfaces. Here, in a follow-up study published in the journal PLOS One (Lecours et al. 2017), we tested the theoretical approach of the first paper with real bathymetric data and with a real application. This allowed assessing if our initial approach helps identifying terrain attributes that can improve different types of models.

Choosing an appropriate selection of terrain attributes for specific ecological applications can be challenging, and users will often simply use the terrain attributes made available by the software they have access to or are familiar with, without further questioning if those attributes are the most appropriate ones for their study. In the previous section, we showed that many terrain attributes covary, something that can cause potential problems for many statistical analyses. In an attempt to identify an optimal combination of terrain attributes to use in ecology that would reduce covariation while extracting as much information as possible on the terrain, we recommended using a combination of six easily computable terrain attributes for ecological studies that consider topography or bathymetry: (1) relative deviation from mean value, which is a measure of relative position that can identify local peaks and valleys, (2) standard deviation, which is a measure of rugosity, (3) local mean, (4) slope, and (5–6) easternness and northerness, which together provide information on the orientation of the slope (i.e. aspect).

This follow-up study aimed to describe the effects of subjectively selecting input variables for ecological applications, with a particular focus on terrain attributes. The specific objectives were (1) to compare the performance of our recommended selection of terrain attributes to other selections in a real ecological context, (2) to demonstrate the relative importance of terrain morphology in aiding our understanding of ecological questions compared to other environmental variables, and (3) to report on the consequences of selecting different input variables on both the accuracy of habitat maps and the spatial distribution of the outputs.

3.3.2 Approach and contributions

This approach has been tested in the context of benthic habitat mapping and species distribution modeling, two types of studies that make use of bathymetric data and its derivatives. Benthic habitat mapping is the act of mapping

statistically/significantly distinct areas of the seafloor based on their physical, chemical and biological characteristics at particular spatial and temporal scales (Lecours et al. 2015). The marine environment presents particular challenges in observing and sampling seafloor characteristics. However, developments in acoustic remote sensing technologies, specifically multibeam echosounders (MBES), now allow the collection of high-resolution remotely sensed data of the seafloor. Bathymetric measurements from MBES can be used to generate DBMs, from which terrain attributes can be derived (Lecours et al. 2016). Additionally, MBES systems can also record acoustic reflectance (backscatter) data that provide information on seafloor properties (e.g. surficial geology, porosity). In combination, these attributes are commonly used for the production of benthic habitat maps. For the purpose of this study, two common approaches to habitat mapping were used: unsupervised and supervised classifications.

Datasets from Brown et al. (2012), covering 3,650 km² of German Bank, an area of the Canadian continental shelf off the province of Nova Scotia (Figure 3.3), were used to address the objectives of this study. These data comprised a 50m resolution DBM, 3190 geo-referenced underwater images of the seabed visually classified into five bottom types (i.e., glacial till, silt and mud, rippled silt, rippled sand, reef), 4816 geo-referenced sea scallop observations, and three backscatter data derivatives (Q1, Q2, Q3; Figure 3.3). Details on how the data were collected and processed can be found in Brown et al. (2012). For comparison with surfaces used in the previous section, the fractal dimension, which is a quantitative representation of surface complexity, was measured over 10,000 m² areas of German Bank. Values ranged from 2.09 to 2.93, thus including regions of low (towards 2.00), moderate and high complexities (towards 3.00).

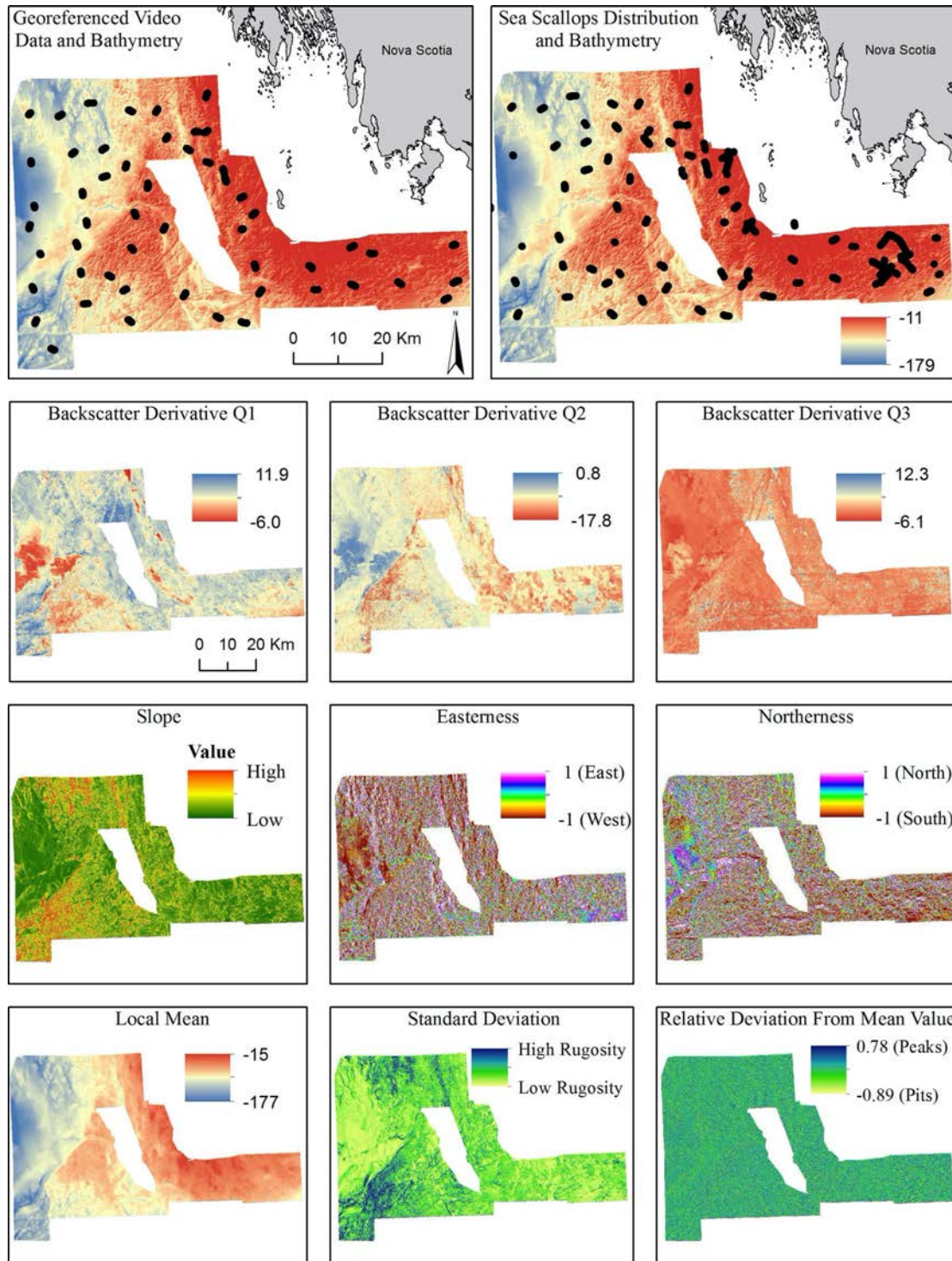


Figure 3.3. German Bank study area with some of the input variables used in this study: the ground-truth data for the bottom types, the sea scallops observations, the bathymetry, the three backscatter derivatives and the six terrain attributes from Selection 1.

A total of 24 different terrain attributes were derived from the DBM and grouped into seven selections of six terrain attributes each (Table 3.1). The terrain attributes were selected from groups of variables that exhibited various behaviours during the statistical analyses performed in Section 3.2 (see caption of Table 3.2). Selection 1 corresponds to our recommended selection of six terrain attributes. These terrain attributes were computed using the TASSE (Terrain Attribute Selection

for Spatial Ecology) toolbox for ArcGIS (Lecours 2015). Selections 2 to 7 were built to maximize variability and resemblance to Selection 1 (e.g. to avoid having two measures of slope or curvatures within one selection). Particular focus was also given to terrain attributes that were identified as potentially important in Section 3.2.

Table 3.2. Selections of terrain attributes used to build the habitat maps and models. The ID numbers refer to the work presented in Section 3.2 and allow finding the software and parameters with which the attributes were generated. Marker variables correspond to important variables; whether they were found on strong components (Sel. 1) or weak components (Sel. 4) is linked to the amount of topographic structure they accounted for. Variables with low cardinality (Sel. 2) did not have many different values, thus limiting their ability to explain slight variations in terrain morphology. Complex variables (Sel. 3) correspond to redundant variables. The terrain attributes identified by an asterisk were previously identified as potentially important. The underlined attributes were recommended in Section 3.2.

Selection 1		Selection 2		Selection 3		Selection 4	
<i>Marker Variables on Strong Components</i>		<i>Variables with Low Cardinality</i>		<i>Complex Variables</i>		<i>Marker Variables on Weak Components</i>	
ID31	<u>Easternness</u>	ID1	Bathymetric Position Index	ID70	Mean of Residuals*	ID132	Plan Curvature
ID67	<u>Local Mean</u>	ID2	Center vs Neighbor Variability*	ID116	Plan Curvature	ID153	Profile Curvature
ID90	<u>Northernness</u>	ID42	Easternness*	ID136	Profile Curvature	ID158	Representativeness*
ID157	<u>Relative Deviation from Mean Value</u>	ID101	Northernness*	ID178	Slope	ID188	Slope Variability
ID166	<u>Slope</u>	ID111	Percentile	ID201	Surface Roughness	ID219	Total Curvature
ID190	<u>Standard Deviation</u>	ID143	Profile Curvature	ID221	Value Range	ID227	Vector Ruggedness Index
Selection 5		Selection 6		Selection 7			
<i>Mix of Selections 1 and 2</i>		<i>Mix of Selections 1 and 3</i>		<i>Mix of Selections 1 and 4</i>			
ID1	Bathymetric Position Index	ID70	Mean of Residuals*	ID158	Representativeness*		
ID2	Center vs. Neighbor variability*	ID178	Slope	ID188	Slope Variability		
ID42	Easternness*	ID221	Value Range	ID227	Vector Ruggedness Index		
ID67	<u>Local Mean</u>	ID31	<u>Easternness</u>	ID67	<u>Local Mean</u>		
ID90	<u>Northernness</u>	ID90	<u>Northernness</u>	ID31	<u>Easternness</u>		
ID166	<u>Slope</u>	ID190	<u>Standard Deviation</u>	ID90	<u>Northernness</u>		

Scenario A: Each Selection used Alone (6 layers)

Scenario B: Each Selection used with Depth (7 layers)

Scenario C: Each Selection used with the Three Backscatter Derivatives (9 layers)

Selection D: Each Selection used with Depth and the Three Backscatter Derivatives (10 layers)

Biophysical classifications of the area were performed to create benthoscape maps (Zajac 2008), which are produced by following a landscape style approach like when landscape features are delineated from terrestrial datasets. This top-down, unsupervised approach to habitat mapping is often used to map features that can only be resolved within the remotely sensed data, without attempting to delineate features beyond what the remote sensing techniques are capable of resolving. A total of 29 benthoscape maps were built using the Modified k-Means unsupervised classification tool in Whitebox GAT v.3.2 "Iguazu". Algorithms such as k-means are commonly used in both terrestrial and marine ecological applications (Diesing et al. 2016), but this particular algorithm is different from the regular k-means ones as it does not require a subjective input from the user to define the number of classes. The algorithm first segments the MBES derived data layers into a liberal,

overestimated number of units, and then iteratively merges classes based on a pre-defined distance threshold between their cluster centres, eventually reaching an optimal, objective number of units. These units are then compared and subsequently recombined based on best match against independently classified *in situ* photographic data, classified into broad biophysical benthoscape classes. Using this approach, biophysical features can be delineated at a broader scale over the study area to generate a benthoscape map.

To assess the relative importance of the different environmental variables and the consequences of using different input variables in habitat mapping, four scenarios were tested with each of the seven selections, resulting in 28 habitat maps. Maps were first created using each selection alone (six input layers), then adding the bathymetry (seven layers), the three backscatter derivatives (nine layers), and finally both the bathymetry and the backscatter derivatives (ten layers). In order to quantify the relative influence of terrain morphology in potential habitat characterization of German Bank, an additional habitat map was produced using only the backscatter derivatives and the bathymetry (four layers, not accounting for terrain morphology).

Following the method outlined in Brown et al. (2012), the resulting clusters for each classification were spatially compared to the 3,190 photographs of the seabed. Clusters corresponding to the same habitat types were grouped together and mapped as the corresponding habitat types. Confusion matrices, summarizing agreement and disagreement between the ground-truth data and the results from the classified bottom types (Jensen 2005), were built to compute the overall accuracy and kappa coefficient of agreement of each habitat map. The two measures are commonly used in ecology (Boyce et al. 2002) and in remote sensing (Jensen 2005; Congalton 1991). The success of the discrimination of each individual bottom type by the 29 classifications was assessed using the producer's accuracy (Jensen 2005), and a spatial comparison of the outputs was made to assess the amplitude of change caused by selecting different variables. This was quantified using the percentage of pixels that were classified as the same bottom type by different classifications.

The performances of the 58 maps were quantified and compared to evaluate the effectiveness of the various combinations of environmental variables. One of the combinations of terrain attributes recommended in Section 3.2 and that includes a measure of relative position, slope, two measures of orientation, topographic mean and a measure of rugosity yielded better results than the other selections for both methodologies, confirming that they together best describe terrain properties. Important differences in performance (up to 47% in accuracy measurement) and spatial outputs (up to 58% in spatial distribution of habitats) highlighted the importance of carefully selecting variables for ecological applications.

This study demonstrated the importance of carefully selecting variables for ecological work; maps and models that perform similarly can still produce very different spatial outcomes, which can have important implications when these maps and models are used in decision-making for conservation and management. Using two different approaches to habitat mapping, this study also confirmed that the

selection of terrain attributes recommended in Section 3.2 performs better than other selections, thus serving as a guide to make better use of geomorphometry in ecology. Results also showed that while this selection of terrain attributes ensures that most of the local topographic structure is captured when performing terrestrial or marine ecological studies, and while terrain morphology can help improve maps and models, it is not always the most important environmental factor for all ecological applications. The relationship between terrain morphology and ecological phenomena is species, area and scale-dependent (Lecours et al. 2015). The use of the proposed selection of terrain attributes, in combination with other environmental variables (e.g. precipitations, climate, currents), will help ecologists produce more robust analyses and generate maps and models with a higher degree of confidence. In order to get the best representation of the environment as possible and to best inform policy, conservation and management efforts, we recommend (1) that stakeholders prepare more than a single map using different combinations of environmental variables, and (2) that they select the best outcome based on map accuracy or model performance quantification.

3.4 REFERENCES

- Bishop, M.P., James, L.A., Shroder Jr., J.F., Walsh, S.J., 2012. Geospatial technologies and digital geomorphological mapping: concepts, issues and research. *Geomorphology* 137, 5e26.
- Bishop, M.P., Shroder Jr., J.F., 2004. GIScience and mountain geomorphology: overview, feedbacks, and research directions. In: Bishop, M.P., Schroder Jr., J.F. (Eds.), *Geographic Information Science and Mountain Geomorphology*. Springer-Praxis, Chichester, pp. 1e31.
- Bispo, P.C., Santos, J.R., Valeriano, M.M., Graça, P.M.L., Balzter, H., França, H., Bispo, P.C., 2016. Predictive models of primary tropical forest structure from geomorphometric variables based on SRTM in the Tapajos Region, Brazilian Amazon. *PLoS One* 11, e0152009.
- Bouchet, P.J., Meeuwig, J.J., Kent, C.P.S., Letessier, T.B., Jenner, C.K., 2015. Topographic determinants of mobile vertebrate predator hotspots: current knowledge and future directions. *Biol. Rev.* 90, 699e728.
- Boyce MS, Vernier PR, Nielsen SE, Schmiegelow FKA., 2002. Evaluating resource selection functions. *Ecol Model.* 157:281–300.
- Brown CJ, Sameoto JA, Smith SJ., 2012. Multiple methods, maps, and management applications: purpose made seafloor maps in support of ocean management. *J Sea Res.*, 72:1–13.
- Brown, C.J., Smith, S.J., Lawton, P., Anderson, J.T., 2011. Benthic habitat mapping: a review of progress towards improved understanding of the spatial ecology of the seafloor using acoustic techniques. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 92, 502e520.
- Congalton RG., 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sens Environ.* 37:35–46.
- Diesing M, Mitchell P, Stephens D., 2016. Image-based seabed classification: what can we learn from terrestrial remote sensing? *ICES J Mar Sci.*
- Dimri, V.P., 2005. Fractals in geophysics and seismology e an introduction. In: Dimri, V.P. (Ed.), *Fractal Behaviour of the Earth System*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 1e22.
- Dolan, M.F.J., Lucieer, V.L., 2014. Variation and uncertainty in bathymetric slope calculations using geographic information systems. *Mar. Geod.* 37, 187e219.
- Dormann, C.F., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, C., Carl, G., Carré, G., García Marquez, J.R., Gruber, B., Lafourcade, B., Leitaó, P.J., Münkemüller, T., McClean, C., Osborne, P.E., Reineking, B., Schroder, B., Skidmore, A.K., Zurell, D., Lautenbach, S., 2013. Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography* 36, 27e46.
- Elith, J., Leathwick, J.R., 2009. Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 40, 677e697.
- Florinsky, I.V., Eilers, R.G., Manning, G.R., Fuller, L.G., 2002. Prediction of soil properties by digital terrain modelling. *Environ. Model. Softw.* 17, 295e311.

- Florinsky, I.V., Kuryakova, G.A., 1996. Influence of topography on some vegetation cover properties. *Catena* 27, 123e141.
- Graham, M.H., 2003. Confronting multicollinearity in ecological multiple regression. *Ecology* 84, 2809e2815.
- Halley, J.M., Hartley, S., Kallimanis, A.S., Kunin, W.E., Lennon, J.J., Sgardelis, S.P., 2004. Uses and abuses of fractal methodology in ecology. *Ecol. Lett.* 7, 254e271.
- Han, W., Di, L., Zhao, P., Shao, Y., 2012. DEM Explorer: an online interoperable DEM data sharing and analysis system. *Environ. Model. Softw.* 38, 101e107.
- Harris, P.T., Baker, E.K., 2012. *Seafloor Geomorphology as Benthic Habitat: GeoHab Atlas of Seafloor Geomorphic Features and Benthic Habitats*. Elsevier, Amsterdam.
- Hengl, T., Reuter, H.I., 2009. *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Developments in Soil Science, 33. Elsevier, Amsterdam.
- Hijmans, R.J., 2012. Cross-validation of species distribution models: removing spatial bias and calibration with a null model. *Ecology* 36, 27e46.
- Hofierka, J., Mitasova, H., Neteler, M., 2009. Geomorphometry in GRASS GIS. In: Hengl, T., Reuter, H.I. (Eds.), *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Elsevier Science, Amsterdam, pp. 387e410.
- Jensen JR., 2005. *Introductory digital image processing, a remote sensing perspective*. 3rd ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall.
- Jones, K.H., 1998a. A comparison of algorithms used to compute hill slope as a property of the DEM. *Comput. Geosciences* 24, 315e323.
- Jones, K.H., 1998b. A comparison of two approaches to ranking algorithms used to compute hill slopes. *Geoinformatica* 2, 235e256.
- Keitt, T.H., 2000. Spectral representation of neutral landscapes. *Landsc. Ecol.* 15, 479e493.
- King, J.R., Jackson, D.A., 1999. Variable selection in large environmental data sets using principal components analysis. *Environmetrics* 10, 67e77.
- Klingseisen, B., Metternicht, G., Paulus, G., 2008. Geomorphometric landscape analysis using a semi-automated GIS-approach. *Environ. Model. Softw.* 23, 109e121.
- Lacroix, M.P., Martz, L.W., Kite, G.W., Grabrecht, J., 2002. Using digital terrain analysis modeling techniques for the parametrization of a hydrologic model. *Environ. Model. Softw.* 17, 127e136.
- Lecours, V., 2015. *Terrain Attribute Selection for Spatial Ecology (TASSE)*, V. 1.0. www.marinegis.com.
- Lecours V., Devillers R., Simms A.E., Lucieer V.L. et Brown C.J. 2017a. Towards a Framework for Terrain Attribute Selection in Environmental Studies. *Environmental Modelling & Software*, 89: 19-30.
- Lecours, V., Brown, C.J., Devillers, R., Lucieer, V.L., Edinger, E.N., 2017b. Comparing selections of environmental variables for ecological studies: a focus on terrain attributes. *PLoS One*. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0167128>.
- Lecours V, Devillers R, Schneider DC, Lucieer VL, Brown CJ, Edinger EN. 2015 Spatial scale and geographic context in benthic habitat mapping: review and future directions. *Mar Ecol Prog Ser*. 535:259– 284.
- Lecours, V., Dolan, M.F.J., Micallef, A., Lucieer, V.L., 2016. A review of marine geomorphometry, the quantitative study of the seafloor. *Hydrology Earth Syst. Sci.* 20, 3207e3244.
- Lloyd, C.D., 2014. *Exploring Spatial Scale in Geography*. Wiley, United States.
- Olaya, V., 2009. Basic land-surface parameters. In: Hengl, T., Reuter, H.I. (Eds.), *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Elsevier Science, Amsterdam, pp. 141e169.
- Peitgen, H.O., Saupe, D., 1988. *The Science of Fractal Images*. Springer-Verlag, New York.
- Pfeifer, P., 1984. Fractal dimension as working tool for surface-roughness problems. *Appl. Surf. Sci.* 18, 146e164.
- Pike, R.J., 1995. Geomorphometry: progress, practice, and prospect. *Z. für Geomorphol.* 101, 221e238.
- Pittman, S.J., Costa, B.M., Battista, T.A., 2009. Using lidar bathymetric and boosted regression trees to predict the diversity and abundance of fish and corals. *J. Coast. Res.* 53, 27e38.
- Raaflaub, L.D., Collins, M.J., 2006. The effect of error in gridded digital elevation models on the estimation of topographic parameters. *Environ. Model. Softw.* 21, 710e732.

- Rigol-Sanchez, J.P., Stuart, N., Pulido-Bosch, A., 2015. ArcGeomorphometry: a toolbox for geomorphometric characterisation of DEMs in the ArcGIS environment. *Comput. Geosciences* 85, 155e163.
- Rooper, C.N., Zimmermann, M., 2007. A bottom-up methodology for integrating underwater video and acoustic mapping for seafloor substrate classification. *Cont. Shelf Res.* 27, 947e957.
- Schwanghart, W., Heckmann, T., 2012. Fuzzy delineation of drainage basins through probabilistic interpretation of diverging flow algorithms. *Environ. Model. Softw.* 33, 106e113.
- Vierod, A.D.T., Guinotte, J.M., Davies, A.J., 2014. Predicting the distribution of vulnerable marine ecosystems in the deep sea using presence-background models. *Deep-Sea Res. II* 99, 6e18.
- Wiersma, Y.F., Huettmann, F., Drew, C.A., 2011. Introduction. landscape modeling of species and their habitats: history, uncertainty, and complexity. In: Drew, C.A., Wiersma, Y.F., Huettmann, F. (Eds.), *Predictive Species and Habitat Modeling in Landscape Ecology*. Springer, New York, pp. 1e6.
- Zajac RN., 2008. Challenges in marine, soft-sediment benthoscape ecology. *Landscape Ecol.* 23:7–18.
- Zawada, D.G., Brock, J.C., 2009. A multiscale analysis of coral reef topographic complexity using lidar-derived bathymetry. *J. Coast. Res.* 53, 6e15.
- Zhou, Q., Zhu, A.X., 2013. The recent advancement in digital terrain analysis and modeling. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* 27, 1269e1271.

4 CROWDSOURCING OF MARINE DATA

4.1 CROWDSOURCED REGIONAL BATHYMETRY

4.1.1 Context

Studying benthic environments (i.e. on the seafloor and in sub-surface layers) often involves studying patterns and processes that shape the seabed itself (i.e. geomorphology). The relationship between a species or a community and their environment is fundamental to the concept of habitat (Odum and Kroodsmas 1976; Di Stefano and Mayer 2018). For many marine species, depth, substrate type, and seafloor shape are very important factors in that relationship (Harris and Baker 2012). Seafloor mapping is also an important part of marine geo-hazard assessment (Hough et al. 2011). Submarine landslides can trigger tsunamis and flood events, resulting in considerable infrastructure damage and loss of life (Liverman et al. 2000). DBMs are commonly used to identify geomorphic features through manual expert interpretation, or the application of automated or semi-automated classification tools (Lecours et al. 2016; MacMillan and Shary 2009). Analyses of seafloor geomorphology and geomorphometry have been used to identify tsunamigenic landslides (Casalbore et al. 2011), to study mass transport complexes (Rovere et al. 2014), and to identify the triggers and frequency of submarine slope failures (Deering et al. 2018). As a result, bathymetric maps and their derivatives have become key sources of information used to inform various ocean management decisions.

The most widely used seafloor dataset is the General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO¹). GEBCO bathymetry is an international compilation of satellite altimetry and, where available, single or multibeam echo sounding data (Weatherall et al. 2015), made available for free as a 30-arc second world grid (approximately 925m resolution at the equator). GEBCO provides an excellent resource for mapping large seafloor features (p.ex. continental shelves, large deep sea trenches, seamounts) and tectonic processes (p.ex. seafloor spreading zones). However, due to the relatively low spatial resolution associated with satellite altimetry (Mayer et al. 2018), these data are too coarse to answer many research questions. Multibeam echosounding tends to be the method of choice when collecting high resolution bathymetric data. Di Stefano and Mayer (2018) commented that multibeam has become “one of the most valuable tools to study seafloor habitat”. However, collection of multibeam data is expensive and time-consuming. While many countries are working to increase bathymetric surveys, continuous high-resolution multibeam coverage is currently only available for approximately 9% of the seafloor (Mayer et al. 2018). It is estimated that, with current technology, it would take over 900 ship years to achieve full MBES coverage of the global oceans (Weatherall et al. 2015).

¹ <https://www.gebco.net/>

Alternative approaches to bathymetric data collection can help meet current information needs. Our study focused on the potential benefits of crowd-sourced seafloor mapping, a relatively recent field of study with the capacity to provide large amounts of data at minimal cost (Montella et al. 2017). With a sufficiently large participating community, crowd-sourcing is a very efficient way to collect large amounts of data. Furthermore, repeated sampling by different actors helps reduce overall error rate and size (Heipke 2010; Raymond 1999). At sea, large numbers of fishing vessels routinely collect depth soundings for navigation and selection of fishing grounds, providing an opportunity to crowd-source bathymetry in many regions (e.g. continental shelves where fishing activity is prevalent). Since 1997, Olex AS has commercialized a charting system that allows fishing vessels to record and share bathymetry with other participating vessels. In many areas, these shared soundings provide higher resolution bathymetry than existing navigational charts or regional datasets. Our study reported on the first study that has, to our knowledge, accessed Olex point data and used them outside the proprietary system. Here, we leverage crowd-sourced depth soundings to map bathymetry and terrain attributes of the Newfoundland and Labrador shelves, Eastern Canada, with the goal of supporting future ecological research and marine spatial planning.

We interpolated Olex data over an area of approximately 673,000 km² and tested the accuracy of the resulting bathymetry against independent depth data provided by the department of Fisheries and Oceans Canada. The interpolated bathymetry we have produced is a 75 m grid; over 100 times finer than existing GEBCO data which is the best bathymetry for most of this region. In this study, we described the geostatistical methods used to generate continuous bathymetry. We also provided examples of how crowd-sourced bathymetry can contribute to an improved understanding of the region through the quantification of terrain attributes, classification of bedforms, and identification of previously unmapped tributary canyons. This work opened the door to various applications in marine ecology, conservation, resource management, marine geology, and oceanography.

4.1.2 Approach and contributions

Olex AS² provides a commercial charting system that allows fishing vessels to collect and share bathymetric data. The equipment used by participating vessels ranges from survey-grade multibeam to single-beam fish-finders and all soundings are georeferenced by global positioning systems (GPS). Each vessel has the option of sharing their depth soundings with Olex AS, and in return they gain access to the rest of the crowd-sourced database. To date, Olex has compiled over 8.6 billion depth measurements from approximately 10 000 vessels globally, making it the largest existing crowd-sourcing initiative for bathymetric data. For this study, processed Olex bathymetry data for the Newfoundland and Labrador waters of Canada's east coast were made available as XYZ points.

Olex data available for the Newfoundland and Labrador region extends from 60° W to 43.36° W and from 42.73° N to 65° N. Olex sounding density is a function of

² <http://www.oceandtm.com/olex.html>

the distribution of fishing vessels, and is extremely variable throughout the region. Areas with fewer than 100 data points per 10 km² were excluded from further processing as this level of sampling was insufficient to inform the interpolation. This exclusion resulted in some gaps in the final bathymetric coverage.

Interpolation of the Olex data was carried out using Empirical Bayesian Kriging (EBK), a geostatistical interpolation technique that estimates the spatial relationship of the input data (defined by a semivariogram) through many iterative models that are weighted and combined using Bayes Theorem (Zou et al. 2015; Krivorouchko 2012). This method was tested using ArcGIS Pro 2.0 to produce a spatially continuous 75m bathymetric grid. The grid resolution was selected based on multiple interpolation tests made in sample areas characterized by variable data density, using a range of spatial resolutions. A grid resolution of 75m offered the best compromise between a high spatial resolution and a reduction of interpolation artefacts in areas of low data density. As Olex data points were dense along fishing vessel trajectories but absent elsewhere, the interpolation method provided a robust method for filling most of the gaps that have not been sampled by vessels. Unlike many other interpolation algorithms, EBK is able to handle moderate non-stationarity in the data, and the use of iterative semivariograms (100 per local model for this study) allows for more accurate estimation of standard error and produces high accuracy bathymetric interpolation (Krivorouchko 2012; Danielson et al. 2016). For stationary data, the mean and the semivariogram are constant throughout the data extent, however the assumption of stationarity is rarely proven for real-world data (Danielson et al. 2016).

The input Olex data were first divided into 129 spatial subsets of 100x100 km with 2.5% overlap to reduce processing time and non-stationarity within each subset. Each 100x100km subset was run through the EBK protocol independently (Figure 4.1). All input data were transformed (log-empirical) to prevent positive interpolated values (i.e. values above the water surface). The input data were divided into local model subsets of 500 data points and a semivariogram was derived for each of them. A K-Bessel semivariogram was selected based on best fit to the dataset calculated in the ArcGIS Pro 2.0 Geostatistical Wizard. Each derived semivariogram model was used to simulate new data for each known depth value. This iterative semivariogram simulation process was repeated 100 times for each local model and Bayes' rule was applied to assign a weight to each semivariogram, based on how well the observed value was estimated from that semivariogram. This produced a weighted distribution of 100 semivariograms which was used to interpolate unknown depth values within the neighbourhood of each local model (Krivorouchko 2012). Neighbouring models were assigned high overlap (overlap factor = 5). A single data point may be included in several local models, and the overlap factor determines the degree of overlap between neighboring models. A higher overlap factor delivers a smoother output surface, but requires more processing time.

The output for each kriging window was cropped by 2.5% to remove depth estimates influenced by edge effect and to remove overlaps between analysis windows. Standard error of the interpolated values was also calculated, and all pixels with a standard error >10 m were excluded from further processing as a quality

control measure. Cropped kriging windows were assembled in a mosaic with blended seam lines in ArcGIS Pro 2.0.

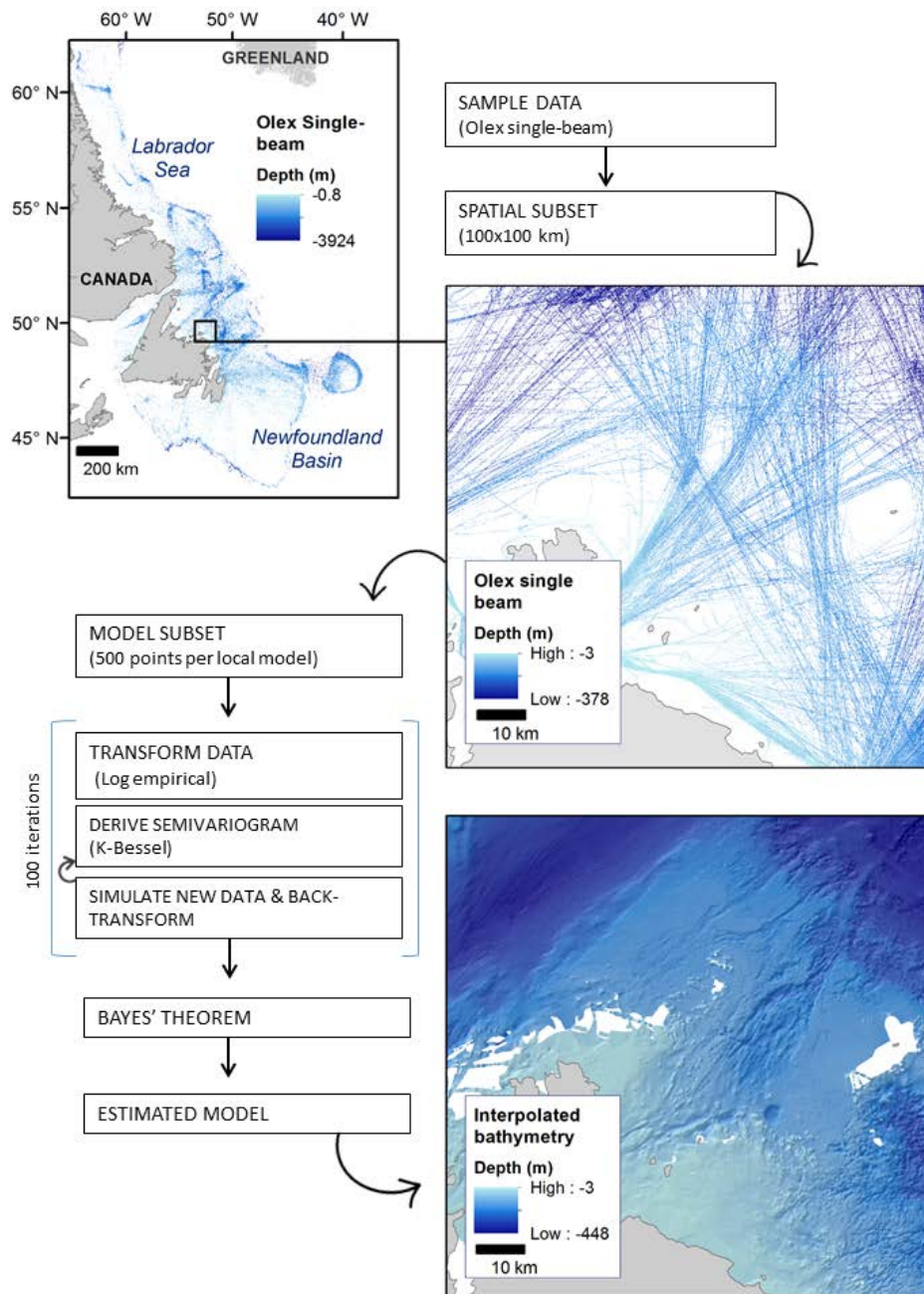


Figure 4.1. Conceptual diagram of the Empirical Bayesian Kriging process as employed in ArcGIS Pro 2.0.

Validation of the resulting bathymetric surface was achieved through a comparison of interpolated depth values to the GEBCO_2014 Grid, version 20150318 (GEBCO 2015) and analysis of correlation between the interpolated bathymetry and independent depth data. Single-beam depth soundings (Schlaginweit 1993) provided

by Fisheries and Oceans Canada were used for this validation, as they represent an independent source of bathymetry collected at a resolution comparable to Olex over a large portion of the study area but along different vessels trajectories.

The work presented in Section 3.2 demonstrated that six terrain attributes capture the majority of seafloor topographic structure. As shown in Section 3.3, this combination of terrain attributes outperforms alternative combinations when used as abiotic surrogates for predictive marine habitat mapping. Based on these recommendations, those five terrain attributes were derived from interpolated bathymetry for our study area: bathymetric position index (a measure of relative position), two measures of rugosity (standard deviation and vector ruggedness measure), slope orientation (easterness and northerness), local mean, and slope. All bathymetric derivatives were calculated using ArcGIS Benthic Terrain Modeler toolbox (Walbridge et al. 2018), executed in ArcGIS 10.5, with the exception of local bathymetric mean, which was calculated using the focal statistics tool in ArcGIS Pro 2.0. Areas of low, moderate, and high seafloor relief were mapped by classifying the multiscale bathymetric standard deviation layer based on Jenks Natural Breaks, an approach that was adapted from Harris et al. (2014).

The *r.geomorphons* tool (Jasiewicz et al. 2013) was used in GRASS GIS 7.4 to classify specific geomorphometry based on ten of the most frequent landforms (i.e., flats, slopes, shoulders, foot slopes, spurs, valleys, hollows, ridges, peaks and pits). This tool identifies landforms based on elevation differences between the central pixel of an analysis window and its surrounding pixels. In a recent comparison of automated seafloor classification methods, *r.geomorphons* was identified as a scale-flexible and robust method that is appropriate for identification of marine bedforms (Di Stefano and Mayer 2018).

In addition to the terrain forms classified by *r.geomorphons*, a semi-automated approach was developed to identify shelf incising canyons in order to illustrate how the higher resolution bathymetry can be used to generate new information in the study region. This novel approach involves a two-step hierarchical bathymetric position index (BPI) classification. Areas identified as terrain lows through Broad scale BPI were manually filtered to isolate the shelf edge. This layer was used to spatially constrain a second, finer scale BPI classification with an inner search radius of 5 cells (375m) and an outer search radius of analysis of 15 cells (1125m). These parameters were informed by the measurement of 10 manually identified submarine canyons. Further filtering was required to exclude non-elongated features (i.e. non-linear and non-dendritic) and elongated features oriented parallel to the shelf edge.

Following this approach, a continuous bathymetric grid was generated for a total area of 672,900 km². The interpolated bathymetry reaches up to 647 km offshore, ranges from 1m to 2133m depth and extends from 60.06° W to 43.72 ° W and from 42.74°N to 61.95°N. This represents 56% of the total Atlantic Canadian continental shelf (Global Affairs Canada 2013) and covers approximately 70% of the Newfoundland and Labrador Shelf Large Marine Ecosystem (Sherman et Hempel 2008).

Spearman's correlation between the interpolated bathymetry and independent depth data (n= 1,796,313 test points) was both very high (0.99) and significant (p<0.001). This calculation was repeated specifically for areas where interpolated bathymetry was informed by low sounding density, as this is where bathymetric artefacts are expected to be most prevalent. Correlation was similarly high (0.95) and significant (p<0.001) when only validation data points over areas of low Olex sounding density were tested (n=427,633 test points).

Bathymetric profiles of tunnel valleys on the Grand Bank were also used to compare the interpolated bathymetry to the previously available GEBCO grid (Figure 4.2). The two independent datasets show close agreement on the larger features, despite the difference in collection method and resolution (Figure 4.2, Profile 1). However, the interpolated bathymetry is able to capture the much finer seafloor features that are not visible in the GEBCO grid (Figure 4.2, Profile 2).

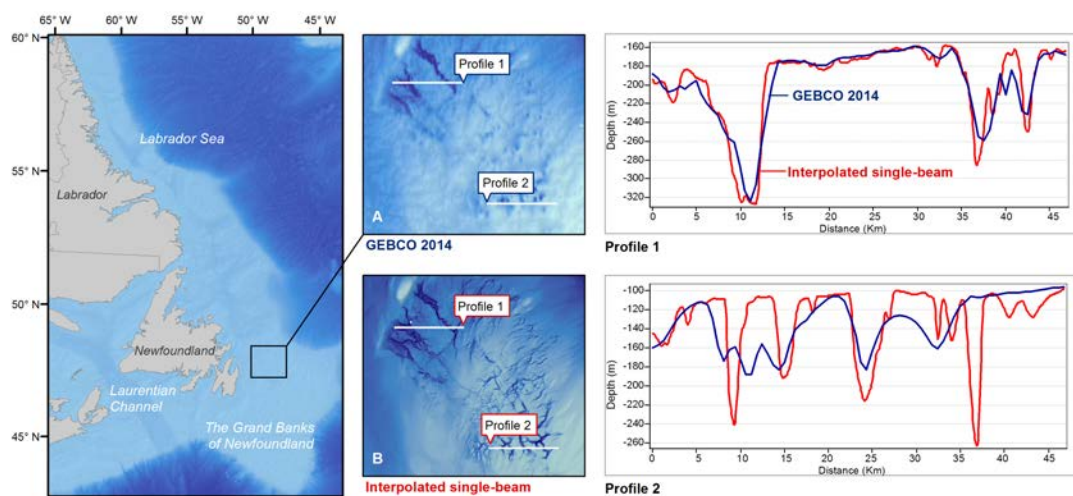


Figure 4.2. Bathymetric surfaces and horizontal depth profiles of tunnel valley systems on the Grand Banks of Newfoundland. (A) General Bathymetric Chart of the Oceans (approx. 930 x 630 m grid at this latitude) and (B) the interpolated bathymetry (75 x 75 m grid).

Terrain attributes - slope, BPI, standard deviation, rugosity, and aspect (i.e. easternness and northerness) - were generated at multiple spatial scales (examples shown in Figure 4.3). The highest slopes and greatest terrain variation (bathymetric position index, bathymetric standard deviation and VRM) occur near the coast, on the shelf edge, and in on-shelf tunnel valleys.

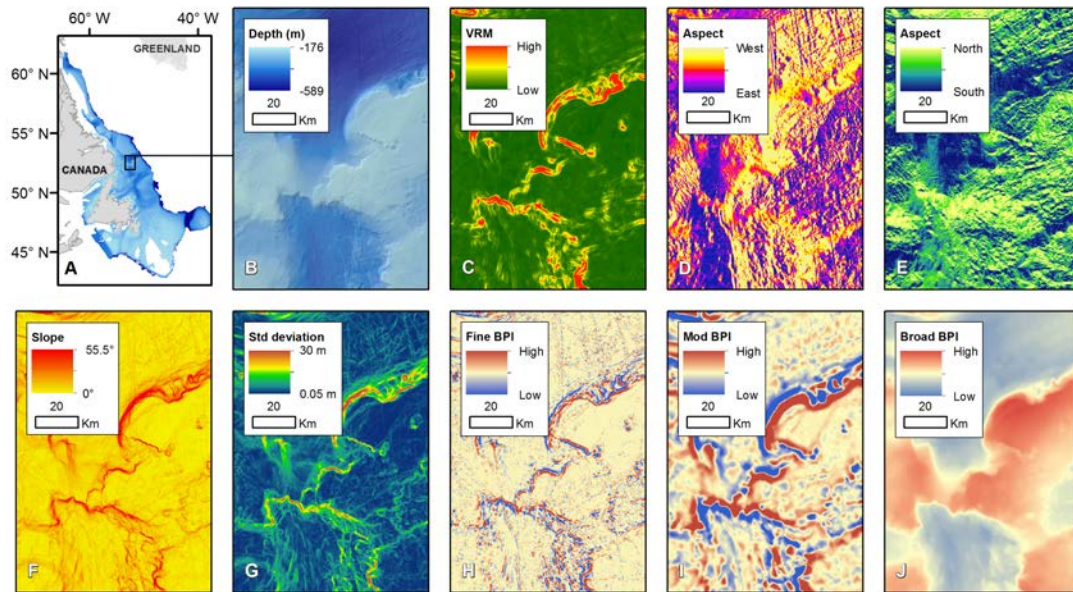


Figure 4.3. Study area and terrain attributes calculated with Benthic Terrain Modeler 3.0. (A) footprint of interpolated bathymetry, (B) interpolated bathymetry (75 m), (C) Vector Ruggedness Measure (multiscale), (D) Aspect quantified as easternness (multiscale), (E) Aspect quantified as northerness (multiscale), (F) Slope (multiscale), (G) Rugosity, quantified as standard bathymetric deviation (multiscale), (H) Fine BPI (75 m), (I) Moderate BPI (multiscale), and (J) Broad BPI (1200 m).

The majority of the Newfoundland shelf (84.5%) was classified as flat or low relief based on bathymetric standard deviation values of <3.7 m (Figure 4.4A). Areas of moderate (3.7-14.9 m) and high relief (> 14.9 m) are relatively rare (11.7% and 2.0% of the study area respectively), and are concentrated near the coast, on the shelf edge, and around discrete on-shelf features, like banks and glacial troughs.

The r.geomorphons terrain classifications were generated at multiple spatial scales; the broadest scale is discussed here (Figure 4.4C), however all outputs are included as supporting information. As indicated by the classification of seafloor relief, flat areas are the most prevalent geomorphologic phenotype, accounting for 43.5% of the study area (292,898 km²). Slopes are the second most prevalent features, making up 24.3% of the study area (164,159 km²), followed by shoulders (9.2%, 62,017 km²), and foot slopes (6.9%, 6277 km²). Spurs, valleys, hollows, and ridges are roughly equally prevalent in coverage (3.6-4.0%, 24,268-27,243 km²). Peaks and pits are the rarest terrain types, covering 0.3% (2098 km²) and 0.4% (3115 km²) of the study area respectively.

Submarine canyons are steep-sided, V-shaped valleys that cross the continental slope, with heads at or near the shelf edge (Amblas et al. 2018). We identified canyons through a novel semi-automated, hierarchical classification of BPI that extracted narrow valleys perpendicular to the edge of the Newfoundland and Labrador shelves. Canyon features were mapped over 1852 km² of the study area, concentrated on the southern shelf break (Figure 4.4B). The features we identified

are highly dendritic and several polygons may form tributaries that join and connect to a single, larger canyon.

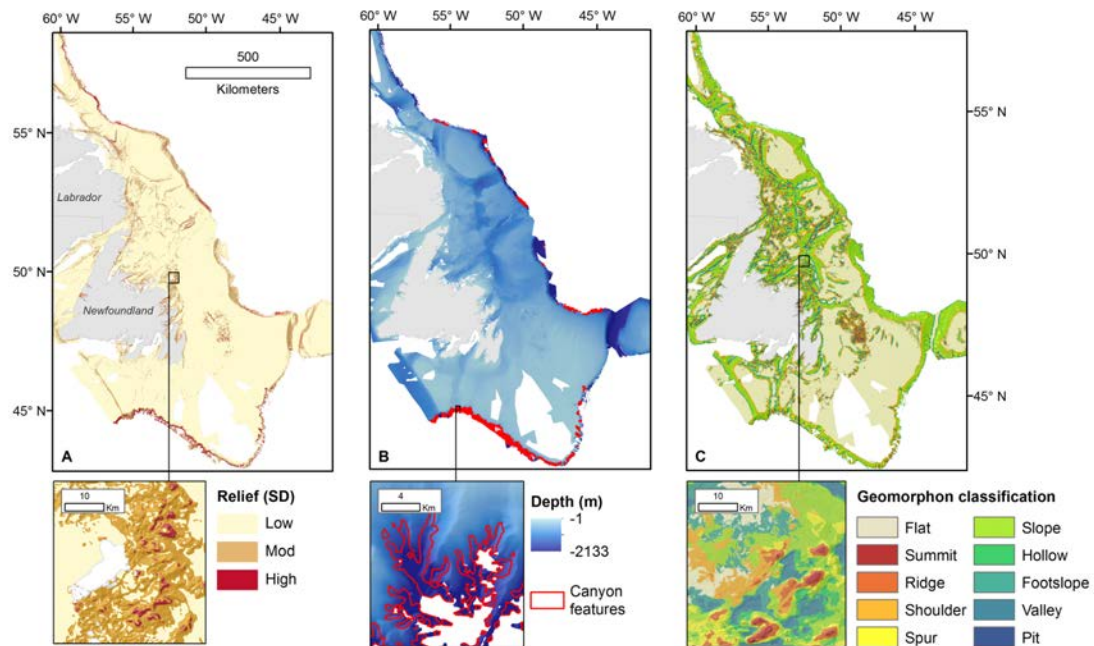


Figure 4.4. Geomorphometric classification of interpolated bathymetry for the Newfoundland and Labrador shelves: (A) Seafloor relief based on multiscale bathymetric standard deviation, (B) submarine canyons, and (C) geomorphologic phenotype.

The mean water depth within mapped canyon features is -973m, and the deepest point of each feature ranges from -270m to -1960m. Canyon depth from flank to thalweg ranges from 5-1265m; the mean canyon depth is 128m. Although slope was not explicitly included in our classification, the use of BPI to extract valleys implicitly requires relatively high slope around each feature. Average slope within the mapped canyon features (14°) is much higher than mean slope for the rest of the study area (0.74°) and canyon walls reach slopes of $50-65^\circ$. Most of these canyon features are too small to be identified by GEBCO bathymetry (Figure 4.5) and many appear to be tributary canyons (Amblas et al. 2018) which may alter the interpretation of features previously mapped at a coarser scale.

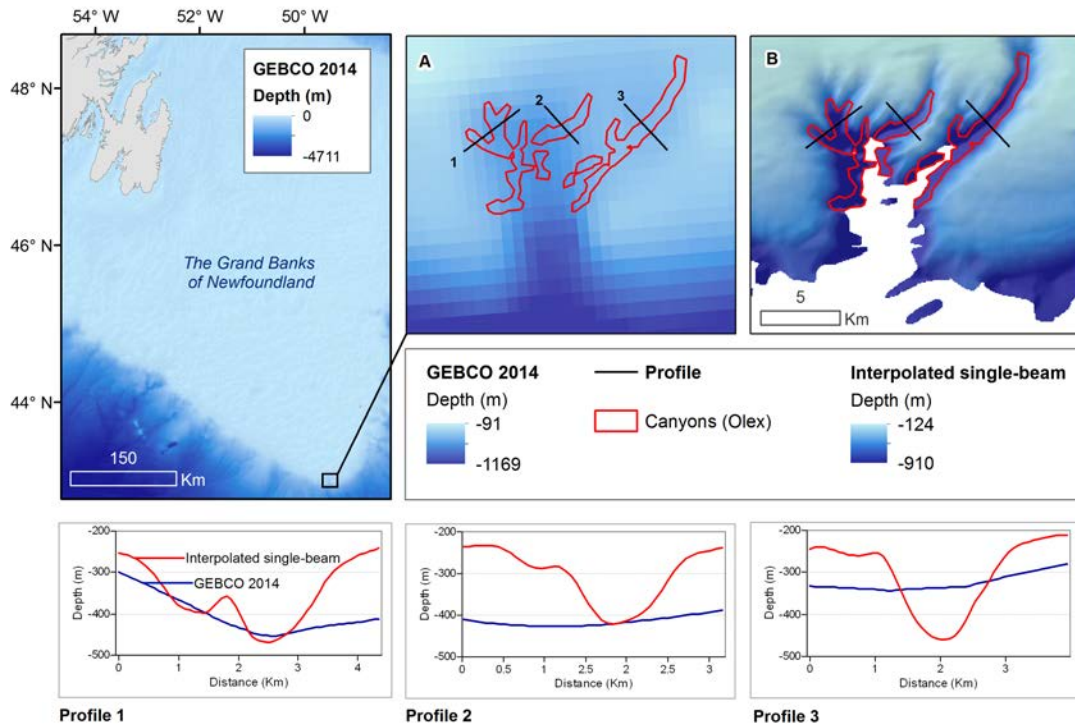


Figure 4.5. Features identified by hierarchical BPI classification of submarine canyons.

While the crowd-sourced bathymetry presented here cannot match high-resolution of hydrographic multibeam surveys, we have been able to generate a bathymetric grid that is over a hundred times finer resolution than GEBCO data for a fraction of the cost of a multibeam survey. Such data can be instrumental in supporting studies in oceanography (Stow et al. 2009), marine geology (Misiuk et al. 2018), geohazard assessment (Chiocci et al. 2011), ecological research (Rengstorf et al. 2012), marine conservation (Buhl-Mortensen et al. 2015), and resource management (Marshak and Brown 2017).

In this study we have described a novel method for generating continuous bathymetry from a large crowd-sourced echosounder data at a much higher spatial resolution than previously available via satellite altimetry and much larger spatial extent than available from existing MBES surveys. With very minimal thresholds applied for quality control, even areas of sparse coverage were successfully interpolated with high accuracy when tested against independent bathymetric data. The resulting interpolated bathymetry, which covers an area greater than half of the entire Atlantic Canadian shelf and provided a 480% increase in coverage when compared to the input sounding coverage for the study area, can help answer a number of scientific questions that were not possible using previously existing regional bathymetry datasets, despite the long history of bathymetric surveys in Canadian waters (Pickrill and Kostylev 2007). The approach presented can be easily reproduced for other regions of the world where similar crowd-sourced data are available. Olex data, which is only one of several potential sources of crowd-sourced bathymetry, is collected globally, including European waters, along the US East Coast, and in the waters of Western Africa. In this study we also provided some

examples of novel information we can obtain from such data, including both general and specific geomorphometric properties of the seascape.

Particular attention was given in this study to the mapping of submarine canyons. These features are complex systems associated with high rates of ocean mixing (Carter and Gregg 2002), biological productivity (De Leo et al. 2010), and carbon storage (Masson et al. 2010). The BPI-based classification of canyon features presented here is limited by data availability at the shelf edge and is dependent on the scale of analysis. However, due to the ecological and geological significance of submarine canyons, this simple approach provides useful information to guide further surveys, to assess representation of canyons in conservation planning, and to characterize marine habitats at little cost and minimal processing effort. It is important to note that many of the submarine canyons identified by our methods were not resolved by GEBCO bathymetry. The presence of previously unmapped tributary canyons demonstrates that the shelf edge in this region is more complex than previously thought, and this information may contribute to a better understanding of canyon formation and maturity on the Newfoundland and Labrador shelves (Amblas et al. 2018; McGregor et al. 1982).

The crowd-sourced bathymetric data used in this study were collected and compiled internationally wherever participating commercial vessels were active, however these data remain largely unused for the quantitative and systematic study of seafloor geomorphometry and benthic habitats. Our method offered a robust and reproducible method to make use of crowd-sourced data for applications including, but not limited to, marine conservation, resource management, and marine geology. In much of the study area, this work provided the finest resolution bathymetry data currently available, and was produced at a fraction of the cost of conventional surveys.

4.2 REFERENCES

- Amblas D, Ceramicola S, Gerber TP, Canals M, Chiocci FL, Dowdeswell JA et al. Submarine canyons and gullies. In: Micallef A, Krastel S, Savini A, editors. *Submarine Geomorphology*. New York: Springer International Publishing; 2018. pp 251-272.
- Buhl-Mortensen L, Buhl-Mortensen P, Dolan MJF, Gonzalez-Mirelis G. Habitat mapping as a tool for conservation and sustainable use of marine resources: Some perspectives from the MAREANO Programme, Norway. *J Sea Res.* 2015;100: 46-61.
- Carter GS, Gregg MC. Intense, variable mixing near the head of Monterey Canyon. *J Phys Oceanogr.* 2002;32: 3145–3165.
- Casalbore D, Romagnoli C, Bosman A, Chiocci FL. Potential tsunamigenic landslides at Stomboli Volcano (Italy): Insight from marine DEM analysis. *Geomorphology.* 2011;126(1-2): 42-50.
- Chiocci FL, Cattaneo A, Urgeles R. Seafloor mapping for geohazard assessment: state of the art. *Mar Geophys Res.* 2011;32:1-11.
- Danielson JJ, Poppenga SK, Brock JC, Evans GA, Tyler DJ, Gesch DB, et al. Topobathymetric elevation model development using a new methodology: Coastal National Elevation Database. *J Coast Res.* 2016;76: 75-89.
- Deering R, Bell T, Forbes DL, Campbell C, Edinger E. Morphological characterization of submarine slope failures in a semi-enclosed fjord, Frobisher Bay, eastern Canadian Arctic. In: Lintern, DG, Mosher DC, Moscardelli LG, Bobrowsky PT, Campbell C, Chaytor J D et al., editors. *Subaqueous Mass Movements*. Geol Soc London Spec Publ. 2018; 477. doi: 10.1144/SP477.35.

- De Leo G.C., Smith, C.R., Rowden, A.A., Bowden, D.A., Clark, M.R. Submarine canyons: hotspots of benthic biomass and productivity in the deep sea. *Proc Roy Soc Lond Biol Sci.* 2010. doi: 10.1098/rspb.2010.0462.f.
- Di Stefano M, Mayer LA. An automatic procedure for the quantitative characterization of submarine bedforms. *Geosciences.* 2018;8(1): 28.
- General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO), GEBCO 14 Grid, version 20150318. Liverpool: Br. Oceanogr. Data Cent.; 2015 [downloaded 2017 Jan 9]. Available from <http://www.gebco.net>.
- Global Affairs Canada. Backgrounder – Canada’s continental shelf submission. 2013. Available from http://www.international.gc.ca/media/aff/news-communiqués/2013/12/09a_bg1.aspx?lang=eng 2013
- Harris PT, Baker EK. Why map benthic habitats? In: Harris PT, Baker EK, editors. *Seafloor Geomorphology as Benthic Habitat*. London: Elsevier; 2012. pp 3-22.
- Harris, PT, Macmillan-Lawler, M, Rupp, J, Baker, EK. *Geomorphology of the oceans*. *Mar. Geol.* 2014;352: 4-24.
- Heipke C. Crowdsourcing geospatial data. *ISPRS J Photogramm Remote Sens.* 2010;65(6): 550-557.
- Hough G, Green J, Fish P, Mills A, Moore R. A geomorphological mapping approach for the assessment of seabed geohazards and risk. *Mar Geophys Res.* 2011;32(1): 151-162.
- Jasiewicz J, Stepinski T. Geomorphons – A pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. *Geomorphology.* 2013;182: 147-156.
- Krivorouchko K. Empirical Bayesian Kriging implemented in ArcGIS Geostatistical Analyst. In: *ArcUser Fall 2012 – Software and Data*. 2012. Available from: <http://www.esri.com/news/arcuser/1012/files/ebk.pdf>
- Lecours V, Dolan MFJ, Micallef A, Lucieer VL. A review of marine geomorphometry, the quantitative study of the seafloor. *Hydrol Earth Syst Sci.* 2016;20: 3207-3244.
- Liverman D, Batterson M, Taylor D, Ryan J. Geological hazards and disasters in Newfoundland and Labrador. *Can Geotech J.* 2000;38(5): 936-956.
- MacMillan RA, Shary PA. Chapter 9 Landforms and landform elements in *Geomorphometry*. *Dev Soil Sci.* 2009;33: 227-25.
- Marshak AR, Brown SK. Habitat science is an essential element of ecosystem-based fisheries management. *Fish.* 2017;42(6): 300-300.
- Masson, DG, Huvenne, VAI, de Stigter, HC, Wolff, GA, Kiriakoulakis, K, Arzola, RG, et al. Efficient burial of carbon in a submarine canyon. *Geol.* 2010. 38:831-834.
- Mayer L, Jakobsson M, Allen G, Dorschel B, Falconer R, Ferrini V, et al. The Nippon Foundation – GEBCO Seabed 2030 Project: The quest to see the world’s oceans completely mapped by 2030. *Geosciences.* 2018;8(2): 63.
- McGregor B, Stubblefield WL, Ryan WBF, Twichell DC. Wilmington submarine canyon: A marine fluvial-like system. *Geol.* 1982;10:27-30.
- Misiuk D, Lecours V, Bell T. A multiscale approach to mapping seabed sediments. *PLoS ONE.* 2018;13(2): e0193647.
- Montella R, Di Luccio D, Marcellino L, Galletti A, Kosta S, Brizius A et al. Processing of crowd-sourced data from an internet of floating things. In: *Proceedings of the 12th Workshop on Workflows in Support of Large Scale Science; 2017 November 12-17; Denver, CO*. New York: Association for Computing Machinery; 2017. Available from: dl.acm.org
- Odum EP, Kroodsma RL. *Fundamentals of Ecology*. Philadelphia: Saunders; 1976.
- Pickrill RA, Kostylev VE. Habitat mapping and national seafloor mapping strategies in Canada. In: Todd BJ, Greene HG, editors. *Mapping the seafloor for habitat characterization*. Geological Association of Canada Special Paper. 2007;47: 483-495.
- Raymond E. The cathedral and the bazaar. *Knowledge, Technology & Policy.* 1999;12(3):23-49.
- Rengstorf AM, Grehan A, Yesson C, Brown C. Towards high-resolution habitat suitability modeling of vulnerable marine ecosystems in the deep-sea: Resolving terrain attribute dependencies. *Mar Geod.* 2012;35: 343-361.
- Rovere M, Gamberi F, Mercorella A, Leidi E. Geomorphometry of a submarine mass-transport complex and relationships with active faults in a rapidly uplifting margin (Gioia Basin, NE Sicily margin). *Mar Geol.* 2014;356: 31-43.
- Schlaginweit GEO. Real-time acoustic bottom classification for hydrography: A field evaluation of RoxAnn. In: *OCEANS '93: Engineering in Harmony with Ocean Proceedings; 1993 Oct 1993* (pp

- 214-219); Victoria, British Columbia. IEEE; 1993. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/326188/>
- Sherman K, Hempel G. The UNEP Large Marine Ecosystem Report: A perspective on changing conditions in LMEs of the world's Regional Seas. UNEP Regional Seas Report and Studies. Nairobi, UNEP. 2008: 182.
- Stow DAV, Hernández-Molina FJ, Llave E, del Rio VD, Branson A. Bedform-velocity matrix: The estimation of bottom current velocity from bedform observations. *Geology*. 2009;37(4): 327-330.
- Walbridge S, Slocum N, Pobuda M, Wright DJ. Unified geomorphological analysis workflows with Benthic Terrain Modeler. *Geosci*. 2018;8(3): 94.
- Weatherall P, Marks KM, Jakobsson M, Schmitt T, Tani S, Arnt JE, et al. A new digital bathymetric model of the world's oceans. *Earth Space Sci*. 2015;2: 331-345.
- Zou L, Kent J, Lam NSM, Cai H, Qiang Y, Li K. Evaluating Land Subsidence Rates and Their Implications for Land Loss in the Lower Mississippi River Basin. *Water*. 2015. 8(1):1-15.

5 SYNTHÈSE ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE

5.1 SYNTHÈSE

Les chapitres 2, 3 et 4 ont présenté un aperçu de contributions de recherche sélectionnées contribuant à trois axes de recherche thématique. Ces chapitres ont fourni un aperçu de manuscrits publiés en anglais auxquels le lecteur peut se référer pour plus de détails. Tel que demandé par les instructions de la procédure d'HDR, je fournis ci-dessous une courte synthèse en français de ces contributions.

5.1.1 Géovisualisation de données marines

L'analyse de grands jeux de données représentant des déplacements est souvent complexe. La section 2.2 a présenté une approche interactive de géovisualisation que nous avons nommé le *Hybrid Spatio-Temporal Filtering* (HSF) qui intègre des méthodes permettant de filtrer les données à l'aide de caractéristiques des mouvements, grâce à une interface composée de différentes vues synchronisées. Le système HSF permet ainsi à des analystes d'identifier certains types de mouvement d'intérêt pour une application donnée. De manière plus spécifique, nous avons proposé une nouvelle approche qui combinait une mesure de la dimension fractale des données de mouvement avec des filtres sur la vitesse, dans le but d'exclure des données qui ne présenteraient pas d'intérêt pour l'analyste. Afin de permettre une exploration des données à différentes échelles spatiales, les mesures de la dimension fractale sont faites à l'aide d'une fenêtre adaptative. HSF permet aussi de mesurer la probabilité que certaines traces intersectent des zones identifiées comme étant d'intérêt pour l'analyste. Le résultat est un système de géovisualisation qui permet à des analystes de spécifier des filtres basés sur la complexité d'un mouvement, une échelle spatiale d'analyse donnée et une vitesse de déplacement, le tout permettant de catégoriser certains types de déplacements. Cette méthode de filtrage des données permet aux analystes d'identifier des types de mouvement d'intérêt et d'exclure certains types de mouvement, menant à une réduction du volume de données visualisées. L'apport de cette approche a été validé à l'aide d'une étude terrain pendant laquelle des agents gouvernementaux de contrôle des pêches ont pu analyser et explorer des données de mouvement de bateaux de pêche à l'aide du prototype logiciel. Les participants ont été positifs quant aux différentes fonctionnalités offertes par le système et à l'aide que le système leur a fourni pour analyser les données de pêche. La combinaison de la dimension fractale, de la vitesse de déplacement et du filtre temporel ont permis aux agents d'identifier des sous-ensembles de données qui présentent un intérêt particulier dans ce contexte d'étude.

Dans la section 2.3 nous avons présenté une étude complémentaire qui permet, à l'aide d'une autre approche visuelle, de faciliter l'exploration de jeux de données spatio-temporels complexes. Les phénomènes géographiques ont souvent une dimension temporelle intrinsèque qui peut aider à répondre à différents types de questions. Les applications géomatiques permettent généralement de naviguer dans la dimension spatiale des données à l'aide d'outils permettant de faire des

zooms ou des déplacements latéraux (« pan »). Ces applications offrent toutefois des outils plus rudimentaires lorsqu'il faut explorer les données selon leur dimension temporelle. Une amélioration des outils de navigation dans les applications géomatiques permettant de faciliter la navigation selon l'axe temporel permettant ainsi de contribuer à l'analyse de jeux de données spatio-temporels. La section 2.3 a présenté une nouvelle approche permettant de naviguer selon la dimension temporelle à l'aide de l'interface tactile d'une tablette, utilisant des zooms et des fonctions de déplacement latéral temporel. Deux approches interactives ont été implémentées et testées par des utilisateurs et comparées à deux méthodes de sélection de données plus classiques dans les environnements tactiles. Les résultats de l'évaluation indiquent que bien que toutes les méthodes soient efficaces, il y avait des variations au niveau de l'efficacité et de la perception des utilisateurs en termes de facilité d'utilisation et d'utilité. Les résultats obtenus indiquent une certaine balance requise entre la taille, l'utilité et la nouveauté des fonctions proposées lors de développement dans un environnement tactile.

5.1.2 Géomorphométrie marine

Les mesures quantitatives dérivées des modèles numériques de terrain, telles que la pente et la rugosité, sont souvent utilisées lors d'études environnementales. La grande disponibilité des outils SIG permettant de générer de telles mesures amène souvent des utilisateurs à se limiter aux mesures pouvant être calculées avec les logiciels auxquels ils ont accès. L'objectif du travail présenté dans la section 3.2 était d'identifier des groupes de mesures qui permettent de représenter de manière efficace des modèles numériques d'élévation de différentes complexités. 230 outils provenant de 11 logiciels ont été utilisés pour générer des mesures quantitatives à partir de 9 modèles numériques d'élévation de différentes complexités créés artificiellement. L'indépendance et la covariation de ces mesures a été testée à l'aide de méthodes statistiques multivariées. Des groupes distincts de mesures ont été identifiés ainsi que leur contribution à l'explication de certaines propriétés des modèles numériques d'élévation de différentes complexités. Certaines mesures étaient très similaires ou décrites de manière très ambiguë dans la documentation des logiciels. Nos analyses ont permis d'identifier 6 à 7 mesures qui, lorsque utilisées ensemble, permettent d'expliquer plus de 70% de la variance d'un modèle numérique d'élévation.

La section 3.3 a présenté une application de la méthode présentée en section 3.2 avec des données réelles, dans le contexte de cartographie des habitats marins et de modélisation de la distribution d'espèces. La sélection de variables environnementales appropriées est une étape critique en écologie numérique. Les mesures du relief sont souvent utilisées dans ce contexte comme variables abiotiques qui aident à prédire la distribution d'espèces biologiques ou à cartographier des habitats. Ces produits sont souvent importants lors de prises de décision en gestion de la nature et de l'environnement. Pour évaluer la contribution possible de la méthode présentée en section 3.2, nous avons généré différents groupes de mesures du relief qui ont été utilisées, avec d'autres variables environnementales, afin de générer des cartes des habitats benthiques pour la région de *German Banks* au Canada. 29 cartes d'habitat marin ont été créées à l'aide

de classification non-supervisée et 29 autres cartes représentant la probabilité de trouver des coquilles Saint Jacques dans la région d'étude ont été réalisées à l'aide de la méthode de modélisation MaxEnt. L'exactitude des 58 cartes a été quantifiée et comparée afin d'évaluer l'efficacité des différents groupes de mesures testés. La combinaison de 6 à 7 mesures décrite dans la section 3.2 a fourni des résultats supérieurs aux autres groupes de mesures pour les deux types d'analyses (cartes d'habitats et modèles de distribution d'espèces). Ces résultats confirment l'efficacité de cette méthode dans ces deux contextes d'étude. Des différences quant à la performance pouvant aller jusqu'à 47% de l'exactitude des modèles et jusqu'à 50% de différences pour la cartographie des habitats soulignent l'importance de sélectionner les variables utilisées dans ces analyses. Notre étude a confirmé qu'une sélection subjective des variables peut réduire l'exactitude de la carte et mener à la création de cartes qui ne représentent pas de manière fiable les habitats et la distribution des espèces, pouvant ainsi avoir des implications importantes lors de l'utilisation de ces produits.

5.1.3 Utilisation de données géographiques volontaires pour la création de données bathymétriques régionales

Le chapitre 4 a présenté une étude récente démontrant l'intérêt des méthodes de collecte de données bathymétriques non-traditionnelles pour la création de produits bathymétriques de qualité. La cartographie des fonds marins peut être un élément très important dans des domaines tels que la gestion de l'espace maritime, la planification spatiale marine et dans des domaines scientifiques tels que la géologie marine, l'écologie marine et l'océanographie physique. Dans ce chapitre, nous avons présenté une nouvelle méthode pour générer des données bathymétriques régionales à une résolution beaucoup plus haute que les données gouvernementales disponibles actuellement dans certains pays. Cette méthode utilise des données de sondeurs bathymétriques installés sur des bateaux de pêche et collectées pour d'autres utilisations. Ces données, collectées par la compagnie Olex AS sur des années, ont été interpolées à l'aide de krigeage bayésien empirique dans le but de créer une surface bathymétrique couvrant la majorité des eaux territoriales de la province de Terre-Neuve et Labrador au Canada. La méthode a permis de générer une surface bathymétrique à une résolution de 75m, soit une résolution plus de 100 fois supérieure aux données bathymétriques régionales disponibles dans cette région. La qualité de la surface bathymétrique a été validée à l'aide de données externes provenant de levées sonar faites par le ministère des pêches et océans du Canada (corrélation Spearman = 0.99, $p < 0.001$). Différentes variables quantitatives ont été générées à l'aide de cette surface, incluant la pente, la rugosité, l'orientation de la pente et des mesures relatives aux formes du relief. Une classification des éléments du paysage a été faite à l'aide de l'algorithme *geomorphons*. Une nouvelle méthode permettant de cartographier des canyons sur la marge de la plate-forme continentale a aussi été proposée, illustrant un des nombreux apports qu'une bathymétrie de plus haute résolution peut apporter à l'étude de la géologie marine régionale.

5.1.4 Méta-synthèse

Les chapitres 2, 3 et 4 de ce mémoire ont présenté certains travaux de recherche que j'ai dirigé et auquel j'ai participé lors de ma carrière comme enseignant-chercheur au Canada. J'ai été pendant 14 ans l'un des trois enseignants-chercheurs dans toute la province canadienne de Terre-Neuve et Labrador œuvrant dans le domaine des sciences de l'information géographique. Pour cette raison, j'ai été sollicité dans des projets très divers et mes compétences se sont beaucoup plus diversifiées que beaucoup d'autres enseignants chercheurs travaillant dans ce domaine. Sur le plan méthodologique, j'ai travaillé en qualification des données, métadonnées, systèmes d'aide à la décision, géovisualisation, analyse spatiale, modélisation, ontologies, etc. Sur le plan des applications, j'ai travaillé sur ce qui peut être représenté spatialement de la surface des océans (p.ex. navires de pêche), dans la colonne d'eau (p.ex. populations de poisson), sur le fond des océans (p.ex. écologie benthique) et même dans les sédiments (p.ex. classification des sédiments de surface par sondeurs). J'ai aussi travaillé dans d'autres domaines, comme la foresterie et l'archéologie.

Dans ce mémoire, j'ai voulu me concentrer sur certaines questions méthodologiques liées au domaine marin, en l'occurrence les questions d'exploration visuelle de grands jeux de données (chapitre 2), d'extraction d'information de modèles numériques de terrain en support à la cartographie des habitats et des espèces marines (chapitre 3) et à l'apport de la géomatique et de l'information géographique volontaire pour la création de données bathymétriques (chapitre 4). Ces trois exemples soulignent un désir dans ma recherche d'utiliser des méthodes du domaine de la géomatique pour améliorer les méthodes utilisées dans d'autres domaines, orientations qui ont été motivées par un désir de contribuer à des recherches qui peuvent avoir un impact bénéfique pour la société.

5.2 QUI SUIS-JE, OU VAIS-JE, DANS QUEL ETAT J'ERE ? – PERSPECTIVES DE RECHERCHE

Ayant été recruté en janvier 2020 sur un poste de directeur de recherche à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), ce mémoire est une excellente opportunité pour entamer une réflexion sur mes orientations de recherche futures. Bien que l'orientation spécifique de futurs projets de recherche soit parfois liée à des opportunités de collaboration ou de financements spécifiques, j'identifie trois axes généraux de recherche qui permettraient de développer des activités interdisciplinaires et pertinentes pour les pays du sud et possiblement de regrouper une équipe de recherche intéressée dans ces thèmes.

5.2.1 Géomatique marine et côtière et sciences participatives

Un premier axe de recherche d'intérêt est celui de l'apport des sciences participatives au domaine marin et côtier. Les sciences participatives sont un domaine en pleine expansion dans le milieu de la recherche et leur importance et potentiel est probablement encore plus grand dans un contexte tel que celui de l'IRD étant donné la pénurie de données dans beaucoup de pays du sud. La capacité à mobiliser des acteurs locaux (chercheurs, organisations à but non-lucratif, mais aussi

des écoles ou même le grand publique) permettraient de collecter des données très diverses qui pourraient venir en aide à la prise de décision.

J'ai travaillé sur les données participatives dans différents contextes dans le passé. Les travaux de thèse de Daniel Bégin portaient sur le projet de cartographie collaborative OpenStreetMap et plus particulièrement sur l'évolution de la participation des contributeurs de leurs débuts dans le projet à la fin de leur participation. La cartographie collaborative est une approche qui a fait ses preuves pour la collecte de données dans des pays du sud (p.ex. contribution du projet Ushahidi suite aux tremblements de terre de 2010 à Haiti et de 2015 au Népal). Dans le domaine des petites pêches. J'ai été responsable de la conception, du développement et de l'utilisation de ISSF, un portail Web visant à collecter et partager des données sur les petites pêches du monde entier collectées de manière participative. J'ai également utilisé des drones marins et aériens grand publique dans différents projets de recherche, permettant de collecter des données géographiques à faible coût à l'aide d'équipement relativement facile à opérer.

Ce premier axe de recherche pourrait mener à des projets très différents, particulièrement quant au suivi de l'environnement côtier. Par exemple, des survols réguliers par drone de zones sensibles à l'érosion pourraient identifier les zones les plus à risque, de cartographier l'empreinte de certaines pêches (p.ex. pêche à pied) ou encore d'étudier la distribution de mammifères marins (p.ex. les drones ont été utilisés dans les dernières années pour étudier la distribution de baleines, méthode permettant une meilleure résolution temporelle que les relevés aériens classiques). Des petits ROV (drones marins) pourraient être utilisés pour faire le suivi de certains écosystèmes côtiers sensibles aux changements saisonniers ou annuels ou à des événements précis (p.ex. blanchissement de coraux suite à des vagues de chaleur). Ou encore des applications mobiles pourraient être développées et permettre de collecter des informations sur la pollution (p.ex. plastique et autres déchets) sur les plages. Ces projets pourraient permettre de développer des acteurs locaux qui pourraient être formés et équipés pour faire un tel suivi.

De tels projets peuvent solliciter des compétences très différentes tel que la modélisation de données, le développement informatique, l'évaluation de la qualité des données, l'analyse spatiale et la modélisation ou encore des compétences des sciences sociales (p.ex. étude longitudinale de la perception des acteurs locaux impliqués dans le projet). Ces projets pourraient donc fédérer des équipes interdisciplinaires.

5.2.2 Habitats marins : du macro au micro

Ce deuxième thème de recherche a été présenté de manière plus détaillée lors de ma candidature à l'IRD et s'inscrit dans le domaine de la cartographie des habitats marins, un domaine d'étude relativement récent, en pleine croissance et très interdisciplinaire, regroupant des biologistes, des géologues, des océanographes et des géomaticiens. Ma contribution serait une prolongation naturelle de mes travaux passés dans ce domaine et viserait à améliorer les méthodes utilisées dans le domaine de la cartographie des habitats côtiers et marins. Le domaine de la cartographie des habitats marins étant relativement récent, le développement de

ses méthodes est l'une des dimensions principales de recherche sous-jacente à ce domaine. Certaines avancées récentes en télédétection marine acoustique comme l'utilisation de la rétrodiffusion (*backscatter*) ou de méthode GEOBIA (*GEographic Object-Based Image Analysis*) pour l'analyse d'images, ont révolutionné ce domaine dans la dernière décennie. La géomatique, avec son bagage de méthodes en télédétection et en analyse spatiale, peut contribuer directement à l'amélioration des méthodes utilisées pour la cartographie des habitats marins. Cet axe de recherche permettrait lui aussi de fédérer des équipes interdisciplinaires, combinant des compétences en informatique, en géomatique (p.ex. télédétection, traitement du signal, SIG, analyse spatiale) mais aussi dans les différentes thématiques (p.ex. écologie, géologie).

Les habitats marins jouent un rôle très important pour les populations côtières des pays tropicaux, protégeant de l'action des vagues pouvant éroder les côtes et d'autres phénomènes naturels (p.ex. tsunami), servant de nurserie pour les poissons nourrissant les populations locales, ou encore aidant à améliorer la qualité des eaux (Harris et Baker 2011). Il est maintenant généralement reconnu qu'une gestion efficace des ressources halieutiques et une protection des espèces et de la biodiversité marine passent par une meilleure compréhension des habitats marins. Suite à une augmentation de l'impact de la pêche dans les zones côtières, les ressources halieutiques sont souvent en déclin proche des côtes. Certains changements dans les rapports Homme-Animal, comme à La Réunion, pourraient aussi être le signe d'altération des habitats côtiers liées aux changements globaux et locaux. Fournir des outils permettant de mieux étudier ces environnements permettra la production de connaissances et de cartes d'habitat pouvant supporter directement les processus de décision reliés au développement durable des pays du sud.

La cartographie des habitats est un domaine d'étude relativement mature en milieu terrestre dû à la disponibilité depuis les années 1970s d'imagerie satellitaire (p.ex. Landsat), permettant de produire des cartes continues des habitats terrestres par classification des images. Certaines de ces méthodes, basées sur la télédétection satellitaire, sont aussi utilisées depuis près de 20 ans pour cartographier les coraux tropicaux dû à la pénétration de la lumière dans les eaux de surface (p.ex. imagerie hyperspectrale et plus récemment le LiDAR bathymétrique). Cependant, les écosystèmes plus profonds restent très peu connus, malgré l'importance de leurs habitats en conservation marine et pour les ressources naturelles. Leur étude requière d'autres méthodes d'observation telles que la télédétection acoustique et l'utilisation de véhicules sous-marins téléguidés ou autonomes (ROV ou AUV) ou de caméras sous-marines. Il existe donc un besoin à la fois scientifique et sociétal pour cartographier les habitats marins en eaux plus profondes afin de s'assurer de la santé des écosystèmes, étudier l'impact des changements climatiques sur ces écosystèmes, et pour s'assurer que ces environnements fournissent les services attendus (p.ex. en ressources halieutiques et protection des côtes) aux populations côtières des régions tropicales dans une optique de développement durable.

Je propose ici trois thèmes principaux de recherche dans cet axe qui explorent des questions méthodologiques pouvant permettre d'améliorer les méthodes utilisées pour la cartographie des habitats marins :

Thème 1 : Géomorphométrie et analyse spatiale des MNE

L'objectif de ce thème est de concevoir des méthodes basées sur des analyses géomorphométriques (voir chapitre 3 pour des détails sur cette approche) pour classifier les habitats dans les eaux côtières trop profondes pour être cartographiées par télédétection classique. Cette approche sera testée à plusieurs échelles spatiales. Cette recherche peut utiliser des données bathymétriques existantes (p.ex. MNT de façade du SHOM).

Thème 2 : Classification de données acoustiques multifréquences

En milieu marin, les systèmes acoustiques ont traditionnellement été limités à une seule fréquence par capteur, cette fréquence pouvant varier si le capteur est destiné à des relevés en eaux profondes ou peu profondes. La discrimination d'objets spécifiques sur les fonds marins était donc dépendante de la capacité de la fréquence utilisée par le capteur à détecter l'objet d'intérêt. Certains travaux, dont l'étude d'un de mes étudiants (Cuff et al. 2015), ont exploré l'intérêt de combiner différentes fréquences acoustiques pour cartographier les fonds marins à l'aide de capteurs monofaisceaux. Ce n'est que très récemment (depuis 2016-2017) que des capteurs multifaisceaux sont disponibles sur le marché qui permettent la collecte de données simultanée de différentes fréquences acoustiques et très peu d'études ont testé ces approches (voir par exemple Brown et al. 2019).

L'objectif de ce thème est dans un premier temps de tester l'hypothèse que la cartographie acoustique multifréquence permet d'améliorer la précision des cartes des récifs coralliens. Si cette hypothèse est validée, nous pourrions alors créer des signatures acoustiques pour différents substrats et développer de nouveaux indices basés sur la combinaison de fréquences optimales pour détecter certains types de substrats.

Thème 3: Photogrammétrie numérique 3D et suivi des changements

La photogrammétrie est une technique qui existe depuis plus de 100 ans qui permet de construire un modèle 3D à partir d'images d'un même endroit prises à des angles différents. La photogrammétrie a été très utilisée pour la cartographie terrestre à l'aide d'imagerie aérienne. La photogrammétrie est utilisée plus rarement en milieu marin (p.ex. pour la cartographie de sites archéologiques sous-marins) et a été utilisée pour la reconstruction d'environnements récifaux peu profonds en 3D.

L'objectif de cette recherche est d'utiliser des méthodes de photogrammétrie numériques sous-marines pour créer des modèles 3D d'environnements sous-marins côtiers et de concevoir une approche permettant d'utiliser ces informations pour produire une cartographie 3D des habitats à haute résolution. Une telle approche peut être utilisée pour faire des suivis de changements dans l'environnement physique avec une résolution très fine.

5.2.3 Conservation marine : vers un meilleur équilibre

Le dernier axe de recherche proposé est lui aussi une extension de certains de mes travaux passés et actuels, s'intéressant aux domaines de la planification de la conservation, de la planification spatiale marine, et plus généralement à l'interface

entre sciences naturelles et sciences sociales dans la gestion durables des environnements côtiers en marins.

Tout comme le domaine terrestre, le domaine marin est un espace partagé par un grand nombre d'acteurs. Certains utilisent cet espace pour en extraire des ressources naturelles, tels que les activités de pêches et d'aquaculture, les plateformes pétrolières, l'extraction de minerais sur les fonds marins, ou encore l'utilisation d'énergies renouvelables telles que les éoliennes ou les centrales marémotrices. Le domaine marin est aussi un espace de déplacement, utilisé par l'industrie du transport maritime pour le transport de produits ou encore par des particuliers pour le loisir. Alors que le domaine de la planification a une histoire assez longue en milieu urbain, la planification spatiale dans le domaine marin est relativement nouvelle. Beaucoup de secteurs d'activités procèdent à des planifications sectorielles (p.ex. le développement d'énergies renouvelables comme des éoliennes pourra donner lieu à des processus de planification spécifiques à ce secteur). Le domaine de la conservation marine est par exemple un domaine d'étude à part entière doté de ses méthodes propres mais ayant peu d'interactions avec les activités d'autres secteurs.

L'intensification des activités dans le domaine marin a encouragé le développement de méthodes de planification plus générales dans la dernière décennie, telle que les méthodes de planification spatiale marines. Toutefois, l'intégration d'intérêts souvent divergents de secteurs ayant besoin d'accéder à un même espace est complexe et demande à être étudié. La géomatique et la géographie peuvent là aussi contribuer à mieux comprendre et améliorer ces processus de planification. Allant de méthodes mathématiques d'optimisation appliquées à la planification spatiale (p.ex. la méthode Marxan utilisée en planification marine de la conservation) à des études socio-économiques des différents secteurs et leur intégration possible dans des processus de décision (p.ex. par approches multicritères), le domaine de la planification en milieu marin présente un ensemble de défis qui, là encore, peuvent fédérer des équipes multidisciplinaires composées de géographes, géomaticiens, informaticiens, économistes et d'experts d'autres domaines.

6 ÉLÉMENTS DE CV

Un CV détaillé est fourni séparément avec la soumission de ce mémoire. Cette section vise à fournir un sous-ensemble du CV présentant le candidat et ses contributions principales à la direction de recherches.

6.1 RENSEIGNEMENTS PERSONNELS

DEVILLERS Rodolphe

Date de naissance : 22/12/1975

Directeur de Recherches 2^{ème} classe

Institut de Recherche pour le Développement (IRD)

Date d'entrée à l'IRD : Janvier 2020

rodolphe.devillers@ird.fr

Laboratoire de rattachement :

Espace-Dev (UMR 228)

Maison de la Télédétection

500 Rue JF Breton

34093 Montpellier

6.1.1 Éducation

Doctorat	Sciences de l'information géographique (U. Marne la Vallée, France) et Sciences Géomatiques (U. Laval, Canada) – Thèse en cotutelle – 2004 ; Mention Très honorable avec félicitations du jury
Master	Sciences Géomatiques (U. Laval, Canada) - 2000
Master	Sciences de la Terre (U. du Québec à Montréal – UQAM, Canada) - 1999
License	Sciences de la Terre (U. Lyon 1, France) - 1997

6.1.2 Activités professionnelles

2020-Présent	Directeur de recherche (2 ^{ème} classe), Institut de recherche pour le développement (IRD), UMR Espace-Dev
2016-2019	Professeur des universités, Dép. de Géographie, U. Memorial de Terre-Neuve (MUN), Canada – <i>Qualifié en France au rang PR par le CNU 23 en 2019.</i>
2013-2019	Professeur (<i>cross appointed</i>) au Département d'informatique (MUN, Canada)
2018-2019	Scientifique invité (sabbatique) au CRIOBE-CNRS (USR-3278), Perpignan, France
2009-2016	Professeur Agrégé en Géographie, U. Memorial de Terre-Neuve (MUN, Canada)

2011-2012	Scientifique invité (sabbatique) ARC <i>Centre for Coral Reefs Studies</i> , U. James Cook, Australie
2007-2012	Professeur Adjoint (<i>cross appointed</i>) au Département des Sciences de la Terre (MUN, Canada)
2005-2009	Professeur Adjoint en Géographie, U. Memorial de Terre-Neuve (MUN, Canada)
2005	Chercheur post-doctoral CRSNG, Centre d'Information Topographique de Sherbrooke, Ressources Naturelles Canada

6.1.3 Postes de professeur associé

2020-Présent	Professeur Associé au Department of Geography (MUN, NL)
2012-Présent	Professeur Associé au Département de Biologie (U. Laval, QC)
2006-Présent	Chercheur régulier au Centre de Recherche en Géomatique (QC)
2006-Présent	Professeur Associé au Département des Sciences Géomatiques (U. Laval, QC)
2006-2010	Chercheur associé à la Chaire de Recherche Industrielle Canadienne en Bases de données géospatiales pour le support à la décision (U. Laval, QC)

6.2 ACTIVITES D'ENCADREMENT DE LA RECHERCHE ET D'ENSEIGNEMENT

6.2.1 Supervision d'étudiants

J'ai commencé à diriger des étudiants des cycles supérieurs dès mes débuts de carrière comme enseignant-chercheur, soit en 2005. Les programmes de maîtrise (master) au Canada sont proche de petites thèses, les étudiants passant généralement 2-3 ans dans ces programmes en y faisant très peu de cours. Chaque étudiant publie un mémoire qui est habituellement composé d'un ou deux articles publiés dans des revues internationales à comité de lecture. La direction d'étudiants en maîtrise constitue souvent le cœur de l'encadrement fait par les enseignants chercheurs dans le système canadien. Aussi, le système canadien n'a pas d'équivalent pour l'HDR et il est donc possible pour un nouvel enseignant chercheur de diriger un étudiant en thèse de doctorat dès ses débuts. Une thèse dans le système canadien dure généralement 4-5 ans. J'ai dirigé ma première étudiante en thèse en 2009 puis ai généralement eu 2 à 4 étudiants en thèse en tout temps, en plus des étudiants de maîtrise et de stagiaires ou assistants de recherche de 1^{er} cycle. Les tableaux ci-dessous listent les étudiants que j'ai dirigé ou codirigés (D) ou pour lesquels j'étais membre de leur comité de direction (M). Notez que le terme « codirecteur » dans le système canadien est utilisé lorsque deux directeurs de thèse encadrent l'étudiant de la même manière, un contexte assez courant dans un contexte interdisciplinaire.

Post-docs

Nom	Rôle*	Programme	Université	Année	Poste actuel
Manuel Muntoni	D	Géographie	MUN	2017	Chercheur, GIP Seine-Aval, France
Neha Gupta	D	Géographie	MUN	2015-2017	Chargée de cours, The

					University of British Columbia (Okanagan), Canada
Arnaud Vandecasteele	D	Géographie	MUN	2012-2014	Responsable formation et développement Géoinformatique, Geolab, La Réunion
Garnet Wilson	D	Informatique	MUN	2012	Président et CEO, Afinin Labs, Canada

Étudiants en thèse de doctorat

Nom	Rôle*	Programme	Université	Année	Poste actuel
Simone Cominelli	D	Géographie	MUN	2019-Présent	-
Julie Reimer	D	Géographie	MUN	2018-Présent	-
Mairi Miller	D	Géographie	MUN	2017-Présent	-
Miguel Lorenzi	M	Géographie	MUN	2015-Présent	-
Emilie Novaczek	D	Géographie	MUN	2014-Présent	Biologiste, MPO, Gouv. Canadien
Kristina Boerder	M	Biologie	Dalhousie, NS	2013-2018	Post-doc, Dalhousie U.
Daniel Bégin	D	Géographie	MUN	2012-2018	Consultant SIG
Vincent Lecours	D	Géographie	MUN	2011-2016	Chargé de cours, U. Floride, USA
Kate Kincaid	M	Biologie	MUN	2010-2017	Directeur de département (Recherche), Island School, Bahamas
Melinda Agapito	D	Géographie	MUN	2009-2015	Gestionnaire de laboratoire de recherche
Laura Tranquilla	M	CAPE	MUN	2008-2013	Gestionnaire des programmes Atlantiques, Bird Studies Canada

Étudiants en Master recherche (= 2 ans)

Nom	Rôle*	Programme	Université	Année	Poste actuel
Aaron Sneep	D	Géographie	MUN	2019-Présent	-
Natasha Haycock-Chavez	D	Géographie	MUN	2018-Présent	-
Brandon Tilley	D	Géographie	MUN	2018-Présent	-
Beatrice Proudfoot	D	Géographie	MUN	2016-Présent	Biologiste, MPO, Gouv. Canadien

Callum Mireault	D	Géographie	MUN	2016-2018	(Décédé)
Kaleb McNeil	M	Géographie	MUN	2016-2018	Ingénieur SIG, ESRI, Californie
Lauren Gullage	D	Sc. Environnement	MUN	2015-2016	Analyste SIG, MPO, Gouv. Canada
Jean Granger	M	Géographie	MUN	2015-2019	Analyste géomatique, C- CORE
Simone Cominelli	D	Géographie	MUN	2015-2018	Étudiant en thèse
Golnoosh Farajollahi	M	Ingénierie	U. de Téhéran	2015-2017	Inconnu
Katherine Macpherson	D	Géographie	MUN	2013-2018	Inconnu
Marc Storey	M	Géographie	MUN	2013-2019	Archéologue
Mirella de Oliveira Leis	M	Géographie	MUN	2013-2016	Ingénieure de recherche, MUN
Cassandra Lee	D	Géographie	MUN	2011-2013	Inconnu
Laura Wheeland	M	Biologie	MUN	2011-2014	Biologiste, MPO, Gouv. Canadien
Riley Pllum	M	Biologie	MUN	2010-2015	Directeur de programme, UICN
René Enguehard	D	Géographie	MUN	2009-2012	Développeur senior, Verafin
Mallory Carpenter	M	Géographie	MUN	2009-2012	Gestionnaire – Réseau CRSNG Floodnet
Randal Greene	D	Géographie	MUN	2008-2010	Président, Feaver's Lane
Krista Jones	D	Géographie	MUN	2008-2011	Analyste SIG, MPO, Gouv. Canada
Andrew Cuff	D	Géographie	MUN	2008-2011	Analyste SIG, MPO, Gouv. Canada
André Roy	M	Géographie	MUN	2007-2013	Enseignant, Marine Institute
Amin Zargar	D	Géographie	MUN	2006-2009	Consultant
Valérie Carette	M	Géomatique	Laval U.	2006-2008	Analyste, Levio
Marie-Andrée Levesque	M	Géomatique	Laval U.	2005-2008	Analyste d'affaires, U. Laval

Étudiants de 1^{er} cycle et stagiaires

Nom	Rôle*	Programme	Université	Année
Nolween LePoulain	D	Sciences de l'info. Géographique	Paris Est/IGN	2017
Axel Orger	D	Sciences de l'info. Géographique	Paris Est/IGN	2017
Sofia Borok	D	Géographie	MUN	2015
René Enguehard	D	Géographie	MUN	2009
Krista Jones	D	Géographie	MUN	2008
Raymond LeBris	D	Géographie (France)	MUN	2007
Guillaume Martel	D	Géomatique	U. Laval	2004

6.2.2 Supervision d'assistants de recherche

Nom	Programme	Université	Financement	Année
Alec Robitaille	Géographie	MUN	Projet interne	2017
Steven Mwita	Géographie	MUN	Projet interne	2016
Katleen MacLeod	Géographie	MUN	Projet interne	2016
Kiley Billard	Géographie	MUN	Projet interne	2016
Christina Pretty	Géographie	MUN	Contrat (MPO)	2016
Victoria Howse	Géographie	MUN	Contrat (MPO)	2015-2016
Sofia Borok	Géographie	MUN	Projet	2015
Victoria Tubrett	Géographie	MUN	MUCEP + Contrat	2014-2015
Isaac Boates	Géographie	MUN	CRSNG	2013
Andrew Flood	Géographie	MUN	CRSNG	2011
Pierre Goulet	Géographie	MUN	Contrat	2010
Matt Walsh	Géographie	MUN	Contrat & CSJ	2010
Megan Healey	Géographie	MUN	Contrat	2009
Mardi Gullage	Géographie	MUN	CRSNG	2008
Jonathan Strickland	Biologie	MUN	MUCEP	2007-2008
René Enguehard	Géographie	MUN	CSJ	2007-2008
Ahmed Khan	Géographie	MUN	Fac. Arts	2007
Michael Dinn	Géographie	MUN	MUCEP	2007
Krista Jones	Géographie	MUN	CSJ	2006-2008
Zachary Bartlett	Géographie	MUN	CRSNG	2006
Andrew Cuff	Géographie	MUN	Fond de recherche	2006
Steve Hill	Géographie	MUN	Fond de recherche	2006

Jennifer Guy	Géographie	MUN	Fond de recherche	2006
Brad Durdle	Géographie	MUN	Fond de recherche	2006
Jillian Drover	Géographie	MUN	MUCEP	2005-2006

6.2.3 Supervision d'ingénieurs de recherche

Nom	Université	Année	Poste
Joshua Murphy	MUN	2017-2019	Gestionnaire de systèmes
Matthew Hynes	MUN	2015-2017	Développeur de systèmes
Randal Greene	MUN	2013-2015	Analyste système senior
Helen Goodchild	MUN	2009	Analyste SIG
Philippe LeBlanc	MUN	2006-2007	Analyste SIG

6.3 ADMINISTRATION ET ANIMATION DE LA RECHERCHE

L'organisation et la gestion de la recherche est assez différente entre la France et le Canada, du fait que ce sont les projets, et pas les organismes, qui sont structurés en équipe ou en axes de recherche (i.e. comme le contexte « d'équipe » dans une unité n'existe pas, il n'y a pas de directeur d'équipe). Le système canadien m'a cependant permis de piloter rapidement, à travers des projets, des équipes (groupes) de recherche interdisciplinaires. J'ai ainsi monté mon premier projet de recherche en 2005 (GeoCod), dès les premiers mois de poste à l'Université Memorial, grâce à un programme de financement très compétitif ouvert par le réseau des centres d'excellence canadien GEOIDE. Le projet visait à analyser des bases de données spatio-temporelles de pêches canadiennes afin de mieux comprendre les facteurs à la source des changements de distribution d'espèces dans l'espace et dans le temps, mais aussi de développer des outils d'aide à la prise de décision. Ce projet était supporté financièrement par le gouvernement canadien et impliquait des chercheurs de trois provinces canadiennes, ainsi que deux universités européennes et un organisme de recherche français (l'IFREMER). Depuis, j'ai dirigé, ou participé à, près de 40 projets de recherche de tailles et natures différentes (voir tableau ci-dessous). Parmi ces projets, j'ai entre autres réussi à assurer depuis 2006 mon financement de recherche individuel auprès de l'organisme canadien de financement de la recherche en sciences et génie (le CRSNG – équivalent de l'ANR), financement qui est devenu de plus en plus compétitif.

Les projets que j'ai pilotés varient de petits contrats faits pour le gouvernement ou des ONGs à de larges projets nationaux ou internationaux de plusieurs millions de dollars impliquant des dizaines de chercheurs. Le projet en cours #38 (voir tableau) financé par le gouvernement canadien illustre un projet de recherche relativement appliqué, répondant à des demandes sociétales (cartographie des habitats côtiers pour améliorer la gestion des habitats et écosystèmes côtiers dans une région relativement industrialisée). A l'inverse, les projets #10, 20, 24, 30 et 32 sont des projets impliquant des dizaines de chercheurs à

travers le Canada mais aussi à l'international. Dans ces larges projets, j'ai généralement dirigé certains thèmes de recherche ou groupes de travail. Par exemple, j'ai dirigé un groupe de chercheurs sur le thème de la planification d'aires marines protégées dans le projet CHONe (#10), j'ai dirigé un « cluster » entier dans le projet TBTI (#24), coordonnant les activités d'un groupe de chercheurs de plusieurs pays autour de la question des données dans les petites pêches et je dirige en ce moment un axe de recherche s'intéressant à la mesure de l'efficacité d'aires marines protégées dans le réseau CHONe 2 (#30) qui regroupe trois autres chercheurs canadiens et cinq étudiants.

6.3.1 Direction de projets de recherche (2006-2020)

Mes financements proviennent de sources très variées, incluant des agences nationales de la recherche, des subventions et contrats provenant de différents ministères et de plus petits financements provenant d'associations environnementales à but non lucratif (ex. WWF). Plusieurs de mes projets impliquaient des partenaires industriels.

#	Titre du projet	Chercheurs	Année	C/S*	Financement (\$ CAD)
1	GeoCod - Geomatics for the Sustainable Management of Fish Stocks (<i>GEOIDE NCE</i>)	R. Devillers M.A. Mostafavi G. Rose M.-J. Fortin	2006-2008	S	\$203,000
2	Improving Geospatial Data Usability (<i>NSERC Discovery Grant</i>)	R. Devillers	2006-2011	S	\$105,000
3	Sites of possible interactions between deep-sea fisheries and corals off Newfoundland and Labrador (<i>WWF</i>)	E. Edinger R. Devillers R. Haedrich	2006	C	\$8,675
4	Torbay Trail Mapping (<i>Town of Torbay</i>)	R. Devillers	2006	C	\$2,516
5	Characterisation and modelling of geological structures (pockmarks) on the seabed of the St. Lawrence Estuary (<i>Geological Survey of Canada</i>)	R. Devillers A. Simms	2006-2007	C	\$38,500
6	Habitat Mapping in Gilbert Bay, Labrador, A Marine Protected Area – Phase II (<i>Fisheries and Oceans Canada</i>)	T. Bell J. Wroblewski E. Edinger R. Devillers	2006-2007	C	\$24,948
7	Assessment, characterization and preliminary assessment of multibeam survey data in Nachvak and Saglek Fiords, Northern Labrador (<i>Parks Canada</i>)	T. Bell R. Devillers E. Edinger	2007	C	\$5,854

8	Marine Habitat Mapping in Gilbert Bay, Labrador, Phase III: Detailed habitat characterization in River Out, The Shinneys, and Rock Wall environments <i>(Fisheries and Oceans Canada)</i>	E. Edinger T. Bell R. Devillers J. Wroblewski	2007-2008	C	\$22,500
9	Marine Geomatics Research Infrastructure - Underwater Mapping and Analysis <i>(Canadian Foundation for Innovation – CFI)</i>	R. Devillers	2007-2011	S	\$229,498
10	Canadian Healthy Oceans Network (CHONe) <i>(NSERC Strategic Network)</i>	P. Snelgrove + 49 autres	2008-2012	S	\$5,316,517
11	Multiple-Criteria Approach to Support Integrated Land Management within the Humber Valley Basin, Newfoundland <i>(Humber River Basin Project & IBES)</i>	R. Devillers J. Luther	2008-2010	C	\$34,300
12	Public Protection and Ethical Geospatial Data Dissemination: Social and Legal Aspects <i>(GEOIDE NCE)</i>	M. Gervais R. Devillers + 5 autres	2008-2011	S	\$818,900
13	Acoustic Seabed Classification Using Spectral Analysis Techniques <i>(Fisheries and Oceans Canada)</i>	R. Devillers	2008-2009	C	\$7,500
14	Acoustic Seabed Classification Using Spectral Analysis Techniques <i>(MITACS Accelerate internship program)</i>	R. Devillers	2008-2009	S	\$7,500
15	Multiple-Criteria Approach to Support Integrated Land Management within the Humber Valley Basin, Newfoundland <i>(MITACS Accelerate internship program)</i>	R. Devillers	2009	S	\$7,500
16	Geology, biogeography and genetic connectivity of deep sea corals in the Orphan Knoll, Orphan Basin, and Flemish Pass areas <i>(NSERC Ship Time)</i>	E. Edinger + 4 autres	2009-2010	S	\$424,921
17	Reconceptualising ecosystem complexity <i>(SSHRC RDI)</i>	R. Chuenpagdee + 3 autres	2009-2010	S	\$77,000
18	Geo-visual analytics of capture fisheries statistical data <i>(NSERC SPG)</i>	O. Hoeber W. Banzhaf R. Devillers	2009-2012	S	\$445,200
19	Data analysis towards GIS-based ecoregion delineation in the NL shelf 1995-2007 <i>(Fisheries and Oceans Canada)</i>	R. Devillers E. Edinger	2010	C	\$25,000
20	Canadian Capture Fisheries Research Network <i>(NSERC Research Networks)</i>	R. Stephenson + 32 autres	2010-2015	S	\$5,000,000
21	REALM – Responsive AUV Localization and Mapping <i>(Atlantic Innovation Fund - AIF)</i>	A. Vardy + 4 autres	2010-2015	S	\$3,232,289

22	Designing methods for evaluating and communicating the quality of volunteered geographic information <i>(NSERC Discovery Grant)</i>	R. Devillers	2011-2016	S	\$170,000
23	NSERC Discovery Grant Accelerator Supplement	R. Devillers	2011-2014	S	\$160,000
24	Too Big To Ignore - Global Partnership for Small-Scale Fisheries Research <i>(SSHRC Partnership Grant)</i>	R. Chuenpagdee + 60 autres	2012-2016	S	\$2,259,381
25	Data analysis towards the multiscale characterization of cold-water coral and sponge habitats in Canadian waters <i>(Fisheries and Oceans Canada)</i>	R. Devillers E. Edinger	2013	C	\$20,000
26	SmartICE - (Sea ice Monitoring And Real-Time Information for Coastal Environments) <i>(MEOPAR NCE)</i>	T. Bell + autres	2013-2015	S	\$447,248
27	Convergence d'intelligence géospatiale pour l'innovation <i>(Fonds de Recherche sur la Nature et les Technologies Québec)</i>	M. Mostafavi + 36 autres	2013-2015	S	\$300,000
28	Mapping of Atlantic Wolffish habitat in coastal Newfoundland waters using multi-beam sonar data <i>(Fisheries and Oceans Canada)</i>	R. Devillers E. Edinger	2014	C	\$9,900
29	Mapping benthic habitats of the Eastport Marine Protected Area <i>(Fisheries and Oceans Canada)</i>	R. Devillers + 2 autres	2014-2015	S	\$86,363
30	CHONe 2- Conservation Strategies in Canada's Changing Oceans <i>(NSERC Strategic Network)</i>	P. Snelgrove + 38 autres	2015-2020	S	\$7,843,204
31	Modeling ship movements: Applications for noise exposure to the marine ecosystem <i>(MEOPAR NCE)</i>	R. Canessa + 5 autres	2015-2018	S	\$654,990
32	ResponSEable - Protecting the ocean: our collective responsibility, our common interest: Supporting the development of cost-effective ocean literacy in Europe <i>(EU Horizon 2020)</i>	P. Strosser + 18 autres	2015-2019	S	>\$7,000,000
33	A UAV-based system for hybrid LiDAR and photogrammetry sensing <i>(NSERC RTI)</i>	M. Gong + 3 autres	2016	S	\$148,833
34	New geovisualization methods for supporting marine conservation planning <i>(NSERC Discovery Grant)</i>	R. Devillers	2017-2022	S	\$138,615

35	New geovisualization methods for supporting marine conservation planning (NSERC Discovery Grant Accelerator Supplement)	R. Devillers	2017-2020	S	\$160,000
36	Mapping of Coastal Restoration Areas of Interest in Newfoundland and Labrador (WWF Canada)	R. Devillers	2018-2021	S	\$122,100
37	Stewardship Planning for the Belcher Islands (Arctic Eider Society)	R. Devillers	2018-2020	S	\$35,000
38	Coastal habitat mapping of Placentia Bay, Newfoundland (Fisheries and Oceans Canada)	R. Devillers + 4 autres	2018-2022	S	\$765,810

* S/C: (S) Subvention, (C) Contrat

6.4 ÉVALUATION DE LA RECHERCHE

6.4.1 Jury de thèses et mémoires

- 2019 Quy Thy Truong (Thèse de doctorat, Paris Est, France), « Le vandalisme de l'information géographique volontaire : analyse exploratoire et proposition d'une méthodologie de détection automatique », Rapporteur.
- 2018 Haniyesadat Razavi (Mémoire de maîtrise MSc, Faculté de business et administration, U. Memorial), "Design Guidelines to Improve the Quality of Citizen Science User-Generated Content", Rapporteur.
- 2017 Richard Zavalas (Thèse de doctorat, U. Deakin, Australie), "Protecting ocean neighbourhoods: gradients in the spatial ecology of temperate marine fishes", Rapporteur.
- 2017 Abdullah Ali Faruq (Mémoire de maîtrise MSc, Informatique, Memorial University), "Planning an interesting path", Rapporteur.
- 2014 Gabriel Vatin (Thèse de doctorat, Ecole Mines Paris-Tech), "Formalisation d'un environnement d'aide à l'analyse géovisuelle: Application à la sécurité et sûreté de la maritimisation de l'énergie", Rapporteur.
- 2014 Monjur Ul Hassan (Mémoire de maîtrise MSc, Informatique, U. Memorial), "A Study of Geovisual Analytics for Exploring Event Anomalies Over Multiple Geospatial Datasets", Rapporteur.
- 2014 Joel Gira (Thèse de doctorat, Géomatique, Université Laval), "Improving knowledge about the risks of inappropriate uses of geospatial data by introducing a collaborative approach in the design of geospatial databases", Rapporteur.
- 2012 Thomas Koukoletsos (Thèse de doctorat, University College of London, Angleterre), "A framework for quality evaluation of VGI linear datasets", Rapporteur.
- 2009 Jillian Bambrick (Mémoire de maîtrise MA, Anthropologie et archéologie, U. Memorial), "Paleoeskimo Sealskin Processing in Port au Choix, Northwestern Newfoundland: A Paleoenvironmental Analysis", Rapporteur.
- 2009 Mehrdad Salehi (Thèse de doctorat, Géomatique, U. Laval), "Developing a model and a language to identify and specify the integrity constraints in spatial datacubes", Rapporteur.
- 2008 Zaffar Sadiq (Thèse de doctorat, Géomatique, U. de Melbourne, Australie), "Modeling Spatial Variation of Data Quality in Databases", Rapporteur.

- 2006 Johann Levesque (Mémoire de maîtrise MSc, Géomatique, U. Laval), “*Évaluation de la qualité des données géospatiales – Approche top-down et gestion de la métaqualité*”, Rapporteur.
- 2006 Alison Copeland (Mémoire de maîtrise MSc, Géographie, U. Memorial), “*Benthic Habitat Mapping with Multibeam Sonar in Newman Sound, Terra Nova National Park, Newfoundland*”, Rapporteur.

6.5 PRODUCTION SCIENTIFIQUE

Cette section n’inclue qu’un sous-ensemble des publications (uniquement celles évaluées par un comité de lecture). Le lecteur peut se référer au CV détaillé fourni avec le mémoire pour plus de détails sur l’ensemble des publications.

Statistiques générales (manuscrits publiés)

	Livre/Volumes édités	Chapitre de livre	Article avec comité de lecture	Autre publication avec comité de lecture	Sans comité de lecture	Rapports techniques	Autre	Total
Total	7	19	52	113	49	12	38	290

Statistiques Google Scholar : Total de 2631 citations, H-index: 25

Note: Mon domaine de recherche est très inter-disciplinaire et touche donc à différentes cultures en terme de publication (p.ex. Géographie, Biologie, Informatique, Sciences de l’ingénieur). Dans certaines disciplines (ex. Biologie), les publications dans des revues à comité de lecture sont les plus valorisées, dans d’autres (ex. Informatique ou Sciences de l’ingénieur) des articles dans certaines conférences peuvent être considérés comme étant plus important que dans des journaux.

Aussi, le système Canadien encourageait fortement les enseignants-chercheurs à prioriser les publications collaboratives impliquant des étudiants comme premiers auteurs (étant donné que le rôle premier est la formation). Les noms des étudiants sont soulignés dans les publications.

6.5.1 Livres / Volumes édités / Monographie

- 2015 Olteanu-Raimond A.-M., de Runz C. et **Devillers R.** (eds). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-3/W3*.
- 2013 **Devillers R.**, Lee C., Canessa R. et Sherin A. (eds). *Proceedings of CoastGIS’13: Monitoring and adapting to change on the coast*. Victoria, BC, Canada, June 18-21st, 230p.
- 2009 **Devillers R.** et Goodchild H. (eds), *Spatial Data Quality: From Process to Decisions*. CRC Press, Boca Raton (FL), USA, 222p.
- 2008 **Devillers R.** et Gillespie R. (Guest Editors), *Marine Geomatics*. Special issue of *Geomatica*, 62(4).
- 2007 Edinger E., Baker K., **Devillers R.** et Wareham V., *Deep-sea coral distribution and bycatch from commercial fisheries off Newfoundland and Labrador*. World Wildlife Fund Canada (WWF), 41p.
- 2006 **Devillers R.** et Jeansoulin R. (Eds). *Fundamentals of Spatial Data Quality*. ISTE, London, UK, 312p.
- 2005 **Devillers R.** et Jeansoulin R. (Eds). *Qualité de l’information géographique*. In: IGAT Series (Information géographique et aménagement du territoire), Hermès, France, 349p.

6.5.2 Chapitres de livre

- 2020 Lecours V., Gábor L., Edinger E. et **Devillers R.** Fine-scale habitat characterization of The Gully, the Flemish Cap and the Orphan Knoll, Northwest Atlantic, with a focus on cold-water

- corals. In: *Seafloor Geomorphology as Benthic Habitat: GeoHab Atlas of seafloor geomorphic features and benthic habitats. 2nd Edition* (P.T. Harris & E.K. Baker, eds). Elsevier, p. 735-751.
- 2019 Iphar C., Costé B., Napoli A., Ray C. et **Devillers R.** Integrity and Trust of Geographic Information. In: *Geographic Data Imperfection: From Theory to Applications* (Pinet F., Batton-Hubert M. and Desjardin E., eds). John Wiley and Sons, Inc., p.45-72.
- 2019 **Devillers R.**, Desjardin E. et de Runz C. Imperfections in Geographic Information : Concepts and Terminologies. In: *Geographic Data Imperfection: From Theory to Applications* (Pinet F., Batton-Hubert M. and Desjardin E., eds). John Wiley and Sons, Inc., p.11-24.
- 2019 Iphar C., Costé B., Napoli A., Ray C. et **Devillers R.** Intégrité et confiance de la donnée géographique. In: *Imperfections des données géographiques: de la théorie aux applications* (Pinet F., Batton-Hubert M. et Desjardin E., eds). ISTE Publishing, p.45-72.
- 2019 **Devillers R.**, Desjardin E. et de Runz C. Concepts et terminologies de l'imperfection de l'information géographique. In: *Imperfections des données géographiques: de la théorie aux applications* (Pinet F., Batton-Hubert M. et Desjardin E., eds). ISTE Publishing, p.11-24.
- 2019 Agapito, M., Chuenpagdee, R., **Devillers, R.**, Gee, J., Johnson, A.F., Pierce, G.J. et Trouillet, B. Beyond the basics: Improving information about small-scale fisheries. In: *Transdisciplinarity for Small-Scale Fisheries Governance* (R. Chuenpagdee et S. Jentoft, eds.), p.377-395.
- 2015 Vandecasteele, A. et **Devillers, R.** Improving Volunteered Geographic Information Quality Using a Tag Recommender System: The Case of OpenStreetMap. In: *OpenStreetMap in GIScience* (J. Jokar Arsanjani et al., eds.). Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, Springer, p.59-80.
- 2012 **Devillers, R.**, Nelson, T. et Liang, S. The GEOIDE Students' Network (GSN) and the GEOIDE Summer School (GSS) – History and lessons learned from thirteen years of students' networking in Canada. In: *The value added of scientific networking: Examples contributed by GEOIDE Network participants 1998-2012* (M. Wachowicz et N. Chrisman, eds).
- 2012 Copeland, A., Edinger, E., Bell, T., LeBlanc, P., Wroblewski, J. et **Devillers, R.** Geomorphic features and benthic habitats of a subarctic fjord: Gilbert Bay, Southern Labrador, Canada. In *GeoHAB Atlas of Seafloor Geomorphic Features and Benthic Habitats* (P.T. Harris et E.K. Baker, eds), p. 309-328.
- 2009 Gervais, M., Bédard, Y., Levesque, M.-A., Bernier, E. et **Devillers, R.** Data Quality Issues and Geographic Knowledge Discovery. In *Geographic Data Mining and Knowledge Discovery*, 2nd edition (eds. H.J. Miller et J. Han).
- 2006 **Devillers, R.** et Jeansoulin, R. Introduction. In *Fundamentals of Spatial Data Quality* (R. Devillers et R. Jeansoulin, eds.), ISTE, p.17-20.
- 2006 **Devillers, R.** et Jeansoulin, R. Spatial Data Quality: Concepts. In *Fundamentals of Spatial Data Quality* (R. Devillers et R. Jeansoulin, eds.), ISTE, p.31-42.
- 2006 **Devillers, R.** et Beard, K. Communication and Use of Spatial Data Quality Information in GIS. In *Fundamentals of Spatial Data Quality* (R. Devillers et R. Jeansoulin, eds.), ISTE, p.237-254.
- 2006 Vasseur, B., Jeansoulin, R., **Devillers, R.** et Frank, A. External Quality evaluation of Geographical Applications: An Ontological Approach. In *Fundamentals of Spatial Data Quality* (R. Devillers et R. Jeansoulin, eds.), ISTE, p.255-270.
- 2005 **Devillers, R.** et Jeansoulin, R. Introduction. In *IGAT (Information géographique et aménagement du territoire): Qualité de l'information géographique* (R. Devillers et R. Jeansoulin, eds.), Hermès, France p.19-24.
- 2005 **Devillers, R.** et Beard, K. Communication et utilisation de l'information sur la qualité dans les SIG. In *IGAT (Information géographique et aménagement du territoire): Qualité de l'information géographique* (R. Devillers et R. Jeansoulin, eds.), Hermès, France p.275-292.

- 2005 **Devillers, R.** et Jeansoulin, R. Qualité de l'information géographique : concepts généraux. In *IGAT (Information géographique et aménagement du territoire): Qualité de l'information géographique* (R. Devillers et R. Jeansoulin, eds.), Hermès, France, p.37-48.
- 2005 Vasseur, B., Jeansoulin, R. et **Devillers, R.** Évaluation de la qualité externe de l'information géographique: une approche ontologique. In *IGAT (Information géographique et aménagement du territoire): Qualité de l'information géographique* (R. Devillers et R. Jeansoulin, eds.), Hermès, France p.293-310.
- 2002 Bédard, Y., Bernier, E. et **Devillers R.** Implantation du concept de VUEL. In: *IGAT (Information géographique et aménagement du territoire): Généralisation et représentations multiples* (Ruas A., ed.), Hermès, p.149-162.

6.5.3 Articles dans des revues avec comité de lecture

- Soumis Cockerell B., Pressey R.L., Grech A., Alvarez-Romero J.G., Ward T. et **Devillers R.** Representation does not necessarily reduce threats to biodiversity: Downgrading of Australia's Commonwealth marine protected area system, 2012-2018. *Biological Conservation*. [IF: 4,45]
- Soumis Cominelli S., Halliday W.D., Pine M.K., Hilliard R.C., Lawson J.W., Duman N.I. et **Devillers R.** Vessel noise in spatially constricted areas: Modeling acoustic footprints of large vessels in the Cabot Strait, Eastern Canada. *Ocean & Coastal Management*. [IF: 2,60]
- Soumis **Devillers R.**, Pressey R.L., Ward T., Grech A., Kittinger J., Edgar G. et Watson R. Residual marine protected areas five years on: are we still favouring ease of establishment over need for protection? *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*. [IF: 2,94]
- Soumis Proudfoot B., **Devillers R.**, Brown C.J., Edinger E. et Copeland A. Seafloor mapping to support conservation planning in an ecologically unique fjord in Newfoundland and Labrador, Canada. *Journal of Coastal Conservation*. [IF: 1,26]
- Soumis Proudfoot B., **Devillers R.** et Brown C.J. Integrating fine-scale seafloor mapping and seascape connectivity metrics into marine conservation prioritization. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*. [IF: 2,94]
- 2020 Moudrý V. et **Devillers R.** (2020). Quality and usability challenges of global marine biodiversity databases: An example for marine mammal data. *Ecological Informatics*, 101051. [IF: 2,31]
- 2019 Chuenpagdee R., Rocklin D., Bishop D., Hynes M., Greene R., Lorenzi M.R. et **Devillers R.** The global information system on small-scale fisheries (ISSF): A crowdsourced knowledge platform. *Marine Policy*, 101 : 158-166. [IF: 2,87]
- 2019 Claudet J., Bopp L., Cheung W.W., **Devillers R.**, Escobar-Briones E., Haugan P., ... et Mullineaux L. (2019). A Roadmap for Using the UN Decade of Ocean Science for Sustainable Development in Support of Science, Policy, and Action. *One Earth*. [IF: aucun – nouvelle revue]
- 2019 Cominelli S., Lehy M., **Devillers R.** et Hall B. Geovisualization tools to inform the management of vessel noise in support of species' conservation. *Ocean and Coastal Management*, 169 : 113-128. [IF: 2,60]
- 2019 de Oliveira Leis M., **Devillers R.**, Medeiros R. P. et Chuenpagdee R. Mapping fishers' perceptions of marine conservation in Brazil: An exploratory approach. *Ocean & Coastal Management*, 167: 32-41. [IF: 2,60]
- 2019 **Devillers R.**, Lemieux C. J., Gray P. A. et Claudet J. (2019). Canada's uncharted conservation approach. *Science*, 364(6447): 1243-1243. [IF: 41,06]
- 2019 Lemieux C.J., Gray P.A., **Devillers R.**, Wright P.A., Dearden P., Halpenny E.A., Groulx M., Beechey T.J. et Beazley K. How the race to achieve Aichi Target 11 could jeopardize the effective conservation of biodiversity in Canada and beyond. *Marine Policy*, 99: 312-323. [IF: 2,87]

- 2019 Muntoni M., **Devillers R.** et Koen-Alonso M. (2019). Science should not be left behind during the design of a marine protected area: meeting conservation priorities while integrating stakeholder interests. *FACETS*, 4(1): 472-492. [IF: aucun – nouvelle revue]
- 2019 Novaczek E., **Devillers R.** et Edinger E. (2019). Generating higher resolution regional seafloor maps from crowd-sourced bathymetry. *PloS one*, 14(6), e0216792. [IF: 2.78]
- 2018 Cominelli S., **Devillers R.**, Yurk H., MacGillivray A., McWhinnie L. et Canessa R. Noise exposure from commercial shipping for the southern resident killer whale population. *Marine Pollution Bulletin*, 136: 177-200. [IF: 3,78]
- 2018 Bégin D., **Devillers R.** et Roche S. The life cycle of contributors in collaborative online communities-the case of OpenStreetMap. *International Journal of Geographical Information Science*, 32(8): 1611-1630. [IF: 3,55]
- 2017 Lecours V., **Devillers R.**, Edinger E.N., Brown C.J. et Lucieer V.L. Influence of artefacts in marine digital terrain models on habitat maps and species distribution models: a multiscale assessment. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 3(4): 232-246. [IF: 5,32]
- 2017 Gullage L., **Devillers R.** et Edinger E. Predictive distribution modelling of cold-water corals in the Newfoundland and Labrador region. *Marine Ecology Progress Series*, 582: 57-77. [IF: 3,56]
- 2017 Bégin D., **Devillers R.** et Roche S. Contributors' Withdrawal from Online Collaborative Communities: The Case of OpenStreetMap. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(11): 340. [IF: 1,84]
- 2017 Lecours V., **Devillers R.**, Lucieer V.L. et Brown C.J. Artefacts in marine digital terrain models: a multiscale analysis of their impact on the derivation of terrain attributes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(9): 5391-5406. [IF: 5,63]
- 2017 Kincaid K., Rose G. et **Devillers R.** How fisher-influenced marine closed areas contribute to ecosystem-based management: A review and performance indicator scorecard, *Fish and Fisheries*, 18(5): 860-876. [IF: 6,66]
- 2017 Gupta N. and **Devillers R.** Geographic visualization in archaeology. *Journal of Archaeological Method and Theory*, 24(3): 852-885. [IF: 2,57]
- 2017 Bégin D., **Devillers R.** et Roche S. Contributors' enrollment in collaborative online communities: the case of OpenStreetMap. *Geo-spatial Information Science*, 20(3): 282-295.
- 2017 Hameed S.O., Cornick L.A., **Devillers R.** et Morgan L.E. Incentivizing More Effective Marine Protected Areas with the Global Ocean Refuge System (GLORES). *Frontiers in Marine Science*, 4: 208.
- 2017 Novaczek E., Howse V., Pretty C., **Devillers R.**, Edinger E. et Copeland A. Limited Contribution of Small Marine Protected Areas to Regional Biodiversity: The Example of a Small Canadian No-Take MPA. *Frontiers in Marine Science*, 4: 174.
- 2017 Novaczek E., **Devillers R.**, Edinger E.N. et Mello L. High-resolution seafloor mapping to describe coastal denning habitat of a Canadian species at risk: Atlantic wolffish (*Anarhichas lupus*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 74(12): 2073-2084.
- 2017 Lecours V., **Devillers R.**, Simms A.E., Lucieer V.L. et Brown C.J. Towards a Framework for Terrain Attribute Selection in Environmental Studies. *Environmental Modelling & Software*, 89: 19-30.
- 2017 Lecours V., Brown C.J., **Devillers R.**, Lucieer V.L. et Edinger E.N. Comparing selections of environmental variables for ecological studies: a focus on terrain attributes. *PloS one*, 11(12): e0167128
- 2016 Bailey M., Charles A., Cheung W., **Devillers R.**, Duck T., Favaro B., Hoover C., Mason T., Milley C., Otto S., Pauly D., Sumaila R., et Tyedmers P. Canada at a *crossroad*: The imperative for realigning ocean policy with ocean science. *Marine Policy*, 63: 53-60.
- 2015 Cuff A., Anderson J. et **Devillers R.** Comparing surficial sediments maps interpreted by experts with dual-frequency acoustic backscatter on the Scotian Shelf, Canada. *Continental Shelf Research*, 110: 149-161.

- 2015 Lecours V., **Devillers R.**, Schneider D.C., Lucieer V.L., Brown C.J., et Edinger E.N. Spatial scale and geographic context in benthic habitat mapping: review and future directions. *Marine Ecology Progress Series*, 535: 259-284.
- 2015 Fontaine A., **Devillers R.**, Peres-Neto P.R. et Johnson L.E. Delineating marine ecological units: a novel approach for deciding which taxonomic group to use and which taxonomic resolution to choose. *Diversity and Distributions*, 21(10): 1167-1180.
- 2015 McFarlane Tranquilla L., Montevecchi W.A., Hedd A., Regular P.M., Robertson G.J., Fifield D.A. et **Devillers R.** Ecological segregation among Thick-billed Murres (*Uria lomvia*) and Common Murres (*Uria aalge*) in the Northwest Atlantic persists through the nonbreeding season. *Canadian Journal of Zoology*, 93(6): 447-460.
- 2015 **Devillers R.**, Pressey R.L., Grech A., Kittinger J.N., Edgar G.J., Ward T. et Watson R. Reinventing residual reserves in the sea: are we favouring ease of establishment over need for protection? *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 25(4): 480-504.
- 2014 Vandecasteele A. et **Devillers R.** Analyzing vessel movement data using an ontology framework based on semantic trajectory and semantic events. *Marine Geodesy*, 37(2): 126-144.
- 2014 Ban N.C., Maxwell S.M., Dunn D.C., Hobday A.J., Bax N.J., Ardron J.A., Gjerde K.M., Game E.T., **Devillers R.**, Kaplan D.M., Dunstan P.K., Halpin P.A., et Pressey R.L. Better integration of sectoral planning and management approaches for the interlinked ecology of the open oceans. *Marine Policy*, 49: 127-136.
- 2014 Lee C., **Devillers R.** et Hoerber O. Navigating spatio-temporal data with temporal zoom and pan in a multi-touch environment. *International Journal of Geographic Information Science*, 28(5): 1128-1148.
- 2014 Jones K., **Devillers R.**, Bédard Y. et Schroth O. Visualizing perceived spatial data quality of 3D objects within virtual globes. *International Journal of Digital Earth*, 7(10): 771-788.
- 2014 Ban N.C., Bax N.J., Gjerde K.M., **Devillers R.**, Dunn D.C., Dunstan P.K., Hobday A.J., Maxwell S.M., Kaplan D.M., Pressey R.L., Ardron J.A., Game E.T. et Halpin P.A. Systematic Conservation Planning: a better recipe for managing the high seas for biodiversity conservation and sustainable use. *Conservation Letters*, 7(1): 41-54.
- 2013 Copeland A., Edinger E., **Devillers R.**, Bell T., LeBlanc P. et Wroblewski J. Marine habitat mapping in support of marine protected area management in a sub-arctic fjord: Gilbert Bay, Labrador, Canada. *Journal of Coastal Conservation*, 17(2): 225-237.
- 2013 Enguehard R., **Devillers R.** et Hoerber O. Comparing interactive and automated mapping systems for supporting fisheries enforcement activities – A case study on Vessels Monitoring Systems (VMS). *Journal of Coastal Conservation*, 17(1): 105-119.
- 2012 Windle M., Rose G., **Devillers R.** et Fortin M.-J. Spatio-temporal variations of invertebrate cod-temperature relationships on the Newfoundland shelf, 1995-2009. *Marine Ecology Progress Series*, 469: 263-278.
- 2012 Enguehard R., Hoerber O. et **Devillers R.** Interactive exploration of movement data: A case study of geovisual analytics for fishing vessel analysis. *Information Visualization*, 12(1): 65-84.
- 2011 Greene R., **Devillers R.**, Luther J. et Eddy B. GIS-Based Multicriteria Decision Analysis. *Compass Geography*, 5(6): 412-432.
- 2010 Greene R., Luther J., **Devillers R.** et Eddy B. Exploring and Evaluating Land Management Scenarios using GIS-based Multiple Criteria Decision Analysis: Case study in a forest-dominated landscape. *Forest Ecology and Management*, 260: 2102-2114.
- 2010 **Devillers R.**, Stein A., Bédard Y., Chrisman N., Fisher P. et Shi W. 30 years of research on Spatial Data Quality – Achievements, failures and opportunities. *Transactions in GIS*, 14(4): 387-400.
- 2010 Delavar M. et **Devillers R.** Spatial Data Quality: From process to decisions. *Transactions in GIS*, 14(4): 379-386.

- 2010 Ruppert J., Fortin M.-J., Rose G.A. et **Devillers R.** Environmentally mediated effects on the importance of cod abundance patterns to fish community composition in the Gulf of St. Lawrence, 1991 – 2003. *Marine Ecology Progress Series*, 411: 189-201.
- 2010 Windle M., Rose G., **Devillers R.** et Fortin M.-J. Exploring spatial non-stationarity of fisheries survey data using geographically weighted regression (GWR): an example from the Northwest Atlantic. *ICES Journal of Marine Science*. 67(1): 145-154.
- 2009 Ruppert J., Fortin M.-J., Rose G.A. et **Devillers R.** Atlantic cod distribution: changing benthic and abiotic environments alter site fidelity. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 66(6): 909-918.
- 2008 Carette V., Mostafavi M.A., **Devillers R.**, Rose G. et Hashemi L. Extending Marine GIS capabilities: 3D Dynamic and interactive representation of fish aggregations using 3D Delaunay Triangulation and Alpha Shapes. *Geomatica*, 62(4): 361-374.
- 2007 Bédard Y., Bernier E., Badard T., Chrisman N., Roche S., Edwards G., Mostafavi M.A., Pouliot J., Gervais M., Hubert F., Larrivée S., Proulx M.-J., Rivest S., Nadeau M., Dubé É., Brodeur J. et **Devillers R.** Research in Geographic Information Systems, Data Management and Dissemination, and New Geospatial Technologies. *Geomatica*, 61(3): 299-314.
- 2007 **Devillers R.**, Bédard Y., Jeansoulin R. et Moulin B. Towards Spatial Data Quality Information Analysis Tools for Experts Assessing the Fitness for Use of Spatial Data. *International Journal of Geographical Information Science*, 21(3): 261-282.
- 2006 **Devillers R.**, Bédard Y. et Jeansoulin R. Multidimensional management of geospatial data quality information for its dynamic use within Geographical Information Systems. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing (PE&RS)*, 71(2): 205-215.
- 2004 **Devillers R.**, Bédard Y. et Gervais M. Indicateurs de qualité pour réduire les risques de mauvaise utilisation des données géospatiales. *Revue Internationale de Géomatique*, 14(1): 35-57.
- 2000 **Devillers R.** et de Vernal A. Dinocyst distribution in surface sediments of the northern North Atlantic in relation with nutrients and productivity in surface waters. *Marine Geology*, 166(1-4): 103-124.
- 1999 St-Onge G., Leduc J., Bilodeau G., de Vernal A., **Devillers R.**, Hillaire-Marcel C., Loucheur V., Marmen S., Mucci A. et Zhang D. Caractérisation géochimique, isotopique et micropaléontologique d'événements sédimentologiques récents dans le fjord du Saguenay, Canada. *Géographie Physique et Quaternaire*, 53(3): 339-350.

6.6 AUTRES PUBLICATIONS AVEC COMITE DE LECTURE

- 2018 **Devillers R.** From data to knowledge bathymetric data crowdsourcing and geomorphometry in the marine environment. *GeoAdvances - 5th International Conference on Geoinformation Science*, Casablanca, Maroc, 10-11 octobre.
- 2018 Novaczek E., Hynick E., Young M., Ierodiaconou D. et **Devillers R.** Large-scale seabed mapping with crowd-sourced bathymetry. Australian Marine Sciences Association meeting (AMSA), Freemantle, Australie, 7-11 juillet.
- 2018 Reimer J. et **Devillers R.** Embedding community reality in marine spatial planning: can communities and their experiences be better captured in MSP? *Communities, conservation and livelihoods international conference*, Halifax, NS, Canada, May 28-30th.
- 2018 Mireault C.A., Lawton P. and **Devillers R.** Environmental characterization of two biogenic habitat species in the coastal waters of New Brunswick, Canada. *World Conference on Marine Biodiversity*, Montréal, QC, Canada, May 13-16th.
- 2018 Proudfoot B., **Devillers R.**, Brown C.J., Wiersma Y. and Edinger E. Beyond Representativity: Integrating Benthoscape Structure, Connectivity and Representativity into Marine Protected Area Design. *World Conference on Marine Biodiversity*, Montréal, QC, Canada, May 13-16th.

- 2018 Lecours V., Misiuk B., Edinger E. and **Devillers R.** Evaluating Oceanographic Drivers of Deep-Sea Corals at Multiple Thematic Scales. *18th International GeoHab Symposium*, Santa Barbara, CA, USA, May 7-10th.
- 2018 Novaczek E., Misiuk B., **Devillers R.**, Hynick E., Li M., Cameron G. and King N. Low-cost, high-resolution seafloor mapping: Making the most of crowd-sourced single-beam bathymetry. *18th International GeoHab Symposium*, Santa Barbara, CA, USA, May 7-10th.
- 2018 Novaczek E., Misiuk B. and **Devillers R.** Regional seafloor mapping and species distribution modelling based on crowd-sourced bathymetry. *13th CoastGIS Symposium*, Ísafjörður, Iceland, September 27-29th. *13th CoastGIS Symposium*, Ísafjörður, Iceland, September 27-29th.
- 2018 Proudfoot B., **Devillers R.**, Brown C.J. Wiersma Y. and Edinger E. Integrating seafloor mapping, landscape ecology and marine conservation planning. *13th CoastGIS Symposium*, Ísafjörður, Iceland, September 27-29th. *13th CoastGIS Symposium*, Ísafjörður, Iceland, September 27-29th.
- 2018 Cominelli S., Leahy M. and **Devillers R.** GIS tools for mitigating the impacts of ocean noise on marine mammals in coastal waters. *13th CoastGIS Symposium*, Ísafjörður, Iceland, September 27-29th.
- 2018 Novaczek E., Hynick E., Young M., Ierodionou D. and **Devillers R.** Large-scale seabed mapping with crowd-sourced bathymetry. *Australian Marine Sciences Association Conference*, Adelaide, Australia, July 1-5th.
- 2017 Cominelli S. and **Devillers R.** Noise exposure of the Southern Resident Killer Whale population, Canada. *21st Annual conference of the Society for Conservation GIS*, Monterey, CA, USA, July 15-18th.
- 2017 Novaczek E., Misiuk B., **Devillers R.** and Hynick E. Creating the highest resolution bathymetry, geomorphology and substrate maps for the Newfoundland and Labrador waters. *Geomatics Atlantic Symposium*, St. John's, NL, Canada, November 23-24th.
- 2017 Cominelli S., Leahy M., Luubert M., Hall B. and **Devillers R.** Geovisualization of shipping noise exposure for whales in the Salish Sea, Canada. *GIS in Education and Research Conference*, Toronto, ON, Canada, October 11th.
- 2017 **Devillers R.** and Chuenpagdee R. Crowdsourcing fisheries information: The information system on small-scale fisheries (ISSF). *7th International Symposium on GIS/Spatial Analyses in Fishery and Aquatic Sciences*, Hokkaido, Japan, August 21-25th.
- 2017 Lecours V. and **Devillers R.** Impacts of mapmaking decisions on marine habitat maps and their implications for fisheries management. *7th International Symposium on GIS/Spatial Analyses in Fishery and Aquatic Sciences*, Hokkaido, Japan, August 21-25th.
- 2017 Cominelli S., Leahy M., Luubert M., Hall B. and **Devillers R.** Geovisualization of shipping noise exposure for whales in the Salish Sea, Canada. *37th Annual Esri User Conference*, San Diego, USA, July 10-14th.
- 2017 Lecours V. and **Devillers R.** Exploring double standards in remote sensing: the case of acoustic technologies. *Earth Observation Summit*, Montréal, QC, Canada, June 20-22nd.
- 2017 Muntoni M., **Devillers R.**, Koen-Alonso M. How conservation science got left behind in the design of the largest Canadian marine protected area. *Canadian Society for Ecology and Evolution (CSEE) Congress*, Victoria, BC, Canada, May 7-10th.
- 2017 Gullage L., Edinger E. and **Devillers R.** Modeling distributions of cold-water corals in the Newfoundland and Labrador region using MaxEnt. *17th International GeoHab Symposium*, Halifax, NS, Canada, May 1-5th.
- 2017 Novaczek E., Proudfoot B., Howse V., Pretty C., **Devillers R.**, Edinger E. and Copeland A. From single-species to biodiversity conservation? Habitat mapping and biodiversity analysis of the Eastport Marine Protected Area, Canada. *17th International GeoHab Symposium*, Halifax, NS, Canada, May 1-5th.

- 2017 Lecours V., Devillers R., Brown C.J., Lucieer V.L. and Edinger E.N. Can we trust our habitat maps? Assessing map sensitivity for decision-making purposes. *17th International GeoHab Symposium*, Halifax, NS, Canada, May 1-5th.
- 2017 Mireault C.A., Lawton P. and **Devillers R.** Habitat characterization of *Beltenia ovifera* and *Modiolus modiolus* in the Head Harbour/West Isles/Passages Ecologically and Biologically Significant Areas, New Brunswick, Canada. *17th International GeoHab Symposium*, Halifax, NS, Canada, May 1-5th.
- 2017 Fontaine A. and **Devillers R.** Les arbres de régression multivariable: Une méthode innovante pour construire des systèmes de classification hiérarchiques écologiques. *Cartographie des Habitats Benthiques: de l'acquisition à la restitution (CARHAMB'AR)*, Brest, France, March 14-16th, 6p.
- 2017 Gupta N. and **Devillers R.** Geographic Visualization as Knowledge Generation in Archaeology. *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology Conference*. Atlanta, USA, March 14-16th.
- 2016 Lewis R., **Devillers R.**, Lewis S., Bose N., Walker D., King P., Ridgley N., Husain T., Munroe J. and Vardy A. MERLIN – A decade of large AUV experience at Memorial University of Newfoundland. *IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV) Conference*, Tokyo, Japan, November 6-9th.
- 2016 Novaczek E., **Devillers R.**, Edinger E. and Mello L. High Resolution Habitat Mapping to Inform Conservation of Atlantic Wolffish. *Atlantic Society of Fish and Wildlife Biologists Annual Meeting*, Summerside, PEI, October 25-27th.
- 2016 Bégin D., **Devillers R.** and Roche S. The Life Cycle of Volunteered Geographic Information (VGI) Contributors: The OpenStreetMap Example. *9th International Conference on Geographic Information Science*, Montréal, QC, Canada, September 27-30th, 4p.
- 2016 Macpherson K., **Devillers R.**, Edinger E. and Fisher J. Benthic habitat mapping of Smith Sound, Newfoundland to characterize the refuge of a recovering fish stock. *4th International Marine Conservation Congress*, St. John's, NL, Canada, July 30th- August 3rd.
- 2016 Lecours V., **Devillers R.** and Brown C.J. Integrating Geographic Context in Marine Habitat Mapping for Better Decision-Making. *4th International Marine Conservation Congress*, St. John's, NL, Canada, July 30th- August 3rd.
- 2016 Howse V., Novaczek E., Pretty C., **Devillers R.** and Edinger E. Habitat mapping and contribution to biodiversity conservation of a small Canadian no-take MPA. *4th International Marine Conservation Congress*, St. John's, NL, Canada, July 30th- August 3rd.
- 2016 Lecours V., **Devillers R.**, Brown C.J., Simms A., Lucieer V.L. and Edinger E.N. Too Many Cooks Spoil the Broth: Assessing Which Combination of Terrain Attributes Best Serve Habitat Mapping. *16th International GeoHab Symposium*, Winchester, UK, May 2-6th.
- 2016 Novaczek, R., **Devillers, R.**, Edinger, E. and Mello, L. Nearshore habitat of Atlantic wolffish, a species of special concern. *Canadian Conference for Fisheries Research (CCFFR)*, St. John's, NL, January 7-9th.
- 2015 Lecours, V. and **Devillers, R.** Assessing the spatial data quality paradox in the deep-sea. *Proceedings of the Spatial Knowledge and Information (SKI) Canada 2015 Conference*, Banff, AB, Canada, 7p.
- 2015 Lecours, V., Simms, A., **Devillers, R.**, Edinger, E. and Lucieer, V. Finding the Best Combinations of Terrain Attributes and GIS software for Meaningful Terrain Analysis. *Geomorphometry 2015 conference*, Poznan, Poland, June 2015.
- 2015 Novaczek, E., **Devillers, R.**, Edinger, E. and Mello, L. Mapping habitat for data-deficient marine species: Atlantic Wolffish in Conception Bay, Newfoundland. *GEOHAB Marine Biological and Geological Habitat Mapping Conference*. Salvador, Brazil.

- 2015 Macpherson, K., Walker D., Kennedy N., King P., Lewis R. and **Devillers R.** Overcoming the challenge of investigating deep water artefacts through application of side scan sonar on autonomous underwater vehicles. *47th Annual Meeting of the Canadian Archaeological Association*, St. John's, NL, May 2015.
- 2015 **Devillers, R.** Volunteered Geographic Information (VGI) and other cartography (r)evolutions – Will there be a “raison d’être” for national mapping agencies in a few decades from now? *International Workshop on Spatial Data and Map Quality*, Valetta, Malta, January 20th.
- 2014 MacPherson, K., Walker, D., **Devillers, R.**, Kennedy, N., King, P., Lewis, R., Munroe, J. & Vardy, A. The Development of AUV survey strategies for multidisciplinary use. *Oceans’14*, St. John's, Canada, September 18th.
- 2014 **Devillers, R.**, Greene, R., Vandecasteele, A. & Chuenpagdee, R. Fisheries are not only about fish: The Information System on Small-Scale Fisheries (ISSF). *Sixth International Symposium on GIS/Spatial Analyses in Fishery and Aquatic Sciences*, Tampa, Florida, USA, August 25-29th.
- 2014 **Devillers, R.**, Enguehard, R. & Hoerber, O. Interactive mapping and analysis of VMS data in support of fisheries enforcement activities in Eastern Canada. *Sixth International Symposium on GIS/Spatial Analyses in Fishery and Aquatic Sciences*, Tampa, Florida, USA, August 25-29th.
- 2014 **Devillers, R.**, Pressey, B., Grech, A., Kittinger, J., Graham, E., Ward, T. & Watson, R. Reinventing residual reserves in the sea: are we favouring ease of establishment over need for protection? *International Marine Conservation Congress*, Glasgow, UK, August 14-18th.
- 2014 Hamel, M.A., Pressey R., Andréfouët, S., **Devillers, R.** & Keith D. Understanding and accounting for the limitations of biophysical maps in conservation planning: a risk assessment framework for practitioners. *International Marine Conservation Congress*, Glasgow, UK, August 14-18th.
- 2013 Fontaine, A., **Devillers, R.**, Peres-Neto, P. and Johnson, L.E. Testing the influence of taxonomic group and resolution on the delineation of ecological units. *IBS Special Meeting on the Geography of Species Associations. Montréal (QC), Canada.* November 15-17th.
- 2013 **Devillers, R.**, Pressey, R., Grech, A., Kittinger, J.N., Edgar, G., Ward, T.J. and Watson, R. Avoiding residual MPAs: a framework to avoid perverse outcomes for biodiversity. *3rd International Marine Protected Areas Congress (IMPAC3)*, Marseille, France, October 21-27th.
- 2013 Agapito, M., **Devillers, R.**, Edinger, E., Chuenpagdee, R. and Koen-Alonso, M. A new method for integrating competing stakeholders’ priorities in a collaborative MPA planning process. *3rd International Marine Protected Areas Congress (IMPAC3)*, Marseille, France, October 21-27th.
- 2013 Agapito, M., Edinger, E., **Devillers, R.**, Chuenpagdee, R. and Koen-Alonso, M. Decision realities: tradeoffs and ‘hard’ choices in GIS-based marine conservation planning. *International Congress for Conservation Biology*, Baltimore, USA, July 21-25th.
- 2013 Pressey, B., **Devillers, R.**, Edgar, G., Grech, A., Kittinger, J.N., Ward, T.J. and Watson, R. Reinventing residual reserves in Australian marine waters: ease of establishment or need for protection? *AMSA 2013 Conference*, Gold Coast, Australia, July 7-11th.
- 2013 Vandecasteele, A., **Devillers, R.** and Napoli, A. A semi-supervised learning framework based on spatio-temporal semantic events for maritime anomaly detection and behavior analysis. *Proceedings of the 11th International Symposium for GIS and Computer Cartography for Coastal Zone Management (CoastGIS)*, Victoria, Canada, June 18-21st.
- 2013 **Devillers, R.** and De Freitas, D.M. The use of GIS and geospatial technologies in support of coastal zones management – Results of an international survey. *Proceedings of the 11th International Symposium for GIS and Computer Cartography for Coastal Zone Management (CoastGIS)*, Victoria, Canada, June 18-21st.

- 2013 Ban, N.C., Bax, N.J., Gjerde, K.M., **Devillers, R.**, Dunn, D.C., Dunstan, P.K., Hobday, A.J., Maxwell, S.M., Kaplan, D.M., Pressey, R.L., Ardron, J.A., Game, E.T. and Halpin, P.N. Mapping gaps and solutions in managing the high seas for biodiversity conservation and sustainable use. *Proceedings of the 11th International Symposium for GIS and Computer Cartography for Coastal Zone Management (CoastGIS)*, Victoria, Canada, June 18-21st.
- 2013 Vandecasteele, A. and **Devillers, R.** Improving volunteered geographic data quality using semantic similarity measurements. *Proceedings of the 8th International Symposium on Spatial Data Quality (ISSDQ)*, Hong Kong, May 30-June 1.
- 2013 Bégin, D., **Devillers, R.** and Roche, S. Assessing volunteered geographic information (VGI) quality based on contributors' mapping behaviours. *Proceedings of the 8th International Symposium on Spatial Data Quality (ISSDQ)*, Hong Kong, May 30-June 1.
- 2013 Gira, J., Bédard, Y., Roche, S. and **Devillers, R.** Towards a Collaborative Knowledge Discovery System for Enriching Semantic Information about Risks of Geospatial Data misuse. *Proceedings of the 8th International Symposium on Spatial Data Quality (ISSDQ)*, Hong Kong, May 30-June 1.
- 2013 Martinez Ramos, R., Vandecasteele, A. and **Devillers, R.** Semantic integration of authoritative and volunteered geographic information (VGI) using ontologies. *Proceedings of the 16th AGILE conference on Geographic Information Science*, Leuven. Belgium, May 14-17th.
- 2013 Lecours, V., **Devillers, R.**, Edinger, E., Brown, C. and Lucieer, V. Exploring the role spatial scale plays in marine habitat mapping using multiscale geomorphometric analyses. *GeoHab symposium*, Rome, Italy, May 6-10th.
- 2012 Lee, C., **Devillers, R.** and Hoeber, O. Interactive temporal zoom and pan within a multi-touch geo-visual analytics environment. *GIScience'12 workshop "Geovisual analytics – Time to focus on time"*, Columbus, OH, USA, September 18th.
- 2012 **Devillers, R.**, Edinger, E., Lecours, V. and Jones, K. The role of scale in understanding coldwater corals habitats. *12th International Coral Reef Symposium (ICRS'12)*. Cairns, Australia, July 9-13th.
- 2012 Wilson, G., Harding, S., Hoeber, O., **Devillers, R.** and Banzhaf, W. Parallel exhaustive search vs. Evolutionary computation in a large real world network search space. *Proceedings of the 2012 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, Brisbane, Australia, June 10-15th.
- 2012 Lecours, V., Edinger, E. and **Devillers, R.** Understanding modern cold-water corals habitats in Canada using multi-scale bathymetric data analysis. *GAC-MAC 2012*. St. John's, NL, Canada, May 28-29th.
- 2012 **Devillers, R.**, Gervais, M., Bédard, Y., Chandler, J., Coleman, D., Judge, E., Pouliot, J. and Scassa, T. Sharing data is good, but are we concerned enough about public protection and ethical data dissemination? *Proceedings of the GSDI 13 World Conference*. Quebec City, Canada, May 2012.
- 2012 **Devillers, R.**, Wilson, G. and Hoeber, O. Improving geographic information retrieval using fuzzy logic: the case of the Canadian GeoConnections Discovery Portal. *Proceedings of the GSDI 13 World Conference*. Quebec City, Canada, May 2012.
- 2012 Brown, C.J., Tzekakis, D., Lobsiger, U. and **Devillers, R.** Development of Temporal Monitoring Techniques for Benthic Habitat Impacts of Tidal Energy. *GeoHab 2012 Conference*. Orcas Island, USA, May 1-4, 2012.
- 2012 Enguehard, R., Fowler, B., Hoeber, O., **Devillers, R.** and Banzhaf, W. Integrating human knowledge within a hybrid clustering-classification scheme for detecting patterns within large movement data sets. *AGILE workshop on complex data mining in a geospatial context*. Avignon, France, April 24th.
- 2011 Wilson, G., **Devillers, R.** and Hoeber, O. Fuzzy logic ranking for personalized geographic information retrieval. *Proceedings of the Third International Conference on Intelligent Human*

- Computer Interaction (IHCI 2011)* (M. Koudelka et al., eds). Prague, Czech Republic, August 29-31th.
- 2011 Wilson, G., Harding, S., Hoerber, O., **Devillers, R.** and Banzhaf, W. Large Network Analysis for Fisheries Management using Coevolutionary Genetic Algorithms. *Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO) 2011*. Dublin, Ireland, July 12-16th.
- 2011 Chuenpagdee, R., Davis, R., Korneski, K. and **Devillers, R.** Reconceptualizing Ecosystem Complexity: A New Emphasis. *MARE 2011 Conference – People and the Sea VI: Bridging Science and Policy for Sustainable Coasts and Seas*. Amsterdam, The Netherlands, July 6-9th.
- 2011 Enguehard, R., Devillers, R. and Hoerber, O. An evaluation of fractal/velocity pattern extraction. *First Maritime Anomaly Detection (MAD) workshop*. Tilburg, The Netherlands, June 17th.
- 2011 Windle, M., Rose, G., **Devillers, R.** and Fortin, M.-J. Spatial-temporal variations in shifting ecosystems: A GWR analysis in the Northwest Atlantic. *ESSAS 2011 Open Science Meeting*. Seattle, USA, May 22-26th.
- 2011 Enguehard, R., Devillers, R. and Hoerber, O. Geovisualization of fishing vessels movement patterns using hybrid fractal/velocity signatures. *GeoViz 2011*, Hamburg, Germany, March 10th.
- 2011 Hoerber, O., Wilson, G., Harding, S., Enguehard, R. and **Devillers, R.** Exploring geo-temporal differences using GTDiff. *2011 PacificViz Conference*, Hong Kong, March 1-4th.
- 2010 Wilson, G., Harding, S., Hoerber, O., **Devillers, R.** and Banzhaf, W. Detecting anomalies in spatiotemporal data using genetic algorithms with fuzzy community membership. *International Conference on Intelligent Systems Design and Applications*, Cairo, Egypt, November 2010.
- 2010 Hoerber, O., Wilson, G., Harding, S., Enguehard, R. and **Devillers, R.** Visually representing geo-temporal differences. *IEEE Conference on Visual Analytics Science and Technology*, Salt Lake City, USA, October 2010.
- 2010 Greene, R., Devillers, R., Luther, J. and Eddy, B. A GIS-based Multiple Criteria Approach to Integrated Land Management Decision Analysis: Case study in the Humber region of Newfoundland, Canada. *Society for Conservation GIS Annual Conference*, Monterey (CA), USA, July 2010.
- 2010 Jones, K., Devillers, R. and Bédard, Y. Communicating Geospatial Data Quality of 3D Objects in Virtual Globes. *Canadian Geomatics Conference*, Calgary, Canada, June 2010.
- 2009 Cuff, A., Devillers, R. and Anderson, J. Improving acoustic seabed classification on the Scotian Shelf, Canada: A multi-frequency approach. *CoastGIS Conference*, Itajaí, Brazil, September 30th.
- 2009 Windle, M., Rose, G., **Devillers, R.** and Fortin, M.-J. Examining spatial varying relationships of coastal resources using geographically weighted regression (GWR). *CoastGIS Conference*, Itajaí, Brazil, September 30th.
- 2009 Cuff, A., Anderson, J. and **Devillers, R.** Improving seabed classification through the use of multiple frequencies. *GeoHab conference*, Trondheim, Norway, May 6th.
- 2009 Bédard, Y., Chandler, J., **Devillers, R.** and Gervais, M. Professional Ethics, System Design Methods and Geospatial Data Quality. Geographic Information Ethics and GISciences Workshop. *American Association of Geographers (AAG) annual meeting*, Las Vegas, USA, March 24th.
- 2009 **Devillers, R.** and Zargar, A. Towards quality-aware GIS: Operation-based retrieval of spatial data quality information. *Spatial Knowledge and Information (SKI) Conference*, Fernie (BC), Canada, February 21st.

- 2009 Cuff, A., Anderson, J. and **Devillers, R.** Improving seabed classification through the use of multiple acoustic frequencies. *Spatial Knowledge and Information (SKI) Conference*, Fernie (BC), Canada, February 20th.
- 2009 Jones, K., **Devillers, R.** and Edinger, E. Relationships between cold-water corals off Newfoundland and Labrador and their environment. *Spatial Knowledge and Information (SKI) Conference*, Fernie (BC), Canada, February 20th.
- 2009 Zargar, A. and **Devillers, R.** An Operation-Based Communication of Spatial Data Quality. *International Conference on Advanced Geographic Information Systems and Web Services (GEOWS 2009)*, Cancun, Mexico, February 5th, 2009, 10 p.
- 2008 Carette, V., Mostafavi, M.A. and **Devillers, R.** Towards Marine Geographic Information Systems: Multidimensional Representation of Fish Aggregations and their Spatiotemporal Evolutions. *Oceans 2008 Conference*, Quebec City, September 15-18th.
- 2008 Windle, M., Rose, G., **Devillers, R.** and Fortin, M.-J. Geospatial dynamics of Northwest Atlantic cod and crustacean fisheries in the 1990s and 2000s: environmental and trophic impacts. *4th International Symposium in GIS/Spatial Analyses in Fishery and Aquatic Sciences*. Rio de Janeiro, Brazil, August 25-29th.
- 2008 Ruppert, J.L.W., Fortin, M.-J., Rose, G.A. and **Devillers, R.** Role of environmental conditions in structuring temperate marine communities. *US-IALE 23rd Annual Landscape Ecology Symposium*, Madison, Wisconsin. May 2008.
- 2008 Fowler, J., **Devillers, R.**, Simms, A. and Bolduc, A. Identification and characterization of seabed pockmarks in the St. Lawrence Estuary. *GAC-MAC' 2008 Conference*, Quebec City, May 26th.
- 2008 Edinger, E., Copeland, A., Bell, T., **Devillers, R.**, LeBlanc, P. and Wroblewski, J. Marine Habitat Mapping in the Gilbert Bay Marine Protected Area, Labrador, Canada. *GeoHab 2008 Conference*, April 29th-May 2nd.
- 2007 **Devillers, R.**, Mostafavi, M.A., Fortin, M.-J. and Rose, G. GeoCod: Towards a better understanding of spatial and temporal changes of four key species in the NW Atlantic region. *Ocean Biodiversity Symposium (OBI'07)*, Halifax, Canada, October 3rd.
- 2007 **Devillers, R.**, Mostafavi, M.A., Fortin, M.-J. and Rose, G. GeoCod: Vers une meilleure compréhension des changements spatiaux et temporels de plusieurs stocks de poisson dans l'Atlantique du Nord-Ouest. *GéoCongrès symposium*, Quebec City, Canada, October 4th.
- 2007 Carette, V., Mostafavi, M.A., **Devillers, R.** and Rose, G. Représentation des agrégations de poissons et de leur évolution spatio-temporelle en fonction des paramètres environnementaux. *GéoCongrès symposium*, Quebec City, Canada, October 3-5th.
- 2007 Bédard, Y., Lévesque, M.-A., Gervais, M. and **Devillers, R.** Vers une meilleure identification et gestion des risques de mauvais usages des données géodécisionnelles. *GéoCongrès symposium*, Quebec City, Canada, October 4th.
- 2007 Carette, V., Mostafavi, M.A., **Devillers, R.**, Rose, G., Ledoux, H. and Gold, C. Modelling and visualisation of fish aggregations using 3D Delaunay triangulation and alpha shapes. *8th International Symposium on GIS and Computer Mapping for Coastal Zone Management (CoastGIS 2007)*, Santander, Spain, October 8-10th.
- 2007 Windle, M., Rose, G., **Devillers, R.**, Mostafavi, M.A., Fortin, M.-J., Carette, V., Ruppert, J., Jones, K., McVeigh, R., Enguehard, R. and LeBlanc, P. A GIS-based fisheries database for the North-West Atlantic: The GeoCod project. *8th International Symposium on GIS and Computer Mapping for Coastal Zone Management (CoastGIS 2007)*, Santander, Spain, October 8-10th.
- 2007 Levesque, M.-A., Bédard, Y., Gervais, M. and **Devillers, R.** Towards managing the risks of data misuse for spatial datacubes. *International Symposium on Spatial Data Quality (ISSDQ 2007)*. Enchede, The Netherlands, June 14-15th.

- 2007 **Devillers, R.** GeoCod: Geomatics for the Sustainable Management of Fish Stocks. *Geomatics Atlantic 2007 Conference*. St. John's (NL), Canada, June 4-5th.
- 2007 **Devillers, R.**, Bédard, Y., Gervais, M., Jeansoulin, R., Pinet, F., Schneider, M., Bejaoui, L., Levesque, M.-A., Salehi, M. and Zargar, A. 2007. How to improve geospatial data usability: From metadata to Quality-Aware GIS Community. *Spatial Data Usability workshop. AGILE 2007 Conference*, Aalborg, Denmark.
- 2006 Gervais, M., Bédard, Y., **Devillers, R.**, Larrivée, S., Chrisman, N. and Lévesque, J. 'Auditing Spatial Data Suitability for Specific Applications: Professional and Technical Issues'. *EuroSDR, EuroGeographics and Agile Workshop on Quality Assurance in Geographic Data Production*, U. de Marne-la-Vallée, France, February 14th 2006.
- 2004 Lagrue, S., **Devillers, R.** and Besqueut, J.-Y. Partially ordered preferences applied to site location problem in urban planning. *Proceedings of the 15th International Conference on Database and Expert Systems Applications (DEXA)*, Lecture Notes in Computer Science (LCNS) 3180 (Galindo, Takizawa and Traunmüller, eds), Zaragoza, Spain, August 30th- September 3rd, p.151-160.
- 2004 **Devillers, R.**, Bédard, Y. and Jeansoulin, R. Multidimensional User Manual (MUM): A tool to manage and communicate data quality information. *Proceedings of the Joint meeting of the 6th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences and the 15th Conference of the Environmetrics Society*, Portland (Maine), USA, June 28th - July 1st.
- 2004 Bédard, Y., **Devillers, R.**, Gervais, M. and Jeansoulin, R. Towards Multidimensional User Manuals for Geospatial Datasets: Legal issues and their Considerations into the design of a Technological Perspective. *Proceedings of the 3rd International Symposium on Spatial Data Quality (ISSDQ'04)*, Bruck an der Leitha, Austria, April 15-17th, vol. 28b GeoInfo Series, p.183-195.
- 2003 Vasseur, B., **Devillers, R.** and Jeansoulin, R. Ontological approach of the fitness of geospatial datasets. *Proceedings of the 6th AGILE Conference - Association of Geographic Information Laboratories for Europe*, April 24-26th, Lyon, France, p.497-504.
- 2002 **Devillers R.**, Gervais M., Bédard Y. and Jeansoulin R. Spatial Data Quality: From Metadata to Quality Indicators and Contextual End-user Manual. *OEEPE-ISPRS Joint Workshop on Spatial Data Quality*, Istanbul, Turkey, March 20-21st 2002, 10 pages.
- 2001 Gervais, M., **Devillers, R.**, Bédard, Y. and Jeansoulin, R. GI Quality and Decision-making. *GeoInformation Fusion and Revision Workshop*, Québec, Canada - April 9-12th.
- 2001 Bernier, E., Bédard, Y. and **Devillers, R.** Automatic generalization and multiple representation for Spatial OLAP. *GeoInformation Fusion and Revision Workshop*, Québec, Canada, April 9-12th.
- 2001 Caron, C., Boulay, C., **Devillers, R.** and Roche, S. Fusion municipale et intégration de ressources géomatiques. *AGMQ Conference*, Ste-Hyacinthe, Canada, April 3rd.
- 1999 St-Onge, G., Leduc, J., Bilodeau, G., de Vernal, A., **Devillers, R.**, Hillaire-Marcel, C., Loucheur, V. and Marmen, S. Traceurs géochimiques, isotopiques et micropaléontologiques des événements sédimentologiques brefs et des conditions environnementales dans le fjord du Saguenay. Physical and Quaternary Geography session of the *ACFAS Conference*, Session: C-212 Contribution of quaternarists to the study of climatic and environmental changes – Ottawa, Canada.
- 1999 **Devillers, R.** and de Vernal, A. Distribution des kystes de dinoflagellés dans les sédiments de surface de l'Atlantique Nord et de ses bassins adjacents en relation avec les nutriments et la productivité primaire. Physical and Quaternary Geography session of the *ACFAS Conference*, Session: C-212 Contribution of quaternarists to the study of climatic and environmental changes – Ottawa, Canada.
- 1999 St-Onge, G., Bilodeau, G., de Vernal, A., **Devillers, R.**, Hillaire-Marcel, C., Leduc, J., Loucheur,

- V. and Marmen, S. Geochemical and Micropaleontological tracers of fast sedimentological events and of recent environmental conditions in the Saguenay Fjord, Canada. *33rd symposium of CMOS Environmental Forecasting*, Montreal, Canada.
- 1998 **Devillers, R.** and de Vernal, A. Dinocyst assemblages in surface sediment and nutrient (NO₃, PO₄ and SiO₂) distribution in upper water masses from the northern North Atlantic. NTNU Vitensk.mus. Rapp. bot. Ser. 1998-1: 32. *6th International Conference on living and fossils dinoflagellates (DINO6)*, Trondheim - Norway.
- 1998 **Devillers, R.**, Loucheur, V., Marmen, S., Bertini, A., Bianchi, A., de Vernal, A., Hillaire-Marcel, C., Bilodeau, G., Leduc, J. and Saint-Onge, G. Traceurs micropaléontologiques et géochimiques des changements environnementaux récents dans le Fjord du Saguenay. *Geological Association of Canada (GAC-MAC) Conference* – Québec, Canada.
- 1998 Saint-Onge, G, Bilodeau, G., de Vernal, A., **Devillers, R.**, Hillaire-Marcel, C., Leduc, J., Loucheur, V. and Marmen, S. Traceurs micropaléontologiques et géochimiques des changements environnementaux récents dans le Fjord du Saguenay. *Québec Marine Sciences Symposium*, Québec, Canada.
- 1998 **Devillers, R.** and de Vernal, A. Distribution des kystes de dinoflagellés de sédiments de surface dans l'Atlantique Nord et ses bassins adjacents en relation avec les nutriments (NO₃, PO₄ et SiO₂) et la productivité primaire. *Québec Marine Sciences symposium*, Québec, Canada (*2nd best communicator award*).

7 BIBLIOGRAPHIE

- Aigner, W., et al., 2008. Visual methods for analyzing time-oriented data. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 14 (1), 47–60.
- Amblas D, Ceramicola S, Gerber TP, Canals M, Chiocci FL, Dowdeswell JA et al. Submarine canyons and gullies. In: Micallef A, Krastel S, Savini A, editors. *Submarine Geomorphology*. New York: Springer International Publishing; 2018. pp 251-272.
- Andrienko, N. and Andrienko, G., 2006. *Exploratory analysis of spatial and temporal data*. Berlin: Springer.
- Andrienko, G., et al., 2007. Geovisual analytics for spatial decision support: setting the research agenda. *International Journal of Geographical Information Science*, 21 (8), 839–857.
- Bailey M., Charles A., Cheung W., Devillers R., Duck T., Favaro B., Hoover C., Mason T., Milley C., Otto S., Pauly D., Sumaila R., et Tyedmers P. 2016. Canada at a *crossroad*: The imperative for realigning ocean policy with ocean science. *Marine Policy*, 63: 53-60.
- Ban N.C., Bax N.J., Gjerde K.M., Devillers R., Dunn D.C., Dunstan P.K., Hobday A.J., Maxwell S.M., Kaplan D.M., Pressey R.L., Ardron J.A., Game E.T. et Halpin P.A. 2014. Systematic Conservation Planning: a better recipe for managing the high seas for biodiversity conservation and sustainable use. *Conservation Letters*, 7(1): 41-54.
- Bégin D., Devillers R. et Roche S. 2017a. Contributors' enrollment in collaborative online communities: the case of OpenStreetMap. *Geo-spatial Information Science*, 20(3): 282-295.
- Bégin D., Devillers R. et Roche S. 2017b. Contributors' Withdrawal from Online Collaborative Communities: The Case of OpenStreetMap. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(11): 340.
- Bégin D., Devillers R. et Roche S. 2018. The life cycle of contributors in collaborative online communities-the case of OpenStreetMap. *International Journal of Geographical Information Science*, 32(8): 1611-1630.
- Bertino, E., Camossi, E., and Bertolotto, M., 2010. Multi-granular spatio-temporal object models: concepts and research directions. In: M.C. Norrie and M. Grossniklaus, eds. *Object databases*. Berlin: Springer, 132–148.
- Bishop, M.P., James, L.A., Shroder Jr., J.F., Walsh, S.J., 2012. Geospatial technologies and digital geomorphological mapping: concepts, issues and research. *Geomorphology* 137, 5e26.
- Bishop, M.P., Shroder Jr., J.F., 2004. GIScience and mountain geomorphology: overview, feedbacks, and research directions. In: Bishop, M.P., Schroder Jr., J.F. (Eds.), *Geographic Information Science and Mountain Geomorphology*. Springer-Praxis, Chichester, pp. 1e31.
- Bispo, P.C., Santos, J.R., Valeriano, M.M., Graça, P.M.L., Balzter, H., França, H., Bispo, P.C., 2016. Predictive models of primary tropical forest structure from geomorphometric variables based on SRTM in the Tapajos Region, Brazilian Amazon. *PLoS One* 11, e0152009.
- Bouchet, P.J., Meeuwig, J.J., Kent, C.P.S., Letessier, T.B., Jenner, C.K., 2015. Topographic determinants of mobile vertebrate predator hotspots: current knowledge and future directions. *Biol. Rev.* 90, 699e728.
- Boyce MS, Vernier PR, Nielsen SE, Schmiegelow FKA., 2002. Evaluating resource selection functions. *Ecol Model.* 157:281–300.
- Brandl, P., et al., 2009. Occlusion-aware menu design for digital tabletops. In: D.R. Olsen Jr., et al., eds. *ACM SIGCHI conference on human factors in computing systems*. Boston, MA: ACM Press, 3223–3228.
- Brown, C. J. et al. "Multispectral Multibeam Echo Sounder Backscatter as a Tool for Improved Seafloor Characterization." *Geosciences* 9.3 (2019): 126.

- Brown CJ, Sameoto JA, Smith SJ., 2012. Multiple methods, maps, and management applications: purpose made seafloor maps in support of ocean management. *J Sea Res.*, 72:1–13.
- Brown, C.J., Smith, S.J., Lawton, P., Anderson, J.T., 2011. Benthic habitat mapping: a review of progress towards improved understanding of the spatial ecology of the seafloor using acoustic techniques. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 92, 502e520.
- Buhl-Mortensen L, Buhl-Mortensen P, Dolan MJF, Gonsalez-Mirelis G. Habitat mapping as a tool for conservation and sustainable use of marine resources: Some perspectives from the MAREANO Programme, Norway. *J Sea Res.* 2015;100: 46-61.
- Carette V., Mostafavi M.A., Devillers R., Rose G. et Hashemi L. 2008. Extending Marine GIS capabilities: 3D Dynamic and interactive representation of fish aggregations using 3D Delaunay Triangulation and Alpha Shapes. *Geomatica*, 62(4): 361-374.
- Carpendale, S., 2008. Evaluating information visualizations. In: A. Kerren, et al., eds. *Information visualization: human centered issues and perspectives*. Berlin: Springer, 19–45.
- Carter GS, Gregg MC. Intense, variable mixing near the head of Monterey Canyon. *J Phys Oceanogr.* 2002;32: 3145–3165.
- Casalbore D, Romagnoli C, Bosman A, Chiocci FL. Potential tsunamigenic landslides at Stomboli Volcano (Italy): Insight from marine DEM analysis. *Geomorphology.* 2011;126(1-2): 42-50.
- Chiocci FL, Cattaneo A, Urgeles R. Seafloor mapping for geohazard assessment: state of the art. *Mar Geophys Res.* 2011;32:1-11.
- Claudet J., Bopp L., Cheung W.W., Devillers R., Escobar-Briones E., Haugan P., ... et Mullineaux L. 2019. A Roadmap for Using the UN Decade of Ocean Science for Sustainable Development in Support of Science, Policy, and Action. *One Earth*.
- Cominelli S., Devillers R., Yurk H., MacGillivray A., McWhinnie L. et Canessa R. 2018. Noise exposure from commercial shipping for the southern resident killer whale population. *Marine Pollution Bulletin*, 136: 177-200.
- Cominelli S., Lehy M., Devillers R. et Hall B. 2019. Geovisualization tools to inform the management of vessel noise in support of species' conservation. *Ocean and Coastal Management*, 169: 113-128.
- Congalton RG., 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sens Environ.* 37:35–46.
- Copeland A., Edinger E., Devillers R., Bell T., LeBlanc P. et Wroblewski J. 2013. Marine habitat mapping in support of marine protected area management in a sub-arctic fjord: Gilbert Bay, Labrador, Canada. *Journal of Coastal Conservation*, 17(2): 225-237.
- Cuff, A., J. T. Anderson, and R. Devillers. "Comparing surficial sediments maps interpreted by experts with dual-frequency acoustic backscatter on the Scotian shelf, Canada." *Continental Shelf Res.* 110 (2015): 149-161.
- Danielson JJ, Poppenga SK, Brock JC, Evans GA, Tyler DJ, Gesch DB, et al. Topobathymetric elevation model development using a new methodology: Coastal National Elevation Database. *J Coast Res.* 2016;76: 75-89.
- Davis, F.D., 1989. Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. *Management Information Systems*, 13 (3), 319–340.
- Deering R, Bell T, Forbes DL, Campbell C, Edinger E. Morphological characterization of submarine slope failures in a semi-enclosed fjord, Frobisher Bay, eastern Canadian Arctic. In: Lintern, DG, Mosher DC, Moscardelli LG, Bobrowsky PT, Campbell C, Chaytor J D et al., editors. *Subaqueous Mass Movements*. Geol Soc London Spec Publ. 2018; 477. doi: 10.1144/SP477.35.
- De Leo G.C., Smith, C.R., Rowden, A.A., Bowden, D.A., Clark, M.R. Submarine canyons: hotspots of benthic biomass and productivity in the deep sea. *Proc Roy Soc Lond Biol Sci.* 2010. doi: 10.1098/rspb.2010.0462.f.

- de Oliveira Leis M., Devillers R., Medeiros R. P. et Chuenpagdee R. 2019. Mapping fishers' perceptions of marine conservation in Brazil: An exploratory approach. *Ocean & Coastal Management*, 167: 32-41.
- Devillers R. et de Vernal A. 2000. Dinocyst distribution in surface sediments of the northern North Atlantic in relation with nutrients and productivity in surface waters. *Marine Geology*, 166(1-4): 103-124.
- Devillers R., Bédard Y. et Gervais M. 2004. Indicateurs de qualité pour réduire les risques de mauvaise utilisation des données géospatiales. *Revue Internationale de Géomatique*, 14(1): 35-57.
- Devillers R. et Jeansoulin R. (Eds). 2005. *Qualité de l'information géographique*. In: IGAT Series (Information géographique et aménagement du territoire), Hermès, France, 349p.
- Devillers R. et Jeansoulin R. (Eds). 2006. *Fundamentals of Spatial Data Quality*. ISTE, London, UK, 312p.
- Devillers R., Bédard Y. et Jeansoulin R. 2006. Multidimensional management of geospatial data quality information for its dynamic use within Geographical Information Systems. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing (PE&RS)*, 71(2): 205-215.
- Devillers R., Bédard Y., Jeansoulin R. et Moulin B. 2007. Towards Spatial Data Quality Information Analysis Tools for Experts Assessing the Fitness for Use of Spatial Data. *International Journal of Geographical Information Science*, 21(3): 261-282.
- Devillers R., Stein A., Bédard Y., Chrisman N., Fisher P. et Shi W. 2010. 30 years of research on Spatial Data Quality – Achievements, failures and opportunities. *Transactions in GIS*, 14(4): 387-400.
- Devillers R., Lemieux C. J., Gray P. A. et Claudet J. 2019. Canada's uncharted conservation approach. *Science*, 364(6447): 1243-1243.
- Devillers R., Desjardin E. et de Runz C. 2019. Concepts et terminologies de l'imperfection de l'information géographique. In: *Imperfections des données géographiques: de la théorie aux applications* (Pinet F., Batton-Hubert M. and Desjardin E., eds). ISTE Publishing.
- Diesing M, Mitchell P, Stephens D., 2016. Image-based seabed classification: what can we learn from terrestrial remote sensing? *ICES J Mar Sci*.
- Di Stefano M, Mayer LA. An automatic procedure for the quantitative characterization of submarine bedforms. *Geosciences*. 2018;8(1): 28.
- Dimri, V.P., 2005. Fractals in geophysics and seismology e an introduction. In: Dimri, V.P. (Ed.), *Fractal Behaviour of the Earth System*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 1e22.
- Dolan, M.F.J., Lucieer, V.L., 2014. Variation and uncertainty in bathymetric slope calculations using geographic information systems. *Mar. Geod.* 37, 187e219.
- Dormann, C.F., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, C., Carl, G., Carré, G., García Marquez, J.R., Gruber, B., Lafourcade, B., Leitao, P.J., Münkemüller, T., McClean, C., Osborne, P.E., Reineking, B., Schroder, B., Skidmore, A.K., Zurell, D., Lautenbach, S., 2013. Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography* 36, 27e46.
- Edinger E., Baker K., Devillers R. et Wareham V. 2007. *Deep-sea coral distribution and bycatch from commercial fisheries off Newfoundland and Labrador*. World Wildlife Fund Canada (WWF), 41p.
- Elith, J., Leathwick, J.R., 2009. Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 40, 677e697.
- Enguehard R., Hoeber O. et Devillers R. 2012. Interactive exploration of movement data: A case study of geovisual analytics for fishing vessel analysis. *Information Visualization*, 12(1): 65-84.
- Enguehard R., Devillers R. et Hoeber O. 2013. Comparing interactive and automated mapping systems for supporting fisheries enforcement activities – A case study on Vessels Monitoring Systems (VMS). *Journal of Coastal Conservation*, 17(1): 105-119.

- Florinsky, I.V., Eilers, R.G., Manning, G.R., Fuller, L.G., 2002. Prediction of soil properties by digital terrain modelling. *Environ. Model. Softw.* 17, 295e311.
- Florinsky, I.V., Kuryakova, G.A., 1996. Influence of topography on some vegetation cover properties. *Catena* 27, 123e141.
- General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO), GEBCO 14 Grid, version 20150318. Liverpool: Br. Oceanogr. Data Cent.; 2015 [downloaded 2017 Jan 9]. Available from <http://www.gebco.net>.
- Global Affairs Canada. Backgrounder – Canada’s continental shelf submission. 2013. Available from http://www.international.gc.ca/media/aff/news-communiqués/2013/12/09a_bg1.aspx?lang=eng 2013
- Graham, M.H., 2003. Confronting multicollinearity in ecological multiple regression. *Ecology* 84, 2809e2815.
- Hägerstrand, T., 1970. What about people in regional science? *Papers of the Regional Science Association*, 24, 7–21.
- Halley, J.M., Hartley, S., Kallimanis, A.S., Kunin, W.E., Lennon, J.J., Sgardelis, S.P., 2004. Uses and abuses of fractal methodology in ecology. *Ecol. Lett.* 7, 254e271.
- Hameed S.O., Cornick L.A., Devillers R. et Morgan L.E. 2017. Incentivizing More Effective Marine Protected Areas with the Global Ocean Refuge System (GLORES). *Frontiers in Marine Science*, 4: 208.
- Han, W., Di, L., Zhao, P., Shao, Y., 2012. DEM Explorer: an online interoperable DEM data sharing and analysis system. *Environ. Model. Softw.* 38, 101e107.
- Harris PT, Baker EK. Why map benthic habitats? In: Harris PT, Baker EK, editors. *Seafloor Geomorphology as Benthic Habitat*. London: Elsevier; 2012. pp 3-22.
- Harris, PT, Macmillan-Lawler, M, Rupp, J, Baker, EK. *Geomorphology of the oceans*. *Mar. Geol.* 2014;352: 4-24.
- Harris, P.T., Baker, E.K., 2012. *Seafloor Geomorphology as Benthic Habitat: GeoHab Atlas of Seafloor Geomorphic Features and Benthic Habitats*. Elsevier, Amsterdam.
- Harris, P. T. and E. K. Baker, eds. *Seafloor Geomorphology as Benthic Habitat: GeoHab Atlas of seafloor geomorphic features and benthic habitats*. Elsevier, 2011.
- Harrower, M. and Sheesley, B., 2005. Designing better map interfaces: a framework for panning and zooming. *Transactions in GIS*, 9 (2), 77–89.
- Heipke C. Crowdsourcing geospatial data. *ISPRS J Photogramm Remote Sens.* 2010;65(6): 550-557.
- Hengl, T., Reuter, H.I., 2009. *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. *Developments in Soil Science*, 33. Elsevier, Amsterdam.
- Hijmans, R.J., 2012. Cross-validation of species distribution models: removing spatial bias and calibration with a null model. *Ecology* 36, 27e46.
- Hofierka, J., Mita'~sov'a, H., Neteler, M., 2009. Geomorphometry in GRASS GIS. In: Hengl, T., Reuter, H.I. (Eds.), *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Elsevier Science, Amsterdam, pp. 387e410.
- Hornsby, K. and Egenhofer, M.J., 2002. Modeling objects over multiple granularities. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, 36, 177–194.
- Hough G, Green J, Fish P, Mills A, Moore R. A geomorphological mapping approach for the assessment of seabed geohazards and risk. *Mar Geophys Res.* 2011;32(1): 151-162.
- Iphar C., Costé B., Napoli A., Ray C. et Devillers R. 2019. Intégrité et confiance de la donnée géographique. In: *Imperfections des données géographiques: de la théorie aux applications* (Pinet F., Batton-Hubert M. and Desjardin E., eds). ISTE Publishing.
- Jasiewicz J, Stepinski T. Geomorphons – A pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. *Geomorphology.* 2013;182: 147-156.

- Jensen JR., 2005. Introductory digital image processing, a remote sensing perspective. 3rd ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall.
- Jones K., Devillers R., Bédard Y. et Schroth O. 2014. Visualizing perceived spatial data quality of 3D objects within virtual globes. *International Journal of Digital Earth*, 7(10): 771-788.
- Jones, K.H., 1998a. A comparison of algorithms used to compute hill slope as a property of the DEM. *Comput. Geosciences* 24, 315e323.
- Jones, K.H., 1998b. A comparison of two approaches to ranking algorithms used to compute hill slopes. *Geoinformatica* 2, 235e256.
- Keitt, T.H., 2000. Spectral representation of neutral landscapes. *Landsc. Ecol.* 15, 479e493.
- King, J.R., Jackson, D.A., 1999. Variable selection in large environmental data sets using principal components analysis. *Environmetrics* 10, 67e77.
- Klingseisen, B., Metternicht, G., Paulus, G., 2008. Geomorphometric landscape analysis using a semi-automated GIS-approach. *Environ. Model. Softw.* 23, 109e121.
- Kraak, M.-J., 2003. The space-time cube revisited from a geovisualization perspective. In: *International cartographic conference*, 10–16 August, Durban, 10–16. Available from: http://icaci.org/files/documents/ICC_proceedings/ICC2003/Papers/255.pdf.
- Krivorouchko K. Empirical Bayesian Kriging implemented in ArcGIS Geostatistical Analyst. In: ArcUser Fall 2012 – Software and Data. 2012. Available from: <http://www.esri.com/news/arcuser/1012/files/ebk.pdf>
- Kwan, M.-P. and Lee, J., 2003. Geovisualization of human activity patterns using 3D GIS: A time-geographic approach. In: M.F. Goodchild and D.G. Janelle, eds. *Spatially integrated social science: examples in best practice*. Oxford: Oxford University Press, 48–66.
- Lacroix, M.P., Martz, L.W., Kite, G.W., Grabrecht, J., 2002. Using digital terrain analysis modeling techniques for the parametrization of a hydrologic model. *Environ. Model. Softw.* 17, 127e136.
- Lecours, V., 2015. Terrain Attribute Selection for Spatial Ecology (TASSE), V. 1.0. www.marinegis.com.
- Lecours V, Devillers R, Schneider DC, Lucieer VL, Brown CJ, Edinger EN. 2015 Spatial scale and geographic context in benthic habitat mapping: review and future directions. *Mar Ecol Prog Ser.* 535:259–284.
- Lecours, V., Dolan, M.F.J., Micallef, A., Lucieer, V.L., 2016. A review of marine geomorphometry, the quantitative study of the seafloor. *Hydrology Earth Syst. Sci.* 20, 3207e3244.
- Lecours V., Devillers R., Simms A.E., Lucieer V.L. et Brown C.J. 2017a. Towards a Framework for Terrain Attribute Selection in Environmental Studies. *Environmental Modelling & Software*, 89: 19-30.
- Lecours V., Brown C.J., Devillers R., Lucieer V.L. et Edinger E.N. 2017b. Comparing selections of environmental variables for ecological studies: a focus on terrain attributes. *PLoS one*, 11(12): e0167128
- Lecours V., Devillers R., Lucieer V.L. et Brown C.J. 2017c. Artefacts in marine digital terrain models: a multiscale analysis of their impact on the derivation of terrain attributes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(9): 5391-5406.
- Lecours V., Devillers R., Edinger E.N., Brown C.J. et Lucieer V.L. 2017d. Influence of artefacts in marine digital terrain models on habitat maps and species distribution models: a multiscale assessment. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 3(4): 232-246.
- Lee C., Devillers R. et Hoerber O. 2014. Navigating spatio-temporal data with temporal zoom and pan in a multi-touch environment. *International Journal of Geographic Information Science*, 28(5): 1128-1148.

- Lemieux C.J., Gray P.A., Devillers R., Wright P.A., Dearden P., Halpenny E.A., Groulx M., Beechey T.J. et Beazley K. 2019. How the race to achieve Aichi Target 11 could jeopardize the effective conservation of biodiversity in Canada and beyond. *Marine Policy*, 99: 312-323.
- Liverman D, Batterson M, Taylor D, Ryan J. Geological hazards and disasters in Newfoundland and Labrador. *Can Geotech J.* 2000;38(5): 936-956.
- Lloyd, C.D., 2014. *Exploring Spatial Scale in Geography*. Wiley, United States.
- MacMillan RA, Shary PA. Chapter 9 Landforms and landform elements in Geomorphometry. *Dev Soil Sci.* 2009;33: 227-25.
- Mandelbrot BB. 1967. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. *Science*, 156(3775): 636-638.
- Marshak AR, Brown SK. Habitat science is an essential element of ecosystem-based fisheries management. *Fish.* 2017;42(6): 300-300.
- Masson, DG, Huvenne, VAI, de Stigter, HC, Wolff, GA, Kiriakoulakis, K, Arzola, RG, et al. Efficient burial of carbon in a submarine canyon. *Geol.* 2010. 38:831-834.
- Mayer L, Jakobsson M, Allen G, Dorschel B, Falconer R, Ferrini V, et al. The Nippon Foundation – GEBCO Seabed 2030 Project: The quest to see the world’s oceans completely mapped by 2030. *Geosciences.* 2018;8(2): 63.
- McGregor B, Stubblefield WL, Ryan WBF, Twichell DC. Wilmington submarine canyon: A marine fluvial-like system. *Geol.* 1982;10:27-30.
- Misiuk D, Lecours V, Bell T. A multiscale approach to mapping seabed sediments. *PLoS ONE.* 2018;13(2): e0193647.
- Montella R, Di Luccio D, Marcellino L, Galletti A, Kosta S, Brizius A et al. Processing of crowd-sourced data from an internet of floating things. In: *Proceedings of the 12th Workshop on Workflows in Support of Large Scale Science; 2017 November 12-17; Denver, CO.* New York: Association for Computing Machinery; 2017. Available from: dl.acm.org
- Neumann, A., 2010. *Spatial, temporal and thematic navigation: visualizing biographies of European artists using a task oriented user interface design approach*. Thesis (PhD). Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zurich.
- Novaczek E., Howse V., Pretty C., Devillers R., Edinger E. et Copeland A. 2017. Limited Contribution of Small Marine Protected Areas to Regional Biodiversity: The Example of a Small Canadian No-Take MPA. *Frontiers in Marine Science*, 4: 174.
- Odum EP, Kroodasma RL. *Fundamentals of Ecology*. Philadelphia: Saunders; 1976.
- Olaya, V., 2009. Basic land-surface parameters. In: Hengl, T., Reuter, H.I. (Eds.), *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Elsevier Science, Amsterdam, pp. 141e169.
- Peitgen, H.O., Saupe, D., 1988. *The Science of Fractal Images*. Springer-Verlag, New York.
- Peuquet, D.J., 1994. It’s about time: a conceptual framework for the representation of temporal dynamics in geographic information systems. *Annals of the Association of American Geographers*, 84 (3), 441–461.
- Peuquet, D.J., 2002. *Representations of space and time*. New York: The Guilford Press.
- Peuquet, D.J. and Duan, N., 1995. An event-based spatiotemporal data model (ESTDM) for temporal analysis of geographical data. *International Journal of Geographical Information Systems*, 9 (1), 7–24.
- Pfeifer, P., 1984. Fractal dimension as working tool for surface-roughness problems. *Appl. Surf. Sci.* 18, 146e164.

- Pickrill RA, Kostylev VE. Habitat mapping and national seafloor mapping strategies in Canada. In: Todd BJ, Greene HG, editors. Mapping the seafloor for habitat characterization. Geological Association of Canada Special Paper. 2007;47: 483-495.
- Pike, R.J., 1995. Geomorphometry: progress, practice, and prospect. *Z. für Geomorphol.* 101, 221e238.
- Pittman, S.J., Costa, B.M., Battista, T.A., 2009. Using lidar bathymetric and boosted regression trees to predict the diversity and abundance of fish and corals. *J. Coast. Res.* 53, 27e38.
- Raaflaub, L.D., Collins, M.J., 2006. The effect of error in gridded digital elevation models on the estimation of topographic parameters. *Environ. Model. Softw.* 21, 710e732.
- Raymond E. The cathedral and the bazaar. *Knowledge, Technology & Policy.* 1999;12(3):23-49.
- Rengstorf AM, Grehan A, Yesson C, Brown C. Towards high-resolution habitat suitability modeling of vulnerable marine ecosystems in the deep-sea: Resolving terrain attribute dependencies. *Mar Geod.* 2012;35: 343-361.
- Rigol-Sanchez, J.P., Stuart, N., Pulido-Bosch, A., 2015. ArcGeomorphometry: a toolbox for geomorphometric characterisation of DEMs in the ArcGIS environment. *Comput. Geosciences* 85, 155e163.
- Rooper, C.N., Zimmermann, M., 2007. A bottom-up methodology for integrating underwater video and acoustic mapping for seafloor substrate classification. *Cont. Shelf Res.* 27, 947e957.
- Rovere M, Gamberi F, Mercorella A, Leidi E. Geomorphometry of a submarine mass-transport complex and relationships with active faults in a rapidly uplifting margin (Gioia Basin, NE Sicily margin). *Mar Geol.* 2014;356: 31-43.
- Ruppert J., Fortin M.-J., Rose G.A. et Devillers R. 2009. Atlantic cod distribution: changing benthic and abiotic environments alter site fidelity. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 66(6): 909-918.
- Ruppert J., Fortin M.-J., Rose G.A. et Devillers R. 2010. Environmentally mediated effects on the importance of cod abundance patterns to fish community composition in the Gulf of St. Lawrence, 1991 – 2003. *Marine Ecology Progress Series*, 411: 189-201.
- Schlaginweit GEO. Real-time acoustic bottom classification for hydrography: A field evaluation of RoxAnn. In: OCEANS '93: Engineering in Harmony with Ocean Proceedings; 1993 Oct 1993 (pp 214-219); Victoria, British Columbia. IEEE; 1993. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/326188/>
- Schwanghart, W., Heckmann, T., 2012. Fuzzy delineation of drainage basins through probabilistic interpretation of diverging flow algorithms. *Environ. Model. Softw.* 33, 106e113.
- Sherman K, Hempel G. The UNEP Large Marine Ecosystem Report: A perspective on changing conditions in LMEs of the world's Regional Seas. UNEP Regional Seas Report and Studies. Nairobi, UNEP. 2008: 182.
- Sinton, D., 1978. The inherent structure of information as a constraint to analysis: mapped thematic data as a case study. *Harvard Papers on Geographic Information Systems*, 6, 1–17.
- Stow DAV, Hernández-Molina FJ, Llave E, del Rio VD, Branson A. Benform-velocity matrix: The estimation of bottom current velocity from bedform observations. *Geology.* 2009;37(4): 327-330.
- Theiler J. Estimating fractal dimension. 1990. *J Opt Soc Am A*, 7(6): 1055-1073.
- Vandecasteele, A. et Devillers, R. 2015. Improving Volunteered Geographic Information Quality Using a Tag Recommender System: The Case of OpenStreetMap. In: *OpenStreetMap in GIScience* (J. Jokar Arsanjani et al., eds.). Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, Springer, p.59-80.

- Vierod, A.D.T., Guinotte, J.M., Davies, A.J., 2014. Predicting the distribution of vulnerable marine ecosystems in the deep sea using presence-background models. *Deep-Sea Res. II* 99, 6e18.
- Walbridge S, Slocum N, Pobuda M, Wright DJ. Unified geomorphological analysis workflows with Benthic Terrain Modeler. *Geosci.* 2018;8(3): 94.
- Weatherall P, Marks KM, Jakobsson M, Schmitt T, Tani S, Arnt JE, et al. A new digital bathymetric model of the world's oceans. *Earth Space Sci.* 2015;2: 331-345.
- Wiersma, Y.F., Huettmann, F., Drew, C.A., 2011. Introduction. landscape modeling of species and their habitats: history, uncertainty, and complexity. In: Drew, C.A., Wiersma, Y.F., Huettmann, F. (Eds.), *Predictive Species and Habitat Modeling in Landscape Ecology*. Springer, New York, pp. 1e6.
- Windle M., Rose G., Devillers R. et Fortin M.-J. 2010. Exploring spatial non-stationarity of fisheries survey data using geographically weighted regression (GWR): an example from the Northwest Atlantic. *ICES Journal of Marine Science.* 67(1): 145-154.
- Windle M., Rose G., Devillers R. et Fortin M.-J. 2012. Spatio-temporal variations of invertebrate cod-temperature relationships on the Newfoundland shelf, 1995-2009. *Marine Ecology Progress Series*, 469: 263-278.
- Zajac RN., 2008. Challenges in marine, soft-sediment benthoscape ecology. *Landscape Ecol.* 23:7–18.
- Zargar, A. and Devillers, R. 2009. An Operation-Based Communication of Spatial Data Quality. International Conference on Advanced Geographic Information Systems and Web Services (GEOWS 2009), Cancun, Mexico, February 5th, 2009, 10 p.
- Zawada, D.G., Brock, J.C., 2009. A multiscale analysis of coral reef topographic complexity using lidar-derived bathymetry. *J. Coast. Res.* 53, 6e15.
- Zou L, Kent J, Lam NSM, Cai H, Qiang Y, Li K. Evaluating Land Subsidence Rates and Their Implications for Land Loss in the Lower Mississippi River Basin. *Water.* 2015. 8(1):1-15.
- Zhou, Q., Zhu, A.X., 2013. The recent advancement in digital terrain analysis and modeling. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* 27, 1269e1271.