

CLASSIFICATION DES ÉCOSYSTÈMES BIOGÉOCLIMATIQUES ARCTIQUES-SUBARCTIQUES CANADIENS (CANADIAN ARCTIC-SUBARCTIC BIOGEOCLIMATIC ECOSYSTEM CLASSIFICATION, CASBEC) :

Cadre, concepts clés, cartographie et utilisation

D.S. McLennan^{1*}, W.H. MacKenzie², D.V. Meidinger³, S. Ponomarenko⁴, J. Wagner¹, R.J. McKillop⁵, et H.T. Robitaille⁶

¹ *Savoir polaire Canada, Station canadienne de recherche dans l'Extrême-Arctique, Cambridge Bay, Nunavut, Canada*

² *BC Ministry of Forests, Lands and Natural Resource Operations, Skeena-Stikine District Office, Smithers, Colombie-Britannique, Canada*

³ *Meidinger Ecological Consultants Ltd, Victoria, Colombie-Britannique, Canada*

⁴ *Environnement et changement climatique Canada, Centre national de recherche faunique, Ottawa, Ontario, Canada*

⁵ *Palmer Environmental Consulting Group Inc, Toronto, Ontario, Canada*

⁶ *T2 Environnement, Canton de Valcourt, Québec, Canada*

*donald.mclennan@polar.gc.ca

Résumé

Le système de classification des écosystèmes biogéoclimatiques arctiques et subarctiques canadiens (CASBEC) est un cadre de coordination et d'uniformisation de l'identification, de l'interprétation, de la classification et de la cartographie des communautés écologiques terrestres des paysages arctiques et subarctiques du nord du Canada. Fondé sur une théorie écologique solide, le système CASBEC fournit des protocoles normalisés pour la nomenclature et la classification, qui aboutissent à une classification naturelle et hiérarchique basée sur des composantes écologiques observables. Le présent article décrit la nécessité d'un pareil système, la théorie et la structure de la méthode de classification, et les méthodologies de classification et de cartographie des écosystèmes terrestres arctiques et subarctiques. La communauté canadienne des chercheurs et des praticiens consultants en écosystèmes terrestres du Nord est invitée à travailler en collaboration pour mettre en œuvre le système CASBEC. L'intérêt, la contribution et le soutien

à l'uniformisation amélioreront considérablement la coordination, la portée et l'incidence des nombreuses utilisations du système dans les domaines de la recherche, de la surveillance et de la conservation dans le Nord.

Introduction

Le système de classification des écosystèmes biogéoclimatiques arctiques et subarctiques canadiens (CASBEC) est un cadre de coordination et d'uniformisation de la classification, de l'interprétation et de la cartographie des communautés écologiques terrestres des paysages arctiques et subarctiques du nord du Canada. Proposé comme une approche commune, le système CASBEC facilitera la coordination des travaux écologiques de la même manière que la nomenclature commune des végétaux facilite les études botaniques, c'est-à-dire qu'il fournira un

Référence suggérée :

McLennan, D.S., MacKenzie, W. H., Meidinger, D., Ponomarenko, S., Wagner, J., McKillop, R.J. et Robitaille, H. T., 2019. Classification des écosystèmes biogéoclimatiques arctiques-subarctiques canadiens (Canadian Arctic-Subarctic Biogeoclimatic Ecosystem Classification, CASBEC) : Cadre, concepts clés, cartographie et utilisation. Aqhaliat 2019, Savoir polaire Canada, p. 8-21. DOI: 10.35298/pkc.2019.02

langage commun pour décrire, classer et nommer des entités similaires afin qu'elles puissent être étudiées et les résultats généralisés à l'ensemble des espèces. Actuellement, la classification et la dénomination des communautés écologiques terrestres arctiques-subarctiques ne sont pas soutenues par une approche commune. L'adoption du système CASBEC serait une étape importante vers l'intégration des classifications locales et régionales afin de disposer d'un système de classification unique et interrelié dans tout le nord du Canada. Comme nous l'expliquons dans le présent article, l'absence actuelle d'accord rend difficile la coordination de la recherche et de la surveillance, l'extrapolation des résultats aux niveaux régional et national, la coordination des évaluations régionales des habitats et des effets cumulatifs, et la planification d'une surveillance coordonnée du niveau régional au niveau national.

Le système CASBEC

Le système CASBEC s'inspire de la structure, de l'approche et des méthodes de la British Columbia's Biogeoclimatic Ecosystem Classification (BCBEC)¹ (Krajina, 1960 ; Pojar et al., 1987 ; Haeussler, 2011 ; MacKenzie et Meidinger, 2017). La BCBEC est fondée sur un siècle de connaissance des sciences des écosystèmes et tire ses racines en Europe (Pogrebnyak, 1930, 1955 ; Braun-Blanquet, 1932 ; 1951, 1964 ; Vorobyov, 1953 ; Sukachev, 1960 ; Sukachev et Dylis, 1964) et en Amérique du Nord (Clements, 1916, 1936 ; Jenny, 1941 ; Major, 1951).

Le système CASBEC repose sur une classification de la végétation des écosystèmes nordiques qui établit un lien au niveau national avec la Classification nationale de la végétation au Canada (CNVC, consultée en 2019), et au niveau international avec l'Arctic Vegetation Archive (Walker et Reynolds, 2011 ; Walker et al., 2013).

L'applicabilité de l'approche BCBEC aux paysages arctiques et subarctiques est bien documentée, tant par son adoption récente par le territoire du Yukon (ministère de l'Environnement du Yukon, 2016) que par des travaux plus anciens sur l'Arctique (Lambert, 1968 ; Barrett, 1972) et des travaux récents dans les parcs nationaux arctiques et subarctiques du Canada (Ponomarenko et al., 2014) et dans la région de la Station canadienne de recherche dans l'Extrême-

Arctique (SCREA), près de Cambridge Bay, au Nunavut (McLennan et al., 2018).

Conformément à la méthode BCBEC, le système CASBEC comprend trois classifications intégrées, comme le démontre la figure 1 .

1. **Une classification centrale et hiérarchique de la composante végétale** des communautés écologiques terrestres, basée sur les données du relevé de végétation, suivant la méthode de classification de la BCBEC et de Braun-Blanquet (MacKenzie et Meidinger, 2017).
2. **Une classification biogéoclimatique** qui utilise la distribution des associations de végétation représentant les communautés végétales matures se trouvant sur les sites zonaires pour délimiter les unités de biogéoclimats régionaux écologiquement équivalents.
3. **Une classification des écosites** qui combine les associations de végétaux matures récurrentes et les environnements où ils se trouvent pour définir des conditions de site écologiquement équivalentes.

Des concepts clés, comme les écosystèmes zonaux et l'équivalence écologique, assurent la cohésion de la structure du système CASBEC. Ces concepts clés seront examinés dans la prochaine rubrique.

Communauté écologique terrestre

La communauté écologique terrestre (Figure 1) est l'écosystème à l'échelle locale qui se présente comme une entité réelle dans le paysage. Elle fait l'objet d'une classification dans le système CASBEC, mariant les composantes biotiques (communauté végétale) et abiotiques (site écologique) des paysages terrestres. Elle comprend tous les biotes d'un site, des microbes et invertébrés du sol aux végétaux, pathogènes, herbivores et prédateurs qui constituent l'écosystème local. La communauté écologique terrestre comprend également le cadre environnemental physique, les processus et facteurs qui contrôlent en partie la composition biotique, l'abondance et la productivité, ainsi que les interactions entre tous les composés abiotiques et biotiques. Dans le système CASBEC, les communautés écologiques terrestres sont regroupées selon la similarité générale des communautés végétales (classification de la végétation) et les propriétés du site et du sol (classification du site). Cela crée des catégories

¹ Pour une analyse plus détaillée de l'histoire de la BCBEC, voir également Wali (1988).

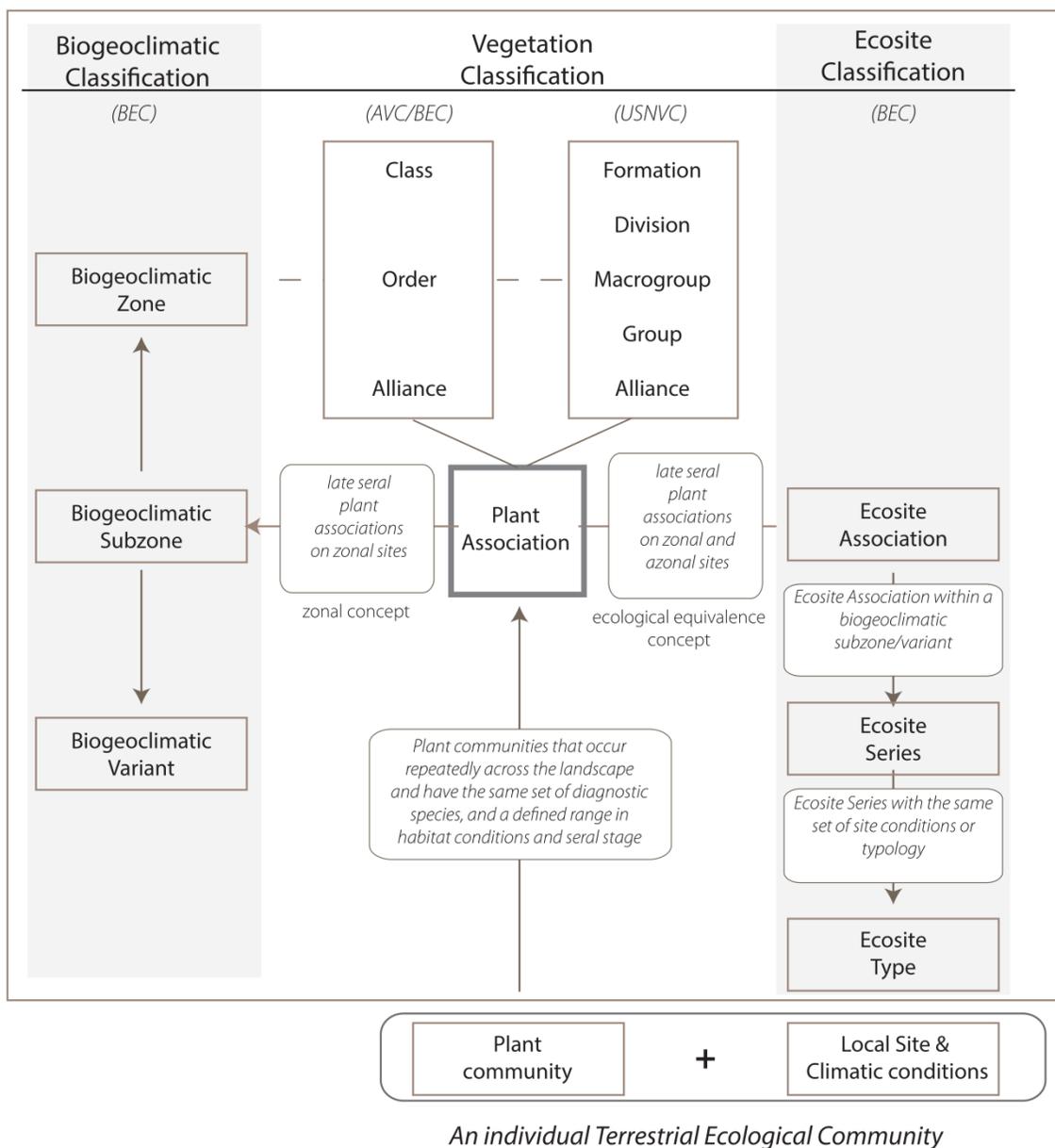


Figure 1 : Le cadre du système CASBEC montrant les liens entre la classification biogéoclimatique et la classification des écosites avec la classification centrale de la végétation, y compris les unités supérieures de la Biogeoclimatic Ecosystem Classification (BEC), la Arctic Vegetation Classification (AVC) et la United States National Vegetation Classification (USNVC). L'Association des végétaux est au cœur du système CASBEC et est liée aux classifications biogéoclimatiques et écosites par les concepts d'équivalence zonale et écologique, respectivement.

relativement uniformes qui sont utiles pour toute une série d'applications de recherche, de surveillance, et d'aménagement du territoire.

Collecte sur le terrain de données provenant des parcelles de la communauté écologique terrestre

Le système CASBEC commence tout juste à être appliqué dans l'Arctique et le Subarctique. La collecte intensive de données sur les parcelles pour

l'ensemble des communautés écologiques terrestres dans les zones d'étude est essentielle pour élaborer des guides d'excursion, des formations et d'autres outils dont les utilisateurs techniques tirent profit en Colombie-Britannique. Pour établir la classification, des informations détaillées sur l'écosystème (site, sol et végétation) sont recueillies pour toutes les conditions du site de la zone étudiée. L'objectif de la collecte sur le terrain est d'identifier et d'échantillonner toutes les communautés écologiques terrestres

qui existent. Ces informations peuvent ensuite être formellement classées et utilisées pour élaborer une classification des écosystèmes locaux, et souvent une carte des écosystèmes terrestres. Des équipes de terrain spécialisées dans l'identification des espèces vasculaires et non vasculaires, la description des sols et la géomorphologie sont nécessaires pour décrire avec précision les communautés écologiques terrestres.

Une campagne sur le terrain pour un domaine d'étude particulier s'effectue idéalement en deux saisons de travaux : la première est une phase de reconnaissance et de description générale de l'écosystème utilisée pour élaborer un projet de classification de l'écosystème, et la seconde est utilisée pour confirmer la classification et recueillir plus de données au besoin pour terminer le projet de classification de la zone. Voici une brève description des principales étapes et principaux objectifs d'une campagne typique de deux ans. Dans de nombreux cas, il sera nécessaire de créer des cartes des écosystèmes classant les unités comme des polygones cartographiques (les approches cartographiques seront abordées dans un futur manuscrit).

1. Recueillir le plus de renseignements complémentaires possible sur la zone étudiée. Par exemple, des études, des rapports et des cartes sur la géologie du socle rocheux, l'histoire glaciaire et postglaciaire, la géologie de surface, les sols, le pergélisol, la végétation, la couverture et l'utilisation des terres, la présence et l'habitat de la faune et de la flore, ainsi que les données de télédétection disponibles, notamment des photos aériennes récentes et historiques, des images satellites et des données topographiques. Les informations provenant de toutes les sources sont utilisées pour élaborer une hypothèse de travail sur la végétation et les principaux facteurs écologiques contrôlant la composition, la structure, la productivité et la distribution des écosystèmes (par exemple, les gradients hydrologiques, les principales formes de relief et les propriétés du sol). L'analyse des photos aériennes, de l'imagerie et des données topographiques fournit des renseignements importants sur la répartition spatiale des communautés écologiques terrestres dans le paysage (par exemple, les hautes terres et les terres humides, les plaines inondables et les estuaires) et est utilisée pour générer un plan d'échantillonnage pour la campagne sur le terrain.
2. Concevoir un échantillonnage sur le terrain des caractéristiques du site, du sol et de la végétation pour toute la gamme des écosystèmes locaux potentiels et le long des pentes écologiques prédominantes. Les sites d'échantillonnage sont choisis de préférence en fonction de la définition d'une communauté écologique terrestre - une zone du paysage relativement uniforme en termes de composition et de structure de la végétation, et de propriétés du sol et du relief (De Cáceres et al., 2015). Afin de saisir la liste complète des espèces d'une communauté, la taille des parcelles est généralement entre 25 m² et 400 m².
3. Les méthodes de recherche sur le terrain pour la réalisation des descriptions des écosystèmes sont bien décrites dans le manuel élaboré pour la BCBC (BC MoFR-MoE, 2010). Une version de ce manuel pour le Yukon est en cours d'élaboration, et POLAIRE travaille à l'élaboration d'une version de ce manuel pour l'Arctique-Subarctique. Les observations générales suivantes sont effectuées sur chacune des parcelles échantillonnées :
 - a. Évaluation du pourcentage de couverture par des strates de hauteur prédéfinie de tous les végétaux vasculaires et non vasculaires poussant sur le substrat prédominant du sol. Tous les végétaux doivent être associés à une espèce et des spécimens justificatifs doivent être recueillis selon les exigences pour la confirmation taxonomique (processus de relevé).
 - b. Décrire les propriétés du sol telles que la structure et la classification de l'humus, les strates pédonales du sol, les textures minérales et organiques du sol, la profondeur et la couleur du sol, et les principaux processus du sol tels que la marbrure, la gleyification et la cryoturbation. Attribuer la bonne classification des sols selon le système canadien de classification des sols (groupe de travail sur la classification des sols, 1998).
 - c. Décrire les caractéristiques du site telles que l'altitude, l'aspect, l'angle et la position de la pente, ainsi que le relief, les matériaux superficiels et la profondeur de la couche active jusqu'au pergélisol.

Lorsqu'une utilisation précise de la carte et de l'inventaire est prévue, des spécialistes supplémentaires peuvent faire partie de l'équipe de cartographie. Par exemple, si l'utilisation concerne l'habitat du caribou, un spécialiste des caribous peut accompagner l'équipe

et évaluer les différents écosystèmes pour déterminer s'ils conviennent comme habitat du caribou. De même, des spécialistes des applications d'ingénierie peuvent vouloir accompagner les équipes pour évaluer les écosystèmes afin de trouver des sources de gravier pour la construction de routes ou la circulation saisonnière pour l'exploration minière.

Aux fins du système CASBEC, les données de terrain sont recueillies sur des formulaires de terrain normalisés adaptés de la BCBC FS882 aux conditions arctiques et subarctiques. Des approches de saisie numérique sont actuellement à l'étude pour faciliter la saisie et la gestion des données. Dans le cadre du processus de sécurité des données, à la fin de la description de l'écosystème de chaque parcelle, des images numériques de tous les formulaires de terrain sont prises sur le terrain. Cela comprend également la prise de photos de la parcelle avec des angles de vue obliques et panoramiques, ainsi que des photos du profil du sol, de l'emplacement du site et de tout autre facteur d'intérêt sur le site. Toutes les données des parcelles sont saisies dans le logiciel VPRO (MacKenzie et Klassen, 2009) pour être synthétisées, analysées et tabulées.

Des données de terrain au système CASBEC

Classification de la végétation

Pour générer des unités d'association de plantes, le système CASBEC utilise des méthodes de classification² de la végétation. Instaurées par Braun-Blanquet (1932, 1951, 1964), ces méthodes ont été modifiées, comme indiqué dans Pojar et al. (1987), De Cáceres et al. (2015), et MacKenzie et Meidinger (2017). L'objectif est de regrouper les relevés comportant des communautés végétales similaires en unités de classification définies par une combinaison diagnostique d'espèces (CDS) qui les différencient de la CDS des autres unités.

L'unité d'association des végétaux est une unité de travail fondamentale. Elle peut être généralisée à des niveaux fonctionnels plus larges basés sur la similarité floristique, ou sur des facteurs fonctionnels/spatiaux par une combinaison de la floristique, de la dominance, de la physionomie de la végétation et de la biogéographie comme l'appliquent l'USNVC (2016), Jennings et al. (2004, 2009), ou à des niveaux supérieurs

de la composante site du système CASBEC. De cette façon, des classifications d'associations végétales géographiquement limitées sont établies pour les zones d'étude locales. Dans le but de créer une classification nationale cohérente à travers les biomes arctiques et subarctiques canadiens, le système CASBEC analyse et fusionne les unités locales de classification de la végétation basées sur des projets et provenant de différentes zones géographiques. Grâce à un processus de corrélation, le système CASBEC compare la combinaison diagnostique des espèces entre les unités d'association locales disponibles et identifie les unités de classification équivalentes ou divergentes.

Classification biogéoclimatique et écosystèmes zonaux

Pour classer et établir la portée géographique des sous-zones biogéoclimatiques à l'échelle régionale à une échelle maximale de 1/250 000 (voir figure 1), le système CASBEC utilise le concept de zone. Le concept de zone³ a été appliqué avec succès en Colombie-Britannique (Pojar et al., 1987) et dans d'autres régions du Canada et de l'Arctique, par exemple, par le groupe de travail sur les écorégions (1989), Saucier et al. (1998), l'équipe du CAVM (2003), Gould et al. (2003), Jorgenson et Meidinger (2015), et Baldwin et al. (2019).

Les sites zonaux sont des sites écologiquement « normaux » présentant des caractéristiques définies, comme le fait d'être situés sur des pentes modérées et d'aspect neutre, et d'avoir des sols bien drainés d'une certaine profondeur moyenne minimale (environ 60 cm) avec une texture argileuse et une faible teneur en fragments grossiers (< 25 %). Les communautés végétales matures qui se trouvent sur les sites zonaux sont supposées refléter au mieux le potentiel écologique des climats régionaux et définir l'écosystème zonal (Pojar et al., 1987 ; Groupe de travail sur les écorégions, 1989 ; CAVM Team, 2003). Les changements dans la distribution des écosystèmes zonaux à travers l'Arctique et le Subarctique sont utilisés pour caractériser et cartographier les sous-zones biogéoclimatiques.

Le concept des unités biogéoclimatiques est lié aux cartes de la végétation arctique circumpolaire (Circumpolar Arctic Vegetation Maps, CAVM Team 2003), mais à une échelle plus fine. Ces unités enregistrent la

² Pour plus de détails sur la classification de la végétation et les méthodes de classement en général, voir Shimwell (1971) et Ellenberg (1988).

variabilité notamment de la zonalité de l'altitude, se concentrent davantage sur la composition en espèces de l'écosystème zonal plutôt que sur les différences physiologiques et recoupent les informations que les CAVM séparent en sous-zone et en province floristique dans l'unique composante biogéoclimatique du système CASBEC.

Classification des écosites et équivalence écologique

Dans le système CASBEC, les taxons de sites écologiques classés ou « écosites » décrivent les zones du paysage où la somme totale des facteurs environnementaux qui interagissent pour déterminer la composition, la structure et la productivité de la végétation sont considérés comme écologiquement équivalents, comme le démontre et l'exprime l'occurrence des mêmes communautés végétales à transition tardive. Les écosites décrivent la gamme des conditions environnementales au sein d'une sous-zone biogéoclimatique (c'est-à-dire au sein du même biogéoclimat régional) et soutiennent la même association ou sous-association de végétaux matures (séries et types d'écosites – voir la figure 1). Les gradients dominants qui différencient les écosites sont utilisées pour simplifier et organiser la complexité environnementale créée par la variabilité physiographique à travers le paysage. Les gradients arctiques et subarctiques les plus courants au sein d'une unité biogéoclimatique sont l'humidité relative du sol et le régime nutritif, ainsi que le degré de protection contre la neige en hiver. Cette simplification des principales conditions écologiques du site peut être exprimée sur une grille édaphotopique (Figure 2) pour différencier l'espace environnemental des séries d'écosites qui se trouvent dans une sous-zone biogéoclimatique.

Les produits du système CASBEC

Cartes régionales des sous-zones et des zones biogéoclimatiques

Cartes régionales des sous-zones et des zones biogéoclimatiques Les cartes biogéoclimatiques sont élaborées pour délimiter des régions climatiques écologiquement équivalentes (zones et sous-zones biogéoclimatiques) qui fournissent des unités climatiques régionales en fonction desquelles des séries d'écosites locaux et des types d'écosites sont définis et décrits. Des exemples de cartes biogéoclimatiques de la Colombie-Britannique peuvent être trouvés en ligne à l'adresse <https://www.for.gov.bc.ca/hre/becweb/resources/maps/>.

En plus de l'identification de l'écosystème zonal dans le cadre du processus de classification, des études de terrain et des relevés aériens sont réalisés pour documenter les changements de l'écosystème zonal à travers les gradients climatiques d'altitude ou de latitude. Comme la diversité floristique diminue avec l'augmentation de la latitude dans l'Extrême-Arctique,

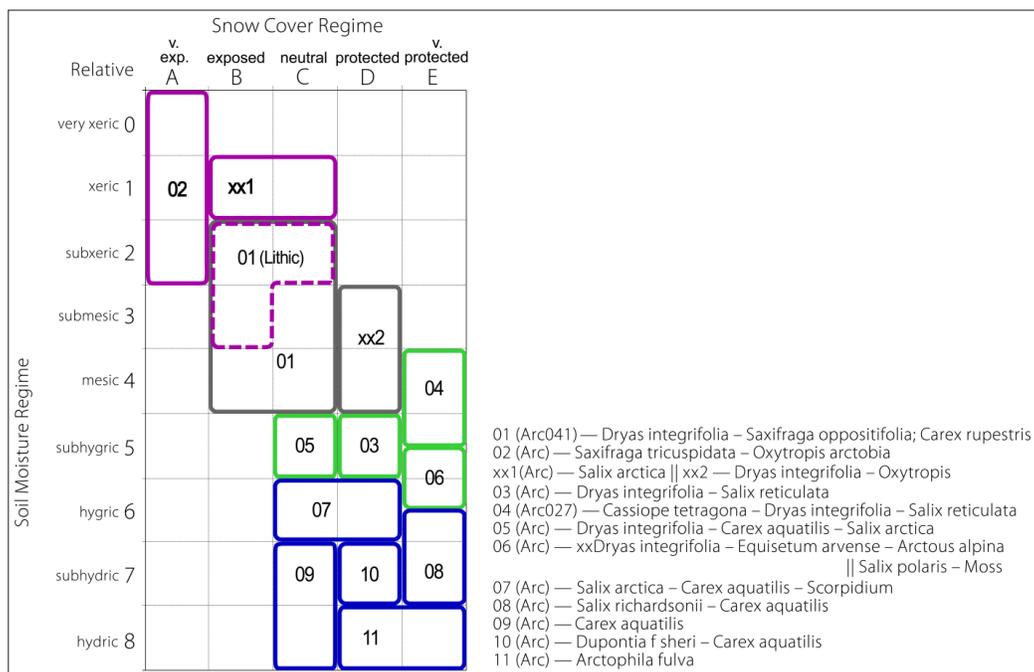


Figure 2 : Projet de grille édaphotopique développée pour la zone expérimentale de référence de la SCREA dans le sud-est de l'île Victoria (CAVM Zone D). Représentation des positions relatives de 11 séries d'écosites dans une grille chionoédaphique à deux axes (humidité du sol et protection de la neige).

³ Les lignes directrices de la classification écologique des terres du Yukon utilise le terme « sites de référence » pour décrire ce concept (Ministère de l'Environnement du Yukon, 2016).

la disparition ou l'apparition de communautés d'arbustes bas, ou d'arbres sur les sites azonaux, deviennent des preuves supplémentaires importantes pour la cartographie des frontières biogéoclimatiques.⁴ Les limites zonales/sous-zonales sont souvent complétées à l'aide de limites d'élévation ou de latitude généralisées pour en extrapoler les limites. Un autre élément à prendre en compte est l'effet déterminant que la géologie du socle rocheux peut avoir sur la distribution des végétaux, en particulier dans les zones calcaires communes de l'Arctique canadien. Dans ces cas, deux grilles édaphotopiques différentes sont nécessaires pour le même biogéoclimat régional.⁵ Dans le contexte régional et biogéoclimatique des cartes biogéoclimatiques, c'est-à-dire qui comportent des sous-

zones biogéoclimatiques, l'un des produits les plus utiles et les plus courants du système CASBEC sont les cartes à l'échelle locale des séries et types d'écosites. La création des cartes des séries et des types d'écosites et leurs applications son abordées plus en détail ci-après.

Guides d'excursion des écosites

Des guides d'excursion servant au repérage des écosites par unité biogéoclimatique sont couramment produits pour permettre une utilisation fonctionnelle de la classification. Le contenu et la présentation des guides d'excursion sont bien conçus pour la BCBE et nous proposons d'utiliser la même approche pour les guides d'excursion du CASBEC. Des guides

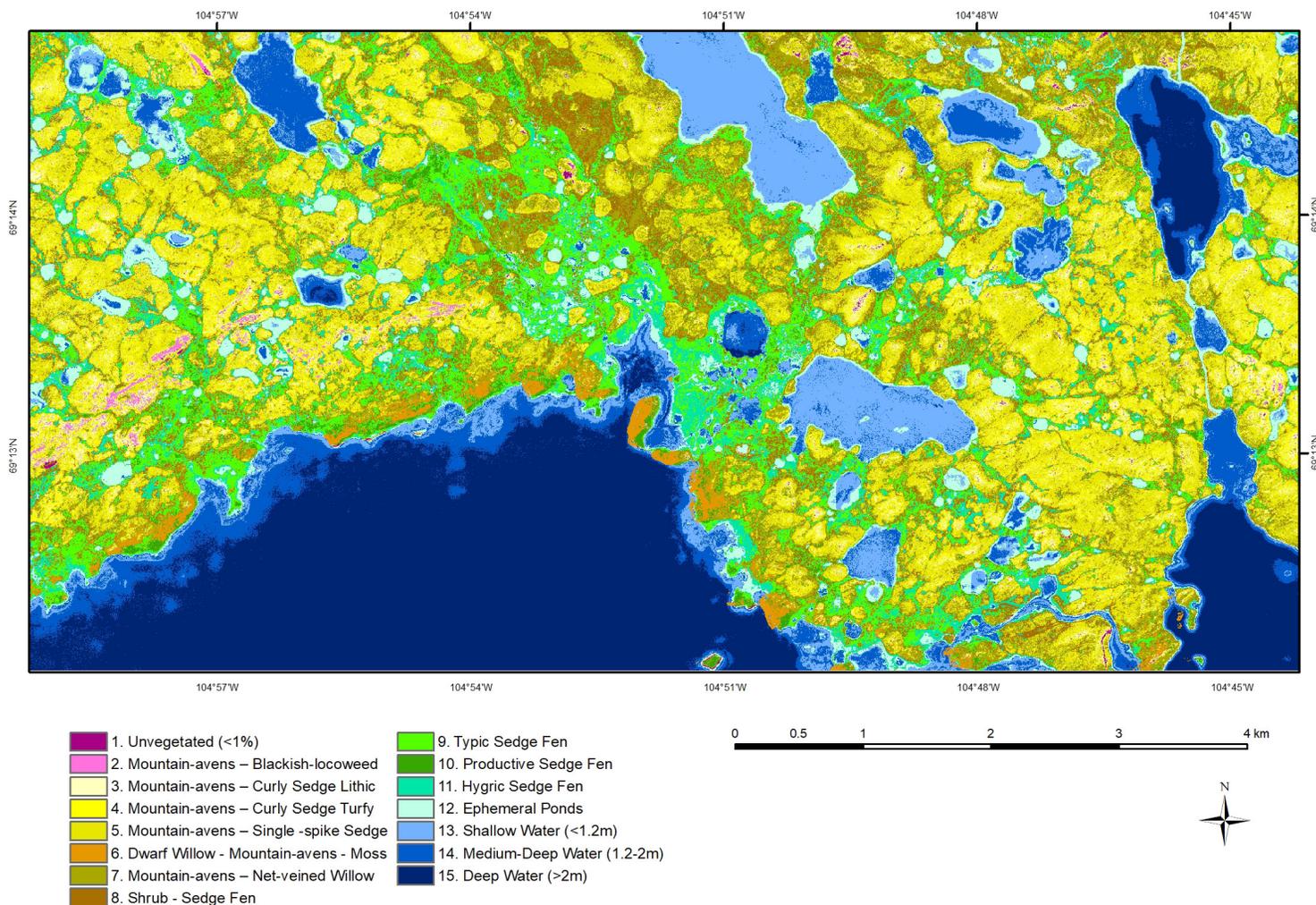


Figure 3 : Cartographie haute résolution (50 cm World View2) des séries d'écosites dans la zone de surveillance intensive de la Station canadienne de recherche dans l'Extrême-Arctique, près de Cambridge Bay, au Nunavut. Pour la préparation des cartes et les interprétations des écosystèmes, voir Ponomarenko et al. (2019).

⁴ Pour une description détaillée des méthodes utilisées pour la cartographie des sous-zones biogéoclimatiques en Colombie-Britannique, voir le Ministry of Forests, Lands, Natural Resource Operations and Rural Development et le Ministry of Environment de la Colombie-Britannique (BC MoFR-MoE, 2010).

⁵ Pour la cartographie des écosystèmes régionaux au Québec, voir les liens sous Ressources naturelles du Québec (consultés en mars 2019).

d'excursion sont disponibles pour toutes les sous-zones biogéoclimatiques de la Colombie-Britannique et peuvent être consultés à l'adresse <https://www.for.gov.bc.ca/hre/becweb/resources/classificationreports/subzones/index.html>.

Chaque guide de terrain renferme généralement des informations générales sur la théorie du système CASBEC, des informations sur la manière d'utiliser le guide et un aperçu environnemental de la sous-zone. La présentation comprend généralement les normes climatiques, la physiographie et la géologie du socle rocheux, la géologie de surface, les sols, le pergélisol et la description de la végétation. Le contenu principal des guides d'excursion fournit une description des séries d'écosites, y compris les principales caractéristiques du site, du sol et de la végétation, ainsi que certaines interprétations de la gestion et de l'utilisation de la faune, si elles sont disponibles. Afin de répondre aux besoins locaux de gestion ciblée des interprétations, les types d'écosites peuvent également être décrits dans chaque série de sites. Les annexes du guide d'excursion comprennent généralement les principaux renseignements sur l'humidité du sol et son régime nutritif, les renseignements principaux sur la texturation du sol, une liste des végétaux vasculaires et non vasculaires, des tableaux récapitulatifs de la végétation pour les séries d'écosites ainsi qu'une classification et une description des formes d'humus du sol.

Pour faciliter la classification et la cartographie des écosystèmes terrestres arctiques et subarctiques, des guides d'excursion sont en cours d'élaboration pour les régions méridionales et arctiques du Yukon à l'adresse <https://yukon.ca/fr/ecological-landscape-classification#en-quoi-consiste-la-classification-%C3%A9cologique-des-terres-cet-> (MacKenzie et al., 2018). Un rapport sur la cartographie de l'écosystème du parc national Wapusk (Ponomarenko et al., 2014) renferme des renseignements semblables à ceux trouvés dans les guides d'excursion de la BCBE. Le personnel de POLAIRE a commencé à travailler à l'élaboration de guides d'excursion pour les sous-zones E et D du CAVM dans la zone expérimentale et de référence du SCREA dans la région de Kitikmeot, au Nunavut.

Utilisation du système CASBEC

Les renseignements et les produits tirés de la classification et de la cartographie des écosystèmes

terrestres sont des outils qui peuvent être utilisés à de nombreuses fins de recherche, de surveillance et de gestion de l'utilisation des terres, comme en témoigne le grand nombre d'utilisations du BCBE en Colombie-Britannique depuis 1975 (MacKinnon et al., 1992). Une analyse détaillée des utilités du système CASBEC dépasse le cadre du présent article, mais quelques exemples de l'Arctique sont présentés ici.

En utilisant l'approche CASBEC, des cartes d'écosites ont été créées principalement à partir de données de télédétection optique, et d'autres variables du paysage dérivées. Par exemple, la position, l'élévation et l'aspect des pentes, à différentes échelles, ont été utilisés avec l'imagerie optique pour élaborer des inventaires de conservation, une cartographie des habitats, la planification des zones protégées dans les parcs nationaux du nord du Canada (Fraser et al., 2012 ; McLennan, 2012a, 2012b ; Ponomarenko, 2014) et à des fins de développement industriel (Groupe Hémisphères, 2009). Des approches connexes sont maintenant largement utilisées comme éléments de base du développement nordique (Groupe Hémisphères, 2009 ; Groupe Hémisphères, 2014), et pour la cartographie et l'interprétation de la géologie de surface et des caractéristiques du pergélisol (Zhang et al., 2012, 2013 ; Cable et al., 2016 ; McKillop et Sacco, 2017).

D'un point de vue de recherche, les unités du système CASBEC fournissent des valeurs essentielles pour la stratification dans la conception des études, pour l'extrapolation des résultats à de nouvelles zones, et pour la coordination et la comparaison des recherches sur les écosystèmes terrestres à long terme et des expériences de surveillance dans et entre les zones d'étude (Figure 3 ; McLennan et al., 2018). Les unités du système CASBEC sont actuellement utilisées pour la conception et la mise en œuvre d'expériences de surveillance des écosystèmes à long terme sur le campus de la SCREA près de Cambridge Bay, au Nunavut (McLennan et al., 2018).

L'extrapolation du climat des surfaces (Hutchinson, 1991 ; Daly et al., 2002 ; Wang et al., 2012a ; McKenney et al., 2013) a permis de définir les dimensions climatiques de régions climatiques écologiquement équivalentes, puis de les appliquer dans la modélisation du changement climatique dans plusieurs territoires (Hamann et Wang, 2006 ; Wang et al., 2012b). Avec une délimitation précise des sous-zones biogéoclimatiques arctiques et subarctiques, ces mêmes techniques

peuvent être utilisées pour aider à prévoir les changements futurs de la composition et de la structure des écosystèmes terrestres arctiques et subarctiques.

Sommaire et analyse

Les concepts du système CASBEC, comme les écosystèmes zonaux et l'équivalence écologique, utilisent les communautés végétales comme phytomètres pour distinguer les sous-zones biogéoclimatiques régionales et les séries locales d'écocites. Ces concepts clés supposent l'évolution des écosystèmes dans des conditions de stabilité et d'équilibre climatiques relatifs et sont soutenus par la stabilité estimée des lignées d'arbres nord-américaines et eurasiennes datant de 3 000 à 4 000 ans (Lavoie et Payette, 1996 ; MacDonald et al., 2000 ; Payette, 2006). Cette constance climatique a contribué à créer les modèles distinctifs de la physionomie de la végétation et de sa floristique que nous voyons aujourd'hui dans l'Arctique canadien (Edlund et Alt, 1989 ; CAVM Team, 2003 ; Gould et al., 2003). Il est clair maintenant que cet équilibre change rapidement, et que les communautés végétales arctiques et subarctiques évoluent en conséquence (Elmendorf et al., 2012 a, 2014 ; Pearson et al., 2013). Comme l'explique Haeussler (2011), les approches biogéoclimatiques sont déjà globales et multiscalaires. Pour être pertinent en termes de changement des écosystèmes dû au climat, le système CASBEC devra adopter des concepts comme les processus non linéaires et non équilibrés mis de l'avant par le domaine en pleine évolution de la science de la complexité des écosystèmes (Manson, 2001 ; Bar Yam, 2003). Cela peut être réalisé en adaptant des techniques nouvelles et dynamiques, comme les paysages adaptatifs (Kauffman, 1995 ; Gavrillets, 2004) et la modélisation basée sur des agents (Gilbert et Terna, 2000 ; Bonabeau, 2002), pour comprendre et prévoir les changements des écosystèmes dans un monde en rapide évolution.

Le présent article décrit la nécessité d'une approche normalisée et utile pour décrire, classer et cartographier les écosystèmes terrestres dans les biomes arctiques et subarctiques canadiens. Le système CASBEC adopte la théorie, l'approche et les méthodes employées par le système de la BCBE, très performant et éprouvé. Ce système s'est révélé être un outil très utile pour les applications de gestion des terres et constitue un cadre

de recherche essentiel en Colombie-Britannique. Un examen officiel et indépendant (Vis-à-vis Management Resources, 2005) a déclaré que la BCBE a entraîné des « centaines de millions de dollars » d'avantages économiques pour la province de la Colombie-Britannique. Bien que les avantages économiques relatifs aux utilisations pour l'industrie forestière ne soient pas appropriés pour les écosystèmes du Nord, certains autres avantages demeurent pertinents, comme la création d'une « infrastructure d'information en langage commun » utilisée par les chercheurs et les gestionnaires des terres, une réduction significative des coûts de formation, et la crédibilité des communications de recherche et des décisions de gestion des terres basée sur l'acceptation générale des produits de la BCBE.

De même, la vaste adoption du système CASBEC par la communauté nordique de la recherche et de la gestion des terres permettrait de créer un langage commun pour la recherche, la surveillance et la gestion des écosystèmes arctiques et subarctiques. Pour ce faire, il faudrait relier et extrapoler les activités régionales aux activités nationales de recherche et de surveillance, et rationaliser les conséquences écologiques potentielles et les stratégies d'atténuation des développements dans le Nord. Enfin, un système normalisé simplifierait la formation et permettrait de créer des cours de formation sur le CASBEC dans les collèges du Nord, ou au moyen de programmes comme le Nunavut Environmental Technician Program.

Le présent article est destiné à la communauté canadienne des chercheurs et des praticiens consultants en écosystèmes terrestres du Nord. Il propose la mise en œuvre du système CASBEC pour normaliser la classification et la cartographie des communautés écologiques terrestres dans les paysages arctiques et subarctiques du Canada. Le système CASBEC en est actuellement à ses débuts et il reste beaucoup à faire pour le rendre aussi pratique et utile que le système BCBE de la Colombie-Britannique. La première étape de ce processus est de parvenir à un accord avec la communauté scientifique travaillant sur la végétation du Nord. Cet article sera largement diffusé et, si l'intérêt est suffisant, un atelier sera organisé pour discuter des détails du système CASBEC et des étapes nécessaires à son adoption comme méthode normalisée pour la recherche, la surveillance et l'utilisation des terres dans le Nord.

La communauté canadienne des chercheurs et des praticiens consultants en écosystèmes terrestres du Nord est invitée à travailler en collaboration pour mettre en œuvre le système CASBEC. L'intérêt, la contribution et le soutien à l'uniformisation amélioreront considérablement la coordination, la portée et l'incidence des nombreuses utilisations du système dans les domaines de la recherche, de la surveillance et de la conservation dans le Nord.

Considérations d'ordre communautaire

Une classification et une cartographie normalisées et opérationnelles des écosystèmes régionaux et locaux profiteront aux communautés du Nord de la même manière qu'elles peuvent profiter à la recherche, à la surveillance et à la gestion des terres dans le Nord, en fournissant un modèle d'écosystème global, intégratif et utile pour comprendre les changements de l'écosystème dans le contexte socio-écologique des besoins de la communauté. L'approche globale utilisée par le système CASBEC, où le paysage est considéré comme un système complexe et interactif constitué d'interactions abiotiques et biotiques, est semblable à la vision globale du monde qui caractérise le savoir autochtone (Berkes, 2008, 2009). Ce système peut être utilisé dans le cadre d'une approche de cogénération de connaissances pour traiter des questions communautaires comme la compréhension de l'évolution des habitats des espèces vitales pour l'alimentation locale (Jones et al., 2019).

À mesure que le système CASBEC sera perfectionné dans le Nord, il sera possible pour les membres des communautés ayant reçu une formation technique d'utiliser le système pour répondre aux besoins de leur communauté locale. En témoigne la longue histoire de la formation technique et de l'application du système BCBECE en Colombie-Britannique. Une fois qu'un projet de classification des écosystèmes locaux a été élaboré pour une sous-zone biogéoclimatique, les utilisateurs communautaires de niveau technique pourront être formés à l'utilisation des clés et autres outils des écosystèmes, ou utiliser les ébauches de guides d'excursions, s'ils sont accessibles. Ces utilisateurs communautaires pourront identifier et interpréter les unités de l'écosystème et utiliser la classification pour des questions qui répondent aux besoins immédiats de leurs communautés.

Remerciements

Les auteurs tiennent à souligner le travail de pionnier de Vladimir Krajina et de ses nombreux étudiants, qui ont conceptualisé et développé les principes des écosystèmes biogéoclimatiques en Colombie-Britannique. Nous souhaitons plus particulièrement souligner les travaux de recherche et le leadership de Dr Karel Klinka et de Dr Jim Pojar, qui ont travaillé à rendre le système BCEBC fonctionnel, qui ont encadré de nombreux étudiants et praticiens et qui ont travaillé à quantifier et à valider de nombreuses catégories qualitatives générées par le processus biogéoclimatique.

Références

- Baldwin, K., Allen, L., Basquill, S., Downing, D., Flynn, N., MacKenzie, W., Major, M., Meades, W., Meidinger, D., Morneau, C., Saucier, J.-P., Thorpe, J., Uhlig, P. 2019. Vegetation Zones of Canada: a biogeoclimatic perspective. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service: Sault Ste. Marie, Ontario.
- Barrett, P.E. 1972. Phytogeocoenoses of a coastal lowland ecosystem, Devon Island, N.W.T. PhD thesis, Department of Botany, The University of British Columbia. Accessed September 12, 2016. <https://open.library.ubc.ca/cIRcle/collections/ubctheses/831/items/1.0101177>.
- Bar-Yam, Y. 2003. Dynamics of complex systems. Studies in nonlinearity. Westview Press: Boulder, California.
- BC MoFR-MoE. 2010. Field Manual for Describing Terrestrial Ecosystems – 2nd edition. B.C. Ministry of Forests and Range (MoFR) and B.C. Ministry of Environment (MoE), Land Management Handbook No. 25. Crown Publications: Victoria, British Columbia.
- Berkes, F. 2008. Sacred ecology – 2nd edition. Routledge: New York, New York.
- Berkes, F., Berkes, M.K. 2009. Ecological complexity, fuzzy logic and holism in indigenous knowledge. *Futures*, 41(1):6–12. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.futures.2008.07.003>.

- Bonabeau, E. 2002. Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the U.S.A.*, 99(S3):7280–7287. doi:10.1073/pnas.082080899. PMID:12011407.
- Braun-Blanquet, J. 1932. *Plant Sociology: the study of plant communities*. Hafner: New York, New York.
- Braun-Blanquet, J. 1951. *Pflanzensoziologie: Grundzüge de Vegetationskunde – 2nd edition*. Springer-Verlag: Vienna, Austria.
- Braun-Blanquet, J. 1964. *Pflanzensoziologie: Grundzüge der Vegetationskunde – 3rd edition*. Springer-Verlag: Vienna, Austria.
- Cable, W.L., Romanovsky, V.E., Jorgenson, M.T. 2016. Scaling-up permafrost thermal measurements in western Alaska using an ecotype approach. *The Cryosphere*, 10(5):2517–2532. Retrieved from: <http://dx.doi.org/10.5194/tc-10-2517-2016>.
- CAVM Team. 2003. *Circumpolar Arctic Vegetation Map. Conservation of Arctic Flora and Fauna Map No. 1*. U.S. Fish and Wildlife Service: Anchorage, Alaska. ISBN: 0-9767525-0-6
- CNVC. No date. *The Canadian National Vegetation Classification*. Accessed March 2019. <http://cnvc-cnvc.ca/>.
- Clements, F.E. 1916. *Plant Succession: An Analysis of the Development of Vegetation*. Carnegie Institution of Washington Publication: Washington, DC.
- Clements, F.E. 1936. Nature and Structure of the Climax. *Journal of Ecology*, 24(1):252–284.
- Daly, C., Gibson, W.P., Taylor, G.H., Johnson, G.L., Pasteris, P. 2002. A knowledge-based approach to the statistical mapping of climate. *Climate Research*, 22(2):99–113.
- De Cáceres, M., Chytrý, M., Agrillo, E., Attorre, F., Botta-Dukat, Z., Capelo, J., Czucz, B., Dengler, J., Ewald, J., Wiser, S.K. 2015. A comparative framework for broad-scale plot-based vegetation classification.
- Ecoregions Working Group. 1989. *Ecoclimatic Regions of Canada: first approximation*. Ecoregions Working Group, Canada Committee on Ecological Land Classification. Ecological Land Classification Series, No. 23. Sustainable Development Branch, Canadian Wildlife Service: Ottawa, Ontario. ISBN 06621656590662165659.
- Edlund, S.A., Alt, B.T. 1989. Regional congruence of vegetation and summer climate patterns in the Queen Elizabeth Islands, Northwest Territories, Canada. *Arctic*, 42(1):3–23.
- Ellenberg, H. 1988. *Vegetation ecology of Central Europe – 4th edition*. Cambridge 2884 University Press: Cambridge, Massachusetts
- Elmendorf, S.C., Henry, G.H.G., Hollister, R.D., Björk, R.G., Boulanger-Lapointe, N., Cooper, E.J., Cornelissen, J.H.C., et al., 2012. Plot-scale evidence of tundra vegetation change and links to recent summer warming. *Nature Climate Change*, 2(6):453–457.
- Elmendorf, S. C., Henry, G.H.R., Hollister, R.D., Fosaa, A.M., Gould, W.A., Hermanutz, L., Hofgaard, A., Jónsdóttir, I.S., Jorgenson, J.C., Lévesque, E., Magnusson, B., Molau, U., Myers-Smith, I.H., Oberbauer, S.F., Rixen, C., Tweedie, C.E., Walker, M.D. 2014. Experiment, monitoring, and gradient methods used to infer climate change effects on plant communities yield consistent patterns. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the U.S.A.*, 112(2):448–452.
- Environment Yukon. 2016. *Yukon Ecological and Landscape Classification Guidelines Version 1.0*. Edited by N. Flynn and S. Francis. Department of Environment, Policy, Planning & Aboriginal Relations Branch, ELC Program. Government of Yukon: Whitehorse, Yukon.
- Fraser, R., McLennan, D.S., Ponomarenko, S., Olthof, I. 2012. Image-based predictive ecosystem mapping in Canada's Arctic parks. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 14(NA):129–138.
- Gavrilets, S. 2004. *Fitness landscapes and the origin of species*. Princeton University Press: Princeton, New Jersey.

- Gilbert, N., Terna, P. 2000. How to build and use agent-based models in social science. *Mind and Society*, 1(1):57–72. doi:10.1007/BF02512229.
- Gould, W.A., Walker, D.A., Biesboer, D. 2003. Combining research and education: Terrestrial zonation across a Canadian Arctic transect. *Arctic*, 56(1):45–54.
- Groupe Hémisphères. 2009. Mapping of terrestrial ecosystems and surface deposits: Direct Shipping Ore Project. Technical report. Produced on behalf of New Millennium Capital Corp.
- Groupe Hémisphères. 2014. Terrestrial ecosystem mapping, Howse pit study area. Technical report. Submitted to Howse Minerals Limited.
- Haeussler, S. 2011. Rethinking biogeoclimatic ecosystem classification for a changing world. *Environmental Reviews*, 19(NA):254–277.
- Hamann, A., Wang, T. 2006. Potential effects of climate change on ecosystem and tree species distribution in British Columbia. *Ecology*, 87(11):2773–2786. doi:10.1890/0012-9658(2006)87[2773:PEOCCO]2.0.CO;2. PMID: 17168022.
- Hutchinson, M.F. 1991. The application of thin plate smoothing splines to continent - wide data assimilation. BMRC Research Report 27. Bureau of Meteorology: Melbourne, Victoria.
- Jennings, M., Faber-Langendoen, D., Peet, R., Loucks, O., Glenn-Lewin, D., Damman, A., Barbour, M., Pfister, R., Grossman, D., Roberts, D., Tart, D., Walker, M., Talbot, S., Walker, J., Hartshorn, G., Waggoner, G., Abrams, M., Hill, A., Rejmanek, M. 2004. Guidelines for Describing Associations and Alliances of the U.S. National Vegetation Classification. The Ecological Society of America Vegetation Classification Panel. Version 4. Retrieved from: http://vegbank.org/vegdocs/panel/NVC_guidelines_v4.pdf.
- Jennings, M. D., Faber-Langendoen, D., Loucks, O.L., Peet, R.K., Roberts, D. 2009. Standards for associations and alliances of the U.S. National Vegetation Classification. *Ecological Monographs*, 79(2):173–199.
- Jenny, H. 1941. *Factors of Soil Formation*. McGraw-Hill Book Co.: New York, New York.
- Jones, T., McLennan, D., Behe, C., Arvnes, M., Wesseberg, S., Sergienko, L., Harris, C., Harcharek, Q. 2019. Arctic Coastal Biodiversity Monitoring Plan. Conservation of Arctic Flora and Fauna International Secretariat: Akureyri, Iceland. 978-9935-431-76-9.
- Jorgensen, T., Meidinger, D. 2015. The Alaska Yukon Region of the Circumboreal Vegetation Map (CBVM). Conservation of Arctic Flora and Fauna (CAFF) Strategies Series Report. Conservation of Arctic Flora and Fauna International Secretariat: Akureyri, Iceland. ISBN: 978-9935-431-48-6.
- Kauffman, S.A. 1995. *At home in the universe: The search for laws of self-organization and complexity*. Oxford University Press: New York, New York.
- Krajina, V.J. 1960. Can we find a common platform for the different schools of forest type classification? *Silva Fennica*, 105(NA):50–55.
- Lambert, J.D. 1968. The ecology and successional trends of tundra plant communities in the low arctic subalpine zone of the Richardson and British mountains of the Canadian western arctic. PhD thesis, Department of Botany, The University of British Columbia. Accessed September 12, 2016. <https://open.library.ubc.ca/cIRcle/collections/ubctheses/831/items/1.0104598>.
- Lavoie, C., Payette, S. 1996. The long-term stability of the boreal forest limit in Subarctic Quebec. *Ecology*, 77(4):1226–1233.
- MacDonald, G.M., Velichko, A.A., Kremenetski, C.V., Borisova, O.K., Goleva, A.A., Andreev, L.C., Riding, R.T., Forman, S.L., Edwards, T.W.D., Aravena, R., Hammarlund, D. 2000. Holocene treeline history and climate change across northern Eurasia. *Quaternary Research*, 53(NA):302–311. doi:10.1006/qres.1999.2123.
- MacKenzie, W.H., Klassen, R. 2009. VPro User Guide 13. B.C. Ministry of Forests and Range, Research Branch: Victoria, B.C.
- MacKenzie, W.H., Meidinger, D. 2017. The Biogeoclimatic Ecosystem Classification Approach: an ecological framework for vegetation classification. *Phytocoenologiao, Special Issue Classification Approaches*, 48(2):203–213. doi:213doi10.1127/phyto/2017/0160.

- MacKenzie, W. H., Kennedy, C.E., Flynn, N. 2018. Ecosystems of the Yukon Arctic Region: a guide to identification. Department of Environment, Policy, Planning & Aboriginal Relations Branch, ELC Program. Government of Yukon: Whitehorse, Yukon.
- MacKinnon, A., Meidinger, D., Klinka, K. 1992. Use of the biogeoclimatic ecosystem classification in British Columbia. *Forestry Chronicle*, 68(1):100–120.
- Major, J. 1951. A functional, factorial approach to plant ecology. *Ecology*, 32(3):392–412.
- Manson, S. 2001. Simplifying complexity: a review of complexity theory. *Geoforum*, 32(3):405–414. doi:10.1016/S0016-7185(00) 00035-X.
- McKenney D., Pedlar, J., Hutchinson, M., Papadopol, P., Lawrence, K., Campbell, K., Milewska, E., Hopkinson, R.F., Price, D. 2013. Spatial climate models for Canada's forestry community. *Forestry Chronicle*, 89(5):659–663.
- McKillop, R.J., Sacco, DD.A. 2017. Predictive Mapping of Permafrost Thaw Settlement Hazard Near Lac de Gras, Northwest Territories. Abstract, 2017. Yellowknife Geoscience Forum.
- McLennan, D.S., Bell, T., Berteaux, D., Chen, W., Copland, L., Fraser, R., Gallant, D., Gauthier, G., Hik, D., Krebs, C.J., Myers-Smith, I.H., Olthof, I., Reid, D., Sladen, W., Tarnocai, C., Vincent, W.F., Zhang, Y. 2012a. Recent climate-related terrestrial biodiversity research in Canada's Arctic national parks: review, summary, and management implications. *Biodiversity*, 13(3-4):157–173.
- McLennan, D.S. 2012b. "Dealing with uncertainty: Managing and monitoring Canada's northern national parks in a rapidly changing world", in *Ecological Consequences of Climate Change – Mechanisms, Conservation, and Management*, ed. E.A. Beever and J.L. Belant. CRC Press, Taylor and Francis Group: Boca Raton, Florida, 209–233.
- McLennan, D.S., MacKenzie, W.H., and Meidinger, D., Wagner, J., Arko, C. 2018. A standardized ecosystem classification for the coordination and design of long-term monitoring in the Arctic-Subarctic Biomes. *Arctic, Supplement 1*, 71(5):1–15.
- Payette, S. 2006. Contrasted dynamics of northern Labrador tree lines caused by climate change and migrational lag. *Ecology*, 88(3):770–780.
- Pearson, R.G., Phillips, S.J., Loranty, M.M., Beck, P.S.A., Damoulas, T., Knight, S.J., Goetz, S.J. 2013. Shifts in Arctic vegetation and associated feedbacks under climate change. *Nature Climate Change*, 3(NA):673–677. doi: 10.1038/NCLIMATE1858.
- Pogrebnyak, P.S. 1929. Über die Methodik der Standortsuntersuchungen in Verbreitung mit Waldtypen [Research methodology for forest site types]. Verh. II Int. Kongr. forstl. Versuchsanstalten [II International Congress of Forest Research Institute]: Stockholm, Sweden.
- Pogrebnyak, P.S. 1955. Osnovy lesnoj typologii [Foundations of forest typology]. Academy of Sciences of the Ukrainian Soviet Socialist Republic: Kiev, Russia.
- Pojar, J., Klinka, K., Meidinger, D. 1987. Terrestrial ecosystem classification in British Columbia. *Forest Ecology and Management*, 22(NA):119–154.
- Ponomarenko, S., Quirouette, J., Sharma, R., McLennan, D.S. 2014. Ecotype Mapping Report for Wapusk National Park. Monitoring and Ecological Information. Natural Resource Conservation. Parks Canada: Gatineau, Quebec.
- Ressources naturelles Québec. 2003a. The Ecological Land Classification Hierarchy. Gouvernement du Québec. Accessed March 2019. <https://mffp.gouv.qc.ca/english/publications/forest/publications/ecological.pdf>.
- Ressources naturelles Québec. 2003b. Vegetation Zones and Bioclimatic Domains in Québec. Gouvernement du Québec. Accessed March 2019. <http://mern.gouv.qc.ca/english/publications/forest/publications/zone-a.pdf>.
- Saucier, J.-P., Bergeron, J.-F., Grondin, P., Robitaille, A. 1998. The Land Regions of Southern Quebec (3rdrd version): One element in the Hierarchical Land Classification System developed by Québec Ministère des Ressources Naturelles du Quebec. Québec Ministère des Ressources Naturelles, L'Aubelle Supplement.

Soil Classification Working Group. 1998. The Canadian system of soil classification – 3rd edition. Agriculture and Agri-Food Canada: Ottawa, Ontario.

Shimwell, D.W. 1971. Description and classification of vegetation. Sidgwick and Jackson: London.

Sukachev, V. 1960. The correlation between the concept 'forest ecosystem' and 'forest biogeocoenose' and their importance for the classification of forest. *Silva Fennica*, 103(NA):94–97.

Sukachev, V., Dylis, N. 1964. Fundamentals of Russian Biogeocoenology. Oliver and Boyd: London.

USNVC. 2016. The U.S. National Vegetation Classification. Accessed March 2019. <http://usnvc.org/>.

Vis-à-vis Management Resources. 2005. A review of the biogeoclimatic ecosystem classification program. Contract report. B.C. Ministry of Forests and Range: Victoria, B.C.

Vorobyov, D.V. 1953. Forest types of the European part of the USSR. Academy of Sciences of the Ukrainian Soviet Socialist Republic: Kiev, Ukraine.

Walker, D.A., Reynolds, M.K. 2011. An International Arctic Vegetation Database: A foundation for pan-Arctic biodiversity studies. Conservation of Arctic Flora and Fauna (CAFF) Strategies Series Report 5. CAFF: Akureyri, Iceland.

Walker, D.A., Alsos, I.G., Bay, C., Boulanger-Lapointe, N., Breen, A.L., Bültmann, H., Christensen, T., Damgaard, C., Daniëls, F.J.A., Hennekens, S., Reynolds, M.K., Le Roux, P.C., Luoto, M., Pellissier, L., Peet, R.K., Schmidt, N.M., Stewart, L., Virtanen, R., Yoccoz, N.G., Wisz, M.S. 2013. Rescuing Valuable Arctic Vegetation Data for Biodiversity Models, Ecosystem Models and a Pan-Arctic Vegetation Classification. *Arctic*, 66(1):133–138.

Wali, M.K. 1988. Reflections on the life, work, and times of Vladimir Joseph Krajina. *Canadian Journal of Botany*, 66(12):2605–2619.

Wang, T., Campbell, E.M., O'Neill, G.A., Aitken, S.N., 2012a. Projecting future distributions of ecosystem climate niches: Uncertainties and management applications. *Forest Ecology and Management*, 279(NA):128–140. Retrieved from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112712003118>.

Wang, T., Hamann, A., Spittlehouse, D., Murdock, T.N. 2012b. Climate WNA—High-resolution spatial climate data for western North America. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(1):16–29. Retrieved from: <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JAMC-D-11-043.1>.

Zhang, Y., Li, J., Wang, X., Chen, W., Sladen, W., Dyke, L., Dredge, L., Poitevin, J., McLennan, D., Stewart, H., Kowalchuk, S., Wu, W., Kershaw, G.P., Brook, R.K. 2012. Modelling and mapping permafrost at high spatial resolution in Wapusk National Park, Hudson Bay Lowlands. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 49(8):925–937. doi:10.1139/E2012-031.

Zhang, Y., Wang, X., Fraser, R., Olthof, I., Chen, W., McLennan, D., Ponomarenko, S., Wu, W. 2013. Modelling and mapping climate change impacts on permafrost at high spatial resolution for an Arctic region with complex terrain. *The Cryosphere*, 7(NA):1121–1137. doi:10.5194/tc-7-1121-2013. Retrieved from: www.the-cryosphere.net/7/1121/2013/.