

Quels sont les facteurs qui facilitent l'implantation du roseau commun (*Phragmites australis*) le long des routes du sud du Québec?¹

Benjamin LELONG, Claude LAVOIE² & Marius THÉRIAULT, Centre de recherche en aménagement et développement, 2325, rue des Bibliothèques, Local 1636, Université Laval, Québec G1V 0A6, Québec, Canada, e-mail: claudelavoie@esad.ulaval.ca

Résumé : En Amérique du Nord, les populations de roseau commun (*Phragmites australis*) ont connu une grande expansion depuis une centaine d'années à la suite de l'introduction d'un génotype eurasiatique très compétitif. Cette invasion biologique constitue un problème environnemental important, car les marais envahis par le roseau deviennent peu propices au maintien d'une flore et d'une faune diversifiées. Le Québec est affecté par ce phénomène depuis le début des années 1960, c'est-à-dire à partir du moment où la propagation du roseau a été facilitée par l'expansion du réseau routier. On connaît toutefois peu de choses sur les structures du paysage qui favorisent la propagation de la plante ou son établissement le long du système routier sillonnant une région. Dans ce travail, nous avons recensé les populations de roseau le long des routes d'une grande région du sud du Québec (1400 km²), puis développé des modèles de régression logistique afin de circonscrire les principaux facteurs qui influencent leur répartition. La hiérarchie de la route est la variable la plus influente des modèles, quel que soit le type de paysage considéré (ouvert ou boisé). Les routes qui traversent des dépôts de surface à mauvais drainage sont également plus susceptibles d'héberger du roseau que les routes qui traversent des dépôts à drainage rapide. Ainsi, plus une route est importante (largeur, entretien, trafic routier), plus la probabilité d'y trouver du roseau sur ses berges ou dans ses fossés de drainage est élevée, particulièrement lorsqu'elle est située sur des dépôts de surface mal drainés. Cette étude montre aussi que l'emprise d'une route large reçoit davantage d'énergie lumineuse, ce qui favorise d'autant une espèce héliophile comme le roseau. L'influence négative d'un boisé sur le roseau (son ombrage) est donc minimisée lorsqu'il est traversé par une route large. Une stratégie qui pourrait être efficace pour empêcher le roseau de se propager davantage le long des routes serait donc de limiter le plus possible son accès à la lumière, soit en maintenant des lisières boisées en bordure des axes routiers, soit en favorisant la plantation d'arbustes compétitifs près des fossés de drainage.

Mots-clés : écologie du paysage, lumière, modèle de régression logistique, *Phragmites australis*, roseau commun, route.

Abstract: During the last century, the common reed (*Phragmites australis*) has spread through the North American continent following the introduction of a competitive Eurasian genotype. This invasion is problematic because marshes invaded by the common reed do not conserve a diverse flora and fauna. The southern part of the province of Quebec is also invaded by the common reed, but especially since the 1960s, *i.e.*, since the beginning of the development of its highway system. There is very little information about landscape characteristics facilitating the establishment and spread of the common reed along roads. In this study, we mapped the common reed populations located along roads of a large region (1400 km²) of southern Quebec. Logistic regression models were performed to identify the main factors influencing the common reed. The road type is the most important variable of the models in agricultural or forest landscapes. Road ditches located on surface deposits with low drainage capacity (organic or clay) are more heavily invaded by the common reed than those located on rock, till or sand deposits. Consequently, a major road (national or regional) is more likely to be invaded by the common reed than a local road, especially if the road is located on organic or clay surface deposits. This study also shows that a large road receives more light energy than a narrow road, which favours a heliophilous plant like the common reed. The spread of the common reed along roads could be controlled by the use of shade structures (trees or shrubs planted along roads) which compete with the invasive plant for light.

Keywords: common reed, landscape ecology, light, logistic regression model, *Phragmites australis*, road.

Nomenclature : Marie-Victorin, 1995.

Introduction

Les efforts déployés récemment par les chercheurs dans les domaines de l'écologie du paysage et de l'écologie des invasions ont permis de mieux comprendre les mécanismes de dissémination des espèces envahissantes au sein des écosystèmes (Kolar & Lodge, 2001; With, 2002; Richardson & Pyšek, 2006). Malgré cela, les invasions par des espè-

ces végétales restent difficiles à expliquer étant donné les interactions complexes qui existent, d'une part, entre les espèces envahissantes et leurs compétiteurs ou ennemis potentiels et, d'autre part, entre les envahisseurs et les facteurs abiotiques de l'environnement dans lequel ils prolifèrent. Quelques modèles statistiques récents sont néanmoins parvenus à identifier les facteurs environnementaux qui ont une certaine influence sur la répartition spatiale d'un, voire de plusieurs envahisseurs (Charbonneau & Fahrig, 2004; Foxcroft *et al.*, 2004; Deckers *et al.*, 2005; Stephenson *et al.*, 2006; Jodoin *et al.*, 2008). Cela dit, beaucoup reste

¹Rec. 2008-11-10; acc. 2009-03-30.

Associate Editor: Patrick Nantel.

²Author for correspondence.

DOI 10.2980/16-2-3237

à faire dans ce domaine, notamment pour développer des modèles applicables à plusieurs espèces.

Le roseau commun (*Phragmites australis*; Poaceae) est l'une des espèces végétales pour lesquelles le développement de modèles prédictifs de répartition spatiale serait particulièrement pertinent, car il s'agit de l'une des plantes les plus envahissantes du continent nord-américain. Le roseau est une espèce héliophile qui colonise principalement les milieux humides ou les plaines inondables. Il est cependant plus résistant à la sécheresse que la plupart des autres plantes de marais (Chambers *et al.*, 2003; Hudon, Gagnon & Jean, 2005; Pagter, Bragato & Brix, 2005), ce qui lui permet de coloniser aussi des milieux plus secs. Le roseau a toujours été présent en Amérique du Nord, mais jusqu'au début du 20^e siècle, il n'était pas particulièrement abondant (Orson, 1999). Ce n'est que par la suite que le roseau s'est rapidement répandu dans les marais d'eau douce (Wilcox *et al.*, 2003; Hudon, Gagnon & Jean, 2005), d'eau saumâtre (Windham & Lathrop, 1999; Meyerson *et al.*, 2000; Minchinton & Bertness, 2003; Philipp & Field, 2005) et d'eau salée (Burdick, Buchsbaum & Holt, 2001; Bart & Hartman, 2003). Cette invasion coïncide avec l'introduction d'un génotype eurasiatique de roseau (haplotype M) dans plusieurs ports de l'Atlantique vers le milieu du 19^e siècle, génotype qui s'est par la suite rapidement répandu dans tout le continent (Saltonstall, 2002). Les invasions de l'haplotype M du roseau ont souvent des conséquences négatives sur la diversité des plantes et animaux des marais et peuvent modifier de manière significative les fonctions écologiques des terres humides (Keller, 2000; Meyerson *et al.*, 2000; Rooth, Stevenson & Cornwall, 2003; Windham & Meyerson, 2003; Mal & Narine, 2004; Silliman & Bertness, 2004; Minchinton, Simpson & Bertness, 2006).

L'haplotype M du roseau commun a été introduit au Québec (c'est-à-dire à la limite nord-est de la répartition de l'espèce sur le continent nord-américain) vers 1916 près du fleuve Saint-Laurent. Il s'est ensuite répandu au sein du paysage québécois à partir des années 1960 à la suite du développement et de l'amélioration (pavage) du réseau routier de la province (Lelong *et al.*, 2007). Le réseau routier semble en effet avoir joué un rôle important dans la propagation de l'envahisseur en agissant comme corridor de dissémination et comme habitat propice à l'établissement et à l'expansion des populations de roseau (Lelong *et al.*, 2007; Maheu-Giroux & de Blois, 2007; Jodoin *et al.*, 2008). Les fossés de drainage bordant les routes forment de véritables milieux humides linéaires propices à la croissance du roseau, d'autant plus qu'au Québec, les fossés reçoivent une grande quantité de sels de déglacage acheminés par les eaux de fonte de la neige et de la glace (Jodoin *et al.*, 2008). Or, l'haplotype M du roseau est particulièrement compétitif en présence de sel (Vasquez *et al.*, 2005).

Si on connaît relativement bien quels sont les principaux corridors de dissémination qu'utilise l'haplotype M du roseau commun (les rivières et, surtout, les routes), on sait peu de choses sur les structures du paysage qui favorisent la propagation ou l'établissement du roseau le long du système routier sillonnant une région. Le roseau est certes très abondant en bordure des routes, mais il n'y en a pas partout; certains tronçons routiers sont totalement dénués de roseau.

En l'occurrence, quels sont les facteurs environnementaux qui facilitent ou qui freinent la dissémination du roseau le long des fossés bordant les routes? Dans ce travail, nous testerons l'hypothèse selon laquelle les routes d'un paysage seront d'autant plus envahies par l'haplotype M du roseau qu'on trouvera dans ce paysage abondance de structures favorisant un grand ensoleillement, le roseau étant très peu tolérant à l'ombre (Haslam, 1972). De manière plus précise, le roseau devrait être plus abondant le long des routes d'un paysage déboisé (champs agricoles) que dans celles traversant un paysage forestier. Les routes très larges traversant des boisés devraient aussi être plus envahies par le roseau que les routes étroites, car plus ensoleillées. Par contre, la largeur de la route ou son orientation ne devraient pas avoir une grande influence en milieu agricole puisqu'aucun arbre n'y obstrue la lumière.

Méthodes

AIRE D'ÉTUDE

L'aire d'étude (Figure 1) qui a été utilisée pour tester les hypothèses de ce travail correspond à la MRC (municipalité régionale de comté) du Haut-Saint-Laurent et est située au sud-ouest de la province du Québec (Canada), près de Montréal, c'est-à-dire là où une bonne partie des berges et des fossés de drainage des routes est envahie par le roseau commun (Jodoin *et al.*, 2008). Elle est délimitée au sud par la frontière avec l'état de New York (États-Unis), au nord et à l'ouest par le fleuve Saint-Laurent et à l'est par les routes régionales 205 et 219. La superficie totale de l'aire d'étude est de 1400 km². On trouve dans la plaine bordant le fleuve Saint-Laurent un paysage plus ou moins homogène dominé par l'agriculture, avec ça et là quelques parcelles forestières ou tourbeuses (Bouchard & Domon, 1997). Ces parcelles couvrent environ 17 % de la superficie de la plaine. Près de la frontière américaine, le paysage est plus hétérogène, plus vallonné et dominé par les boisés (60 % de la superficie). Un important réseau de routes (longueur totale : 1180 km) est présent au sein de l'aire d'étude. Le réseau routier est particulièrement diversifié : 9 % de la longueur totale du réseau est constitué de routes nationales pavées (routes 132 et 138), 21 % de routes régionales pavées (routes 201, 202, 203, 205, 209, 219 et 236), 64 % de routes locales pavées et 6 % de routes locales non pavées (Figure 1). Environ 18 % de la longueur totale du réseau routier traverse des boisés. Les dépôts de surface (Figure 2) sont assez variés au sein de l'aire d'étude (Tremblay, Lamothe & Hardy, 2005). Les dépôts meubles de l'ancienne mer de Champlain (argiles marines) se trouvent coincés entre des dépôts meubles de l'ancien lac Lampsilis (sédiments fins lacustres et sédiments littoraux plus grossiers) et des dépôts meubles glaciaires (tills bien drainés).

CARTOGRAPHIE DU ROSEAU COMMUN

Nous avons effectué la cartographie des populations de roseau commun présentes le long de toutes les routes de l'aire d'étude à la fin juillet – début août des étés 2004 et 2005. Sur le territoire québécois, la quasi-totalité (95–99 %) des populations de roseau en bordure des routes est exotique (haplotype M; Lelong *et al.*, 2007; Jodoin *et al.*, 2008). Les populations de roseau ont été détectées par une équipe de 3 personnes circulant dans un véhicule roulant à une vitesse

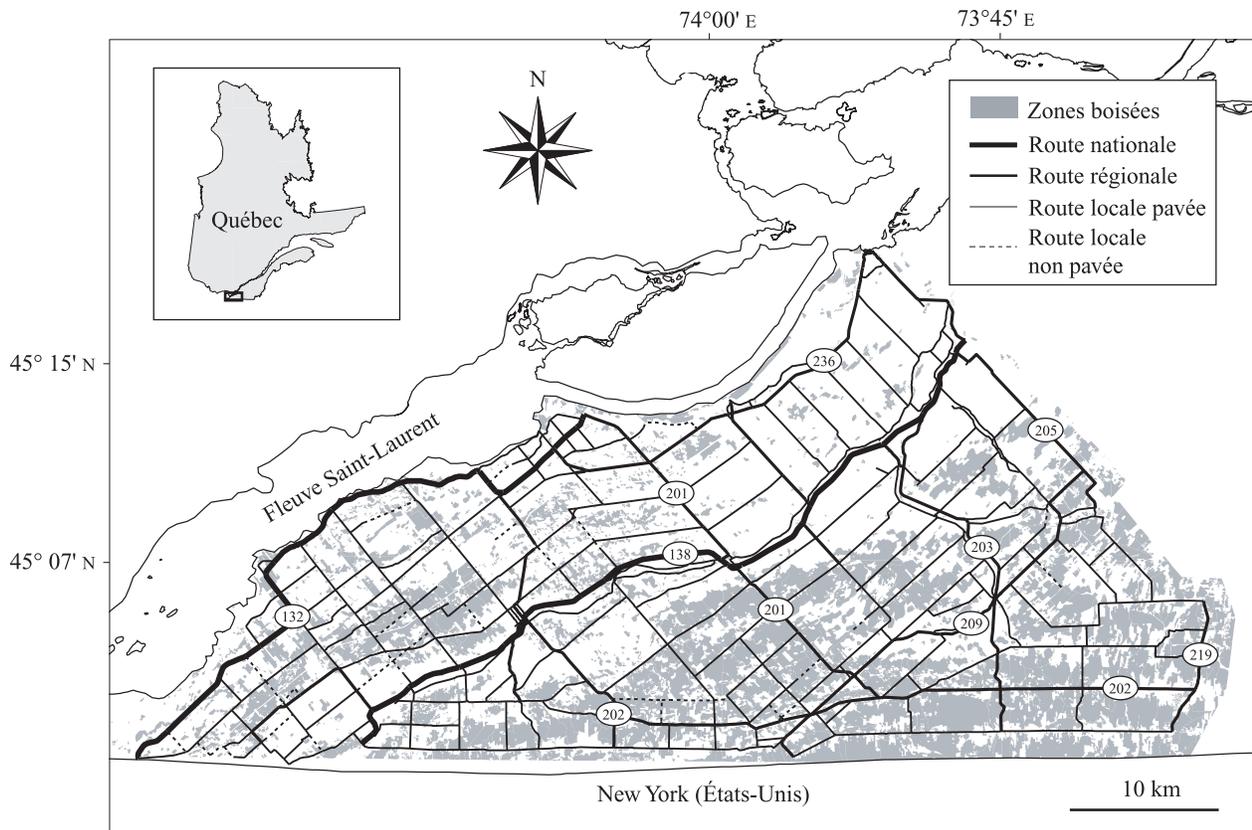


FIGURE 1. Carte de l'aire d'étude qui correspond à peu près au territoire couvert par la municipalité régionale de comté (MRC) du Haut-Saint-Laurent (Québec, Canada). Le type de route est indiqué, ainsi que leur numéro pour les routes nationales et régionales. Les zones boisées sont aussi illustrées.

inférieure à $80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. La première personne se concentrait uniquement sur la conduite du véhicule. La seconde repérait à l'œil les populations de roseau des 2 côtés de la route et la troisième manipulait le système de positionnement géographique (SPG) nécessaire à l'enregistrement des données. Le SPG utilisé avait une précision d'environ 5 m.

Lorsque le véhicule passait devant une population, l'observateur signalait à la personne en charge du SPG sa présence. Une coordonnée géographique était alors enregistrée par le SPG. En présence d'une population très étendue, la personne en charge du SPG enregistrait une coordonnée à toutes les secondes, et ce, tant et aussi longtemps que le véhicule défilait devant la population. La présence de la population était donc enregistrée à plusieurs reprises, mais en des endroits distincts, puisque le véhicule était en mouvement. Toutes les coordonnées géographiques de roseaux recensées sur le terrain ont été transférées dans un système d'information géographique (SIG), soit dans le logiciel MapInfo Professional® (MapInfo Corporation, 2005).

Puisque le véhicule ne pouvait pas toujours rouler à vitesse constante et que le temps de réaction de l'observateur et de la personne en charge du SPG était variable, nous avons procédé à une uniformisation des coordonnées géographiques enregistrées sur le terrain en créant une base de données à espacement systématique. Pour générer cette base de données, nous avons d'abord calculé la valeur médiane de la distribution des distances entre les points de présence du roseau commun enregistrés sur le terrain

(26 m). La médiane a été préférée à la moyenne car cette statistique est moins influencée par les valeurs extrêmes. Par la suite, des points de référence ont été systématiquement générés de manière automatique à tous les 26 m le long de toutes les routes dans le SIG ($N = 45\,299$). Une zone d'influence de 13 m (soit la moitié de la valeur médiane de 26 m) a été créée autour de chaque point de référence et de chaque point de présence du roseau. Lorsqu'il y avait superposition des 2 types de zone d'influence, alors une valeur de présence de roseau était attribuée au point de référence. Dans le cas contraire, une valeur d'absence était plutôt attribuée.

VARIABLES POUVANT EXPLIQUER LA PRÉSENCE DU ROSEAU COMMUN

Pour développer un modèle expliquant la présence du roseau commun le long des routes, nous avons créé des variables indépendantes dans le SIG à l'aide de cartes topographiques numériques au 1:50 000 (Géomatique Canada, 2003) et d'une carte numérique des dépôts de surface au 1:100 000 (Tremblay, Lamothe & Hardy, 2005). La première variable créée fut la hiérarchie de la route. Les routes ont été classées par ordre d'importance (route nationale pavée, ou route "100", route régionale pavée, ou route "200", route locale pavée, route locale non pavée) en suivant la classification du Ministère des Transports du Québec (2004). Dans les faits, plus une route est importante, plus son emprise (chaussée, accotements, fossés et berges) est large, et donc

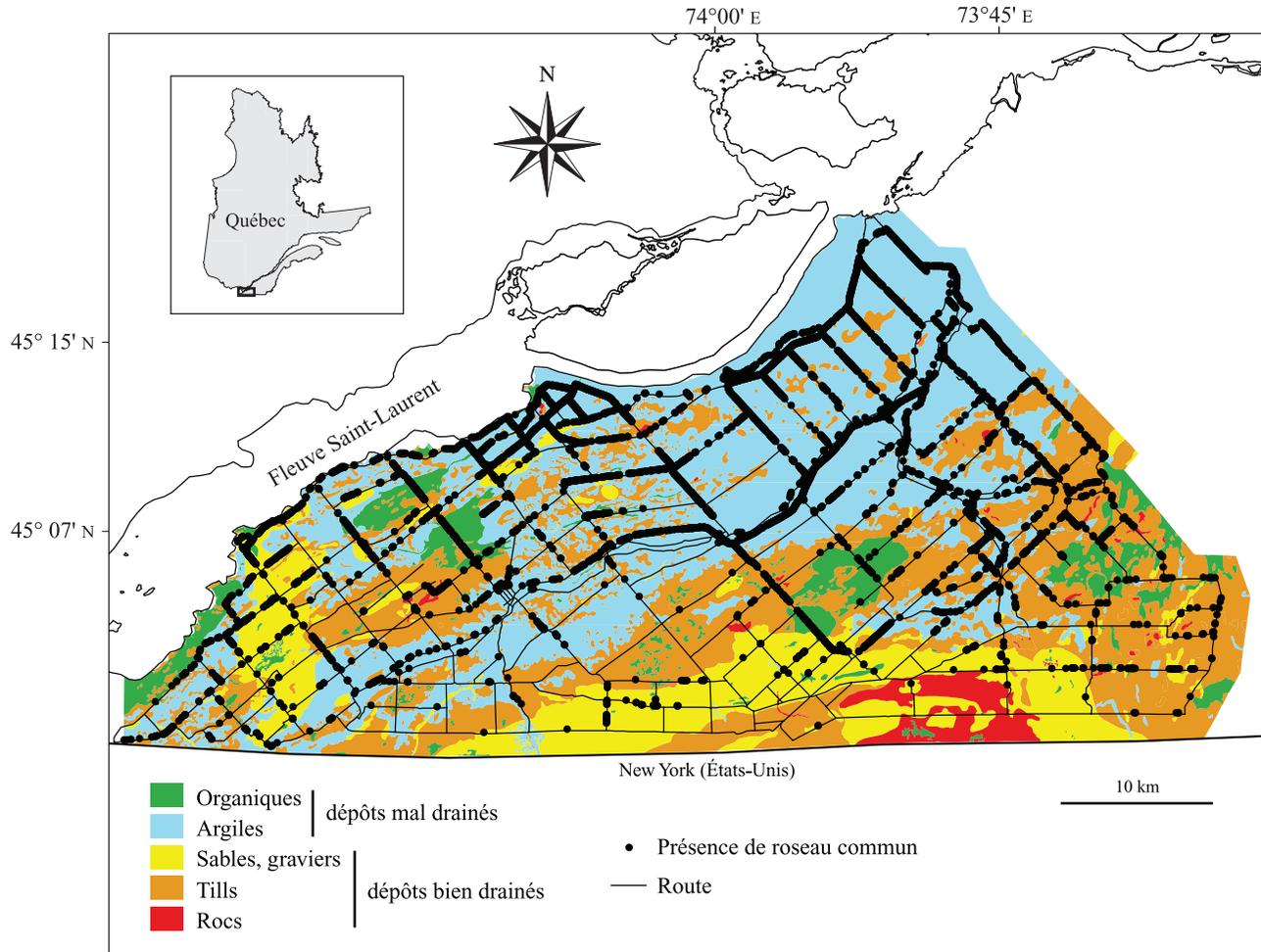


FIGURE 2. Carte des dépôts de surface de l'aire d'étude (adaptée de Tremblay, Lamothe & Hardy, 2005), située dans la municipalité régionale de comté (MRC) du Haut-Saint-Laurent (Québec, Canada). Les points de présence du roseau commun le long des routes sont indiqués.

ensoleillée. Dans la région d'étude, les emprises des routes nationales ont une largeur moyenne de 34 m. Elle est de 22 m pour les routes régionales et de 17 m pour les routes locales (B. Gagnon, Ministère des Transports du Québec, comm. pers.). Comme la circulation est plus intense sur les routes nationales, on y épand aussi davantage de sels de déglacage en hiver. Par exemple, dans la région d'étude, 26 tonnes de sel par kilomètre sont épandues chaque hiver sur les routes nationales et 16 tonnes sur les routes régionales. Au Québec, l'épandage hivernal de sel est dicté par le débit journalier moyen des véhicules, et peut varier de 3 tonnes de sel (par kilomètre) pour les routes où circulent moins de 500 véhicules par jour à 69 tonnes pour les routes avec débit journalier supérieur à 75 000 véhicules (B. Gagnon, Ministère des Transports du Québec, comm. pers.).

La deuxième variable créée fut l'orientation de la route. Tous les segments de route ont été classés en fonction de l'orientation de leur axe, plus ou moins $22,5^\circ$ (nord – sud, est – ouest, nord-ouest – sud-est et nord-est – sud-ouest). Ce facteur peut avoir une influence sur la luminosité car en milieu boisé, la durée et la quantité de l'ombre portée dépendent principalement de la hauteur de l'écran (les arbres) et de l'orientation de la trouée linéaire formée par la route (Bogren, 1991).

La troisième variable créée fut la variable caractérisant l'ouverture du paysage traversé par la route. Elle comprend 3 catégories, soit le paysage 1) ouvert (route bordée de part et d'autre de champs cultivés, de pâturages ou de jeunes friches), 2) semi-ouvert (route bordée d'un champ cultivé, d'un pâturage ou d'une jeune friche d'un côté et d'un boisé de l'autre) ou 3) fermé (route bordée de boisés de part et d'autre).

Enfin, la quatrième et dernière variable créée fut le drainage des dépôts de surface traversés par les routes. Les dépôts présents dans l'aire d'étude ont été répartis dans 2 catégories de drainage (dépôts bien drainés ou mal drainés) en fonction d'une classification proposée par Robitaille et Allard (1996) et Tremblay, Lamothe et Hardy (2005). Les dépôts bien drainés comprennent les dépôts minéraux à texture grossière (sables, graviers), les tills et les rocs. Les dépôts mal drainés comprennent les dépôts organiques et les dépôts minéraux à texture fine (argiles).

ANALYSE STATISTIQUE DES DONNÉES

Pour expliquer la répartition du roseau commun le long des routes du Haut-Saint-Laurent, nous avons élaboré des modèles de régression logistique binaire (Hosmer & Lemeshow, 2000). La variable dépendante utilisée dans

les modèles est en effet binaire (présence ou absence du roseau). Les variables explicatives sont pour leur part nominales catégorielles (hiérarchie de la route, orientation de la route, ouverture du paysage) ou binaire (drainage des dépôts de surface).

L'autocorrélation spatiale doit être prise en considération dans les modèles de régression afin de vérifier le postulat d'indépendance des observations (Smith, 1994). L'indice I de Moran, un indicateur de l'autocorrélation spatiale, a été calculé à l'aide du module MapStat® du SIG MapInfo Professional® (Thériault, 2006). L'indice I de Moran a montré un fort degré d'autocorrélation spatiale entre les points de présence ou d'absence du roseau commun dans le Haut-Saint-Laurent (I de Moran moyen de 0,430; Figure 3), ce qui n'étonne guère compte tenu du mode de propagation végétatif (rhizomes, stolons) qui est prépondérant à l'échelle locale chez cette espèce (Mal & Narine, 2004). Afin de minimiser les perturbations associées à l'autocorrélation spatiale lors du test de signification du coefficient de régression logistique, nous nous sommes servis de la technique du *bootstrap* (Efron, 1979). Nous avons, dans un premier temps, sous-échantillonné la base de données ($N = 45\ 299$) en tirant au hasard un échantillon de très petit effectif (5 % des points de la base de données; $n = 2\ 265$). L'autocorrélation spatiale dans ce sous-échantillon est plus faible (I de Moran moyen de 0,396 pour une portée de 500 m; Figure 3) car il est moins probable d'y trouver 2 points identiques en terme de présence-absence qui se voient, donc qui sont séparés par une distance de 26 m. Dans un deuxième temps, nous avons effectué une régression logistique binaire avec ce sous-échantillon pour circonscrire les variables explicatives. Afin de palier la perte d'information générée par l'utilisation d'un sous-échantillon de taille réduite, la même opération a été répétée 1 000 fois, avec remise du sous-échantillon précédemment utilisé dans la base de données à chaque opération. Cela a notamment permis d'estimer la distribution d'échantillonnage de chaque coefficient de régression logistique.

Dans un troisième temps, nous avons déterminé la distribution d'échantillonnage des données résultant des 1 000 régressions logistiques binaires. Nous avons donc élaboré un premier modèle de régression logistique binaire global avec la méthode du *bootstrap* afin d'obtenir des coefficients de régression logistique (B) avec moindre biais dû à l'autocorrélation spatiale des données locales et pour lesquels l'ajustement selon le test d'Hosmer et Lemeshow (2000) est amélioré. Nous avons également calculé les rapports de cote qui sont en lien direct avec la probabilité d'observer du roseau commun dans la catégorie d'une variable spécifique comparée à une catégorie de référence. Si le rapport de cote est plus grand que 1, la probabilité d'observer du roseau dans la catégorie spécifique est plus élevée que celle associée à la catégorie de référence. Si au contraire le rapport de cote est plus petit que 1, la probabilité associée à la catégorie spécifique est inférieure à celle de la catégorie de référence. Pour identifier la catégorie de référence des variables explicatives nominales de ce modèle, nous avons utilisé la méthode de contraste par déviation car elle permet de déterminer l'effet d'une catégorie particulière par rapport

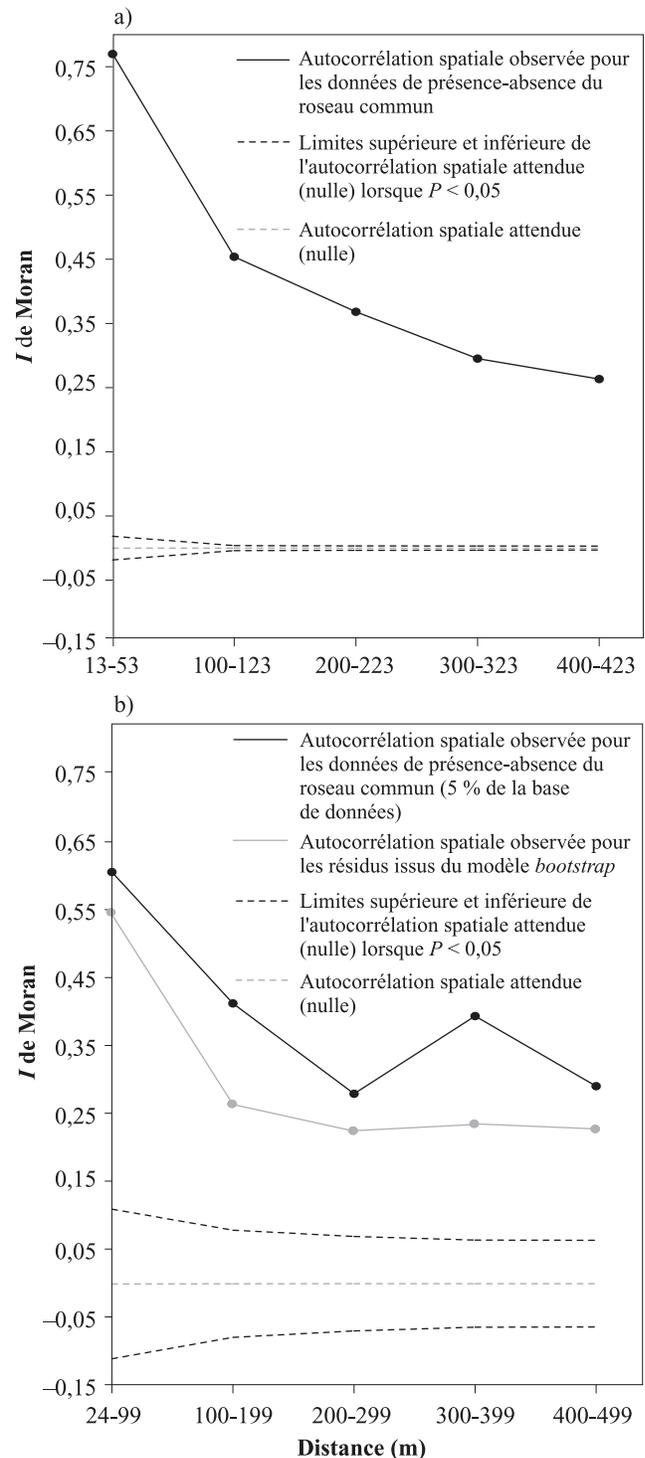


FIGURE 3. Corrélogrammes d'autocorrélation spatiale présentant les valeurs de l'indice I de Moran par intervalle de distance pour a) toutes les observations de présence ou d'absence du roseau commun ($N = 45\ 299$) dans la municipalité régionale de comté (MRC) du Haut-Saint-Laurent (Québec, Canada) et pour b) un sous-échantillon de 5 % de la base de données issu du modèle avec *bootstrap* ($n = 2\ 265$), ainsi que pour les résidus centrés-réduits issus du modèle avec *bootstrap*.

à l'effet global des autres catégories d'une variable explicative, ce qui facilite beaucoup l'interprétation des résultats (Menard, 1995).

Afin de préciser les effets des variables explicatives sur la variable dépendante selon l'ouverture du milieu, nous avons effectué 2 autres modèles de régression logistique binaire, l'un ne prenant en compte que les observations situées dans les milieux ouverts et l'autre que les observations situées dans les milieux fermés. Afin de simplifier l'interprétation de ces modèles, les points de présence ou d'absence du roseau commun avec paysage semi-ouvert ont donc été exclus. De plus, toujours dans un souci de simplification, la variable catégorielle "hiérarchie de la route" a été transformée en variable binaire. On a donc formé un groupe avec les routes nationales et régionales, et un autre groupe avec les routes locales pavées et non pavées. Le modèle de présence-absence du roseau dans les milieux ouverts ayant un nombre d'observations très élevé ($n = 33\ 546$), nous avons pu utiliser la technique du *bootstrap* pour effectuer les analyses (sous-échantillons avec 5 % de la base de données; $n = 1\ 677$). Le modèle de présence-absence du roseau dans les milieux fermés a pour sa part été élaboré sans *bootstrap*, donc avec la totalité des observations ($n = 3\ 379$). Le faible effectif de quelques combinaisons de catégories ne permettait pas, en effet, l'utilisation de cette procédure statistique. Enfin, de manière à mesurer un éventuel effet marginal combiné de la hiérarchie et de l'orientation de la route (2 facteurs qui influencent l'ensoleillement des fossés de drainage en milieu fermé), nous avons ajouté dans le modèle une variable explicative d'interaction obtenue par le produit des 2 attributs.

Pour faciliter l'interprétation des résultats, nous nous sommes servis des 2 derniers modèles (ceux effectués avec les données issues des milieux ouverts et des milieux fermés) pour construire des tableaux croisés présentant les rapports de cote des différentes combinaisons de catégorie possibles. Pour spécifier la catégorie de référence de chaque variable explicative nominale de ces 2 modèles, nous avons utilisé la technique de contraste par indicateur car elle permet de calculer l'effet de chaque catégorie par rapport à l'effet de la catégorie de référence, ce qui facilite la réalisation des tableaux croisés des rapports de cote combinés (Hosmer & Lemeshow, 2000). Tous les modèles de régression logistique ont été effectués à l'aide du logiciel SPSS® (SPSS Inc., 2004).

MODÉLISATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE DIRECT JOURNALIER SUR UN PLAN NORMAL

Pour tester l'hypothèse selon laquelle les routes d'un paysage sont d'autant plus envahies par le roseau commun qu'elles sont ensoleillées, nous avons mesuré non seulement la présence du roseau au sein des fossés de drainage bordant les routes de l'aire d'étude, mais aussi produit un indice d'énergie lumineuse disponible. Cet indice a permis de modéliser l'effet des ombres portées par les arbres d'un boisé bordant une route sur l'énergie lumineuse disponible pour les roseaux situés dans les fossés de drainage adjacents à la route et au boisé. Seules les routes traversant les boisés ont été jugées pertinentes pour cette modélisation puisque le rayonnement solaire ne devrait pas varier beaucoup en milieu ouvert quelque soit le type de route ou son orientation en raison de l'absence d'écran (arbres). La modélisation du rayonnement solaire a été effectuée pour chacun des

2 côtés de la route, puisqu'il peut être très différent de part et d'autre du chemin selon l'orientation de ce dernier.

Nous avons modélisé l'effet des ombres portées sur le roseau commun en calculant la quantité d'énergie solaire qui atteint directement la plante (rayonnement solaire direct en $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{j}^{-1}$) avec un pas de temps de 30 min, du lever au coucher du soleil, pour le cas particulier de la MRC du Haut-Saint-Laurent. La simulation a été effectuée pour le 15 mai, le 15 juin, le 15 juillet et le 15 août, ce qui couvre l'essentiel de la saison de croissance du roseau. Nous avons également considéré que la surface de réception (les feuilles de roseau) était optimale (c'est-à-dire perpendiculaire) aux rayons du soleil, afin d'estimer la capacité de production photosynthétique maximale théorique pour la plante. Le modèle, issu d'une série de formules présentées dans les paragraphes qui suivent, a été constitué à partir de l'ouvrage d'Hufty et Thériault (1983).

À un instant donné, le rayonnement solaire direct atteignant le sol par beau temps (ciel sans nuage) sur une surface normale (perpendiculaire) aux rayons (E_0 : exprimé en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) est fonction de l'énergie reçue au sommet de l'atmosphère (E_s) et de la transmission atmosphérique (θ^m), c'est-à-dire de la proportion d'énergie qui arrive à traverser l'atmosphère (Équation 1). L'énergie disponible sur la normale au sommet de l'atmosphère (E_s) dépend de 2 facteurs astronomiques (Équation 2), soit la distance Terre - Soleil sur le plan de l'écliptique (R : rayon vecteur; 1,01138 radians pour le 15 mai, 1,01589 radians pour le 15 juin, 1,01632 radians pour le 15 juillet et 1,01237 radians pour le 15 août) et la constante solaire (I_s : $1\ 353\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$).

$$E_0 = E_s \theta^m \quad [1]$$

$$E_s = I_s R^{-2} \quad [2]$$

Lors de sa traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire direct est affaibli par absorption et diffusion sur les molécules gazeuses et les particules atmosphériques. La transmission atmosphérique totale (θ^m) dépend donc de plusieurs facteurs (Équation 3). Il y a d'abord la masse d'air optique (m), qui correspond au trajet parcouru par les photons avant de parvenir au sol. Ce trajet est plus long au lever ou au coucher du soleil et plus court à midi. La masse d'air varie selon la hauteur du soleil (h , en radians). Elle est établie pour une pression au sol de 1 000 mb (niveau de la mer), et il faut la corriger pour une altitude plus élevée (Équation 4). On a considéré ici que le sol de l'aire d'étude était situé à une altitude moyenne (H) de 100 m. La transmission atmosphérique dépend aussi du facteur total d'extinction (k) d'une atmosphère pure et sèche (Équation 5) pour la masse d'air unitaire (affaiblissement lié aux molécules d'air) et du facteur de turbidité (T) estimé en fonction (Équation 6) du coefficient de trouble (β ; dépend de la quantité de poussière dans l'atmosphère - 0,10 pour le 15 mai, 0,09 pour le 15 juin, 0,08 pour le 15 juillet et 0,07 pour le 15 août - et de l'épaisseur d'eau condensable dans l'atmosphère - W ; 0,8 cm pour le 15 mai, 1,1 cm pour le 15 juin, 1,4 cm pour le 15 juillet et 1,3 cm pour le 15 août). L'effet de ces 3 paramètres est fortement dépendant de la hauteur du soleil (h , qui est exprimée en degrés dans l'Équation 6 et en radians ailleurs).

$$\theta^m = e^{-Tkm} \tag{3}$$

$$m = \left(1 - 0,1 \frac{H}{1000}\right) \left\{ \frac{1}{\sinh + 0,15(h + 3,885)^{-1,253}} \right\} \tag{4}$$

$$k = 0,024 + 0,01e^{(-0,0647m + 0,7653)} \tag{5}$$

$$T = \left\{ \frac{h + 85}{39,5e^{-W} + 47,4} + 0,1 \right\} + (16 + 0,22W)\beta \tag{6}$$

La hauteur angulaire du soleil (h) au-dessus de l'horizon (Équation 7) est fonction pour sa part de la latitude du lieu (ϕ ; $45,10^\circ$ N pour l'aire d'étude), de la déclinaison du soleil (δ , qui varie selon la date : $18,91^\circ$ pour le 15 mai, $23,08^\circ$ pour le 15 juin, $21,11^\circ$ pour le 15 juillet et $13,57^\circ$ pour le 15 août) et de l'heure solaire (angle horaire : ω ; 15° par heure, 0 à midi).

$$\sin h = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega \tag{7}$$

Pour obtenir des valeurs journalières de rayonnement solaire (en $J \cdot m^{-2} \cdot j^{-1}$), il suffit de cumuler les valeurs instantanées calculées depuis le lever jusqu'au coucher du soleil. Comme mentionné auparavant, nous avons calculé les valeurs instantanées par intervalle de 30 min (1800 s). L'Équation 1 a été utilisée pour calculer une valeur instantanée ($W \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) pour chaque intervalle de 30 min. L'énergie

reçue pour une période de 30 min a été convertie en joules ($1 J = 1 W \cdot s^{-1}$) en multipliant le tout par 1800 ($J \cdot m^{-2}$ par 30 min). Nous avons ensuite fait la sommation des valeurs des périodes successives pour obtenir le total quotidien ($J \cdot m^{-2} \cdot j^{-1}$).

Le modèle de rayonnement solaire des routes situées en milieu fermé doit tenir compte des effets de masque liés à la présence des arbres. Pour cela, il faut connaître, pour chaque moment de la journée et selon l'orientation de la route, la hauteur angulaire du soleil par rapport à l'horizon (h) et la hauteur angulaire des arbres par rapport à l'horizon (a) en regardant dans la direction du soleil. Ainsi, si le soleil est situé plus haut que les arbres, le rayonnement solaire ne sera pas masqué par ces derniers et va atteindre le sol; à l'inverse, si le soleil est situé plus bas que les arbres, le rayonnement solaire sera masqué par le feuillage.

La hauteur angulaire des arbres par rapport à l'horizon (Équation 8) est fonction de la hauteur moyenne des arbres de l'aire d'étude (AB , estimée à 15 m en moyenne pour le Haut-Saint-Laurent; J. Brisson, Institut de recherche en biologie végétale de l'Université de Montréal, comm. pers.) et de la longueur du segment BC (Équation 9; Figure 4). Le segment BC correspond à l'hypoténuse du triangle rectangle BCD qui pointe dans la direction azimutale du soleil (As). Cette hypoténuse diffère en fonction de l'orientation de la route et de la distance perpendiculaire

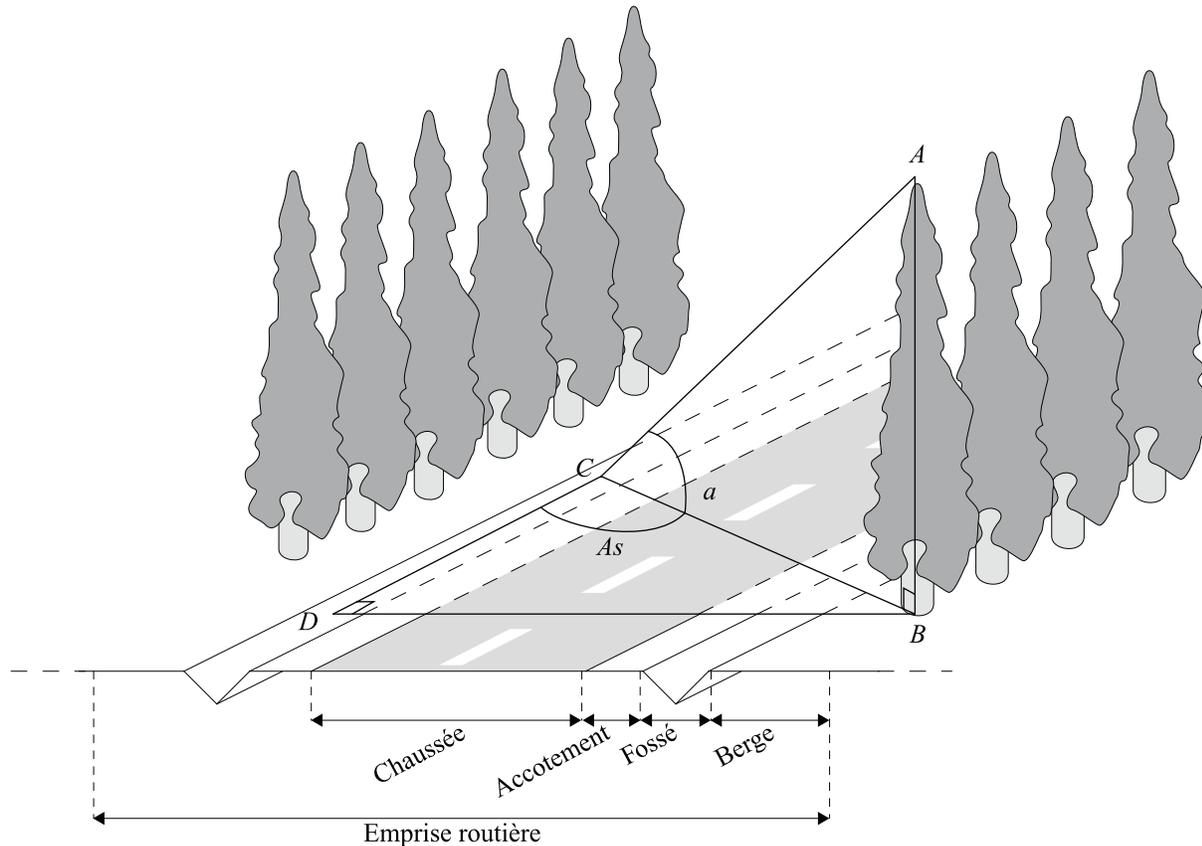


FIGURE 4. Schéma illustrant, dans les 3 dimensions, un tronçon de route situé en milieu boisé. Le point C correspond à un endroit précis situé dans un des 2 fossés de drainage de la route. L'angle a est la hauteur angulaire des arbres par rapport à l'horizon. L'angle As est la direction azimutale du soleil. Le segment AB correspond à la hauteur des arbres composant la lisière du boisé. Le segment BC correspond à la distance séparant les arbres du fossé où se trouve le point C dans la direction du soleil. Le segment BD correspond pour sa part à la distance perpendiculaire entre le centre du fossé et la lisière du boisé.

séparant les arbres du roseau commun qui se trouve dans le fossé de drainage (*BD*).

$$a = \tan^{-1}\left(\frac{AB}{CD}\right) \quad [8]$$

$$BC = \left| \frac{AB}{\sin As} \right| \quad [9]$$

La direction azimutale du soleil varie en fonction de la déclinaison, de la hauteur angulaire du soleil, de l'angle horaire et de la latitude (Équation 10). Comme le résultat est exprimé en angle (en degrés) depuis la direction sud (qui correspond à 0°), on doit l'ajuster par rotation pour tenir compte de l'axe de la route afin de modéliser les ombrages sur les routes nord-est – sud-ouest et sud-est – nord-ouest (± 45°), ou encore est – ouest (−90°).

$$\cos As = \frac{\cos \delta \cos \omega - \sin h \cos \phi}{\cosh \sin \phi} \quad [10]$$

Dans les modèles, la distance *BD* varie en fonction de la largeur de la route (route étroite ou route large) et du côté de la route considéré (exposé ou ombragé). Pour une route étroite (locale), nous avons considéré une emprise d'une largeur totale de 17 m avec une chaussée de 7 m de large (située au centre). La largeur de l'accotement et celle de chacun des fossés de drainage des routes étroites était de 1 m. Ainsi, selon le côté considéré (ombragé ou exposé), la distance *BD* variait entre 3,5 et 13,5 m, toujours selon la position du soleil, en assumant bien sûr que le roseau commun hypothétique se trouvait dans le fond du fossé. Pour une route large (nationale ou régionale), nous avons utilisé

une emprise de 28 m avec une chaussée de 9 m de large. La largeur de l'accotement et celle de chacun des fossés de drainage des routes larges étaient de 2 m. Ainsi, selon les circonstances, la distance *BD* variait entre 6,5 et 21,5 m.

Résultats

Le roseau commun est très présent le long des routes du Haut-Saint-Laurent (Figure 2). Il est cependant plus abondant dans le nord-ouest de la région, c'est-à-dire dans la plaine bordant le fleuve Saint-Laurent, un secteur dominé par l'agriculture. Dans le sud, c'est-à-dire près de la frontière avec les États-Unis, et donc là où le relief s'accroît et où l'agriculture est moins répandue, les populations de roseau sont beaucoup moins abondantes.

PRÉSENCE-ABSENCE DU ROSEAU COMMUN DANS LA MRC DU HAUT-SAINT-LAURENT

Le modèle de régression logistique obtenu par la technique du *bootstrap* (Tableau I) est significatif ($P < 0,001$) et explique environ 18 % de la répartition du roseau commun dans la MRC du Haut-Saint-Laurent (R^2 de Nagelkerke = 0,183). Ce modèle est bien ajusté aux données puisque le test d'Hosmer et Lemeshow (2000) est non significatif ($P = 0,167$). De plus, le corrélogramme (Figure 3) montre que l'autocorrélation spatiale des résidus centrés-réduits est plus faible que celle de la présence-absence du roseau (I de Moran moyen respectivement de 0,301 et de 0,396 pour une portée de 500 m). Même si la technique du *bootstrap* n'élimine pas totalement l'autocorrélation spatiale et que cette dernière demeure très significative, le modèle réussit tout de même à prendre en

TABLEAU I. Modèle de régression logistique binaire de la répartition du roseau commun le long des routes de la municipalité régionale de comté (MRC) du Haut-Saint-Laurent (Québec, Canada). On trouve dans ce tableau 1) les effectifs de points de présence (n_p) et d'absence (n_a) du roseau, 2) la moyenne et l'écart-type (ET) de la distribution d'échantillonnage des coefficients de régression logistique (B), obtenus par la technique du *bootstrap* avec 5 % de la base de données, 3) la moyenne et l'écart-type de la statistique de Wald, 4) la médiane de la probabilité de signification (P) et 5) les rapports de cote (e^B) qui mesurent la contribution marginale de la catégorie dans la variation (accroissement ou diminution) des chances d'observer du roseau dans chaque cas énoncé. Un rapport de cote supérieur à 1 indique que la catégorie influence de manière positive la présence du roseau. Un rapport de cote inférieur à 1 indique le contraire.

	Présence du roseau (n_p)	Absence du roseau (n_a)	B (moyenne ± ET)	Wald (moyenne ± ET)	P	e^B
Niveau hiérarchique de la route						
National	88	105	0,964 ± 0,148	105,41 ± 20,23	0,000	2,622
Régional	142	337	0,417 ± 0,124	44,58 ± 12,36	0,001	1,518
Local (pavé)	211	1 248	−0,497 ± 0,109	12,43 ± 6,41	0,000	0,608
Local (non pavé)	14	115	−0,884 ± 0,249	24,05 ± 11,53	0,000	0,413
Dépôt de surface						
Bien drainé	116	1001	−0,543 ± 0,067	65,76 ± 13,69	0,000	0,581
Mal drainé	338	805	0,543 ± 0,067	65,76 ± 13,69	0,000	1,721
Orientation de la route						
Est – ouest	84	478	−0,197 ± 0,109	33,65 ± 11,09	0,075	0,821
Nord – sud	37	179	−0,308 ± 0,147	3,96 ± 3,40	0,046	0,735
Nord-est – sud-ouest	161	709	−0,032 ± 0,094	4,68 ± 3,56	0,506	0,968
Nord-ouest – sud-est	172	440	0,537 ± 0,094	1,04 ± 1,46	0,000	1,711
Type de paysage						
Ouvert ¹	394	1 279	0,233 ± 0,131	4,45 ± 3,23	0,144	1,262
Semi-ouvert ²	47	372	0,051 ± 0,143	3,81 ± 3,14	0,502	1,053
Fermé ³	13	155	−0,284 ± 0,206	0,94 ± 1,31	0,189	0,753

¹ Route bordée de chaque côté par des champs ou des jeunes friches.

² Route bordée d'un côté par des champs ou des jeunes friches et de l'autre par des boisés.

³ Route bordée de chaque côté par des boisés.

compte une partie de l'effet spatial. Trois des quatre variables entrant dans le modèle sont significatives ($P < 0,001$; Tableau I), soit la hiérarchie de la route, l'orientation de la route et le drainage des dépôts de surface. La statistique de Wald montre que la hiérarchie domine dans le modèle, suivi du drainage et de l'orientation.

Dans le modèle de régression logistique, tous les niveaux hiérarchiques de route sont significatifs ($P \leq 0,001$; Tableau I). Les rapports de cote suggèrent que les chances d'observer du roseau commun augmentent avec le niveau hiérarchique. Par exemple, il y a environ 2,6 fois plus de chances de trouver du roseau le long des routes nationales que le long des autres routes. À l'opposé, une route locale non pavée sera rarement bordée d'une population de roseau. En effet, son rapport de cote est faible et inférieur à 1, ce qui indique que la probabilité d'y trouver du roseau est bien inférieure à la probabilité d'en trouver le long d'un autre type de route. La probabilité d'observer du roseau est plus élevée sur les dépôts de surface mal drainés que sur les dépôts bien drainés. Enfin, 2 orientations de route ont des rapports de cotes très différents des autres (nord-ouest – sud-est et nord – sud). Les rapports de cote indiquent que l'orientation nord-ouest – sud-est est particulièrement favorable à la présence du roseau, au contraire de l'orientation nord-sud.

PRÉSENCE-ABSENCE DU ROSEAU COMMUN EN MILIEU OUVERT

Le modèle de régression logistique obtenu par la technique du *bootstrap* et expliquant la présence du roseau commun au sein des milieux ouverts (Tableau II) montre que la combinaison de catégories la plus favorable à la présence du roseau est une route nationale ou régionale orientée nord-ouest – sud-est et reposant sur un dépôt de surface mal drainé. Cette combinaison a été choisie comme étant la référence du modèle (rapport de cote égale à 1), c'est-à-dire que toutes les autres combinaisons sont comparées à elle (Tableau III). À titre d'exemple, la combinaison de catégories la moins favorable à la présence du roseau en milieu ouvert est une route locale orientée nord-sud et reposant sur un dépôt de surface bien drainé (rapport de cote de 0,053). Les rapports de cote sont toujours plus élevés pour les dépôts mal drainés que pour les dépôts bien drainés (à conditions égales), ce qui signifie qu'il y a toujours plus de chances de trouver du roseau sur les tourbes et les argiles que sur les autres types de dépôt en milieu ouvert. De plus, les routes nationales et régionales ont toujours un rapport de cote supérieur aux routes locales (à conditions égales), et ce, quelle que soient leur orientation et le type de dépôt qu'elles traversent. Enfin les orientations nord-est – sud-ouest et

TABLEAU II. Modèle de régression logistique binaire de la répartition du roseau commun le long des routes de la municipalité régionale de comté (MRC) du Haut-Saint-Laurent (Québec, Canada) traversant des milieux ouverts (routes bordées de chaque côté par des champs, des pâturages ou des jeunes friches) et obtenu par la technique du *bootstrap* avec 5 % de la base de données. Les statistiques présentées sont les mêmes que celles du Tableau I.

	Présence du roseau (n_p)	Absence du roseau (n_a)	B (moyenne ± ET)	Wald (moyenne ± ET)	P	e^B
Niveau hiérarchique de la route						
National ou régional ¹	204	353	0,000			1,000
Local	190	927	-1,094 ± 0,120	78,674 ± 16,640	0,000	0,343
Dépôt de surface						
Bien drainé	78	535	-1,071 ± 0,143	56,059 ± 12,114	0,000	0,343
Mal drainé ¹	316	745	0,000			1,000
Orientation de la route				19,980 ± 8,109	0,000	
Est – ouest	75	326	-0,571 ± 0,167	11,821 ± 6,207	0,001	0,565
Nord – sud	32	124	-0,767 ± 0,222	11,309 ± 5,433	0,001	0,465
Nord-est – sud-ouest	142	500	-0,387 ± 0,141	8,075 ± 5,307	0,007	0,679
Nord-ouest – sud-est ¹	144	331	0,000			1,000

¹ Catégorie de référence.

TABLEAU III. Rapports de cote combinés de la présence du roseau commun le long des routes des milieux ouverts (route bordée de chaque côté par des champs agricoles, des pâturages ou des jeunes friches) de la municipalité régionale de comté (MRC) du Haut-Saint-Laurent (Québec, Canada), en fonction du drainage des dépôts de surface, du niveau hiérarchique de la route et de son orientation. Ces rapports de cote combinés sont calculés à partir des valeurs présentées au Tableau II. On additionne d'abord les coefficients de régression logistique (B) de chaque catégorie entrant dans une combinaison de catégories particulière. On calcule ensuite l'exposant de cette somme (e^B). La catégorie de référence est la route nationale ou régionale orientée nord-ouest – sud-est et reposant sur un dépôt de surface mal drainé. Il s'agit ici de la catégorie où la probabilité de trouver du roseau est la plus élevée. Les nombres entre parenthèses indiquent les effectifs de points de présence (premier nombre) et d'absence (deuxième nombre) du roseau.

Orientation de la route	Dépôt de surface bien drainé				Dépôt de surface mal drainé			
	Est – ouest	Nord – sud	Nord-est – sud-ouest	Nord-ouest – sud-est	Est – ouest	Nord – sud	Nord-est – sud-ouest	Nord-ouest – sud-est
Route nationale ou régionale	0,194 (10-48)	0,159 (3-21)	0,233 (13-57)	0,343 (11-32)	0,565 (30-38)	0,464 (21-34)	0,679 (61-65)	1,000 (55-58)
Route locale	0,065 (7-119)	0,053 (2-23)	0,078 (19-145)	0,115 (13-91)	0,189 (27-123)	0,156 (7-46)	0,227 (49-232)	0,335 (66-149)

nord-ouest – sud-est ont toujours les rapports de cote les plus élevés, quelque soit le type de route et le drainage.

PRÉSENCE-ABSENCE DU ROSEAU COMMUN EN MILIEU FERMÉ

Le modèle de régression logistique de la présence du roseau commun au sein des milieux fermés (Tableau IV), montre que la hiérarchie de la route est une fois encore la variable la plus influente du modèle, suivie par le drainage des dépôts de surface. Au contraire des milieux ouverts, l'orientation de la route, dans une situation de milieu fermé, n'est pas significative dans le modèle ($P = 0,058$). Cela dit, comme la probabilité est très proche du seuil de signification ($\alpha = 0,05$), cette variable sera tout de même prise en considération pour la suite de l'analyse. La variable d'interaction du modèle est pour sa part significative, mais la seule interaction particulière significative est celle d'une route locale avec orientation nord – sud.

La référence du modèle (rapport de cote égal à 1) qui a été utilisée est une route nationale ou régionale orientée nord-ouest – sud-est et reposant sur un dépôt de surface mal drainé. Toutes les autres combinaisons sont comparées à cette référence (Tableau V). Les rapports de cote sont toujours plus élevés (à conditions égales) pour les dépôts mal drainés que pour les dépôts bien drainés. De plus, les routes nationales et régionales ont toujours un rapport de cote supérieur aux routes locales (à conditions égales), et ce, quelle que soit leur orientation et le drainage du dépôt traversé. Enfin, les routes nationales et régionales avec orientation nord – sud et situées sur des dépôts de surface bien drainés ont des rapports de cote plus élevés que les autres routes de même niveau hiérarchique orientées différemment. Il en est de même pour l'orientation nord-ouest – sud-est pour les routes locales, et ce, quelque soit le drainage du dépôt de surface.

TABLEAU IV. Modèle de régression logistique binaire de la répartition du roseau commun le long des routes de la municipalité régionale de comté (MRC) du Haut-Saint-Laurent (Québec, Canada) traversant des milieux fermés (routes bordées de chaque côté par des boisés). Le tableau montre aussi l'effet marginal combiné (interaction) du niveau hiérarchique de la route et de son orientation. Les statistiques présentées sont les mêmes que celles du Tableau I.

	Présence du roseau (n_p)	Absence du roseau (n_a)	B (moyenne \pm ET)	Wald	P	e^B
Niveau hiérarchique de la route						
National ou régional ¹	103	368	0,000			1,000
Local	158	2750	-1,294 \pm 0,239	29,306	0,000	0,274
Dépôt de surface						
Bien drainé	198	2741	-0,839 \pm 0,168	24,965	0,000	0,432
Mal drainé ¹	63	377	0,000			1,000
Orientation de la route						
Est – ouest	45	707	-0,507 \pm 0,296	7,474	0,058	0,603
Nord – sud	34	381	0,338 \pm 0,311	2,927	0,087	1,402
Nord-est – sud-ouest	87	1267	0,093 \pm 0,367	1,178	0,278	1,097
Nord-ouest – sud-est ¹	95	763	0,000	0,064	0,800	1,000
Interaction						
Route locale \times orientation est – ouest	20	555	-0,306 \pm 0,397	8,225	0,042	0,736
Route locale \times orientation nord – sud	9	314	-1,359 \pm 0,478	0,593	0,441	0,257
Route locale \times orientation nord-est – sud-ouest	73	1223	-0,478 \pm 0,412	8,075	0,004	0,620
Route locale \times orientation nord-ouest – sud-est ¹	56	658	0,000	1,343	0,246	1,000

¹Catégorie de référence.

TABLEAU V. Rapports de cote combinés de la présence du roseau commun le long des routes des milieux fermés (route bordée de chaque côté par des boisés) de la municipalité régionale de comté (MRC) du Haut-Saint-Laurent (Québec, Canada) en fonction du drainage des dépôts de surface, du niveau hiérarchique de la route et de son orientation. Ces rapports de cote combinés sont calculés à partir des valeurs présentées au Tableau IV, avec la même méthode que celle utilisée pour confectionner le Tableau III. La catégorie de référence est la même que celle du Tableau III (route nationale ou régionale orientée nord-ouest – sud-est et reposant sur un dépôt de surface mal drainé). Les nombres entre parenthèses indiquent les effectifs de points de présence (premier nombre) et d'absence (deuxième nombre) du roseau.

Orientation de la route	Dépôt de surface bien drainé				Dépôt de surface mal drainé			
	Est – ouest	Nord – sud	Nord-est – sud-ouest	Nord-ouest – sud-est	Est – ouest	Nord – sud	Nord-est – sud-ouest	Nord-ouest – sud-est
Route nationale ou régionale	0,260 (21-152)	0,606 (25-67)	0,474 (9-44)	0,432 (22-71)	-1 (4-0)	-1 (0-0)	-1 (5-0)	1,000 (17-34)
Route locale	0,053 (13-511)	0,043 (7-293)	0,081 (67-1020)	0,118 (34-583)	0,122 (7-44)	0,099 (2-21)	0,187 (6-203)	0,274 (22-75)

¹ Rapport de cote non indiqué car le nombre de points d'observation est insuffisant, c'est-à-dire inférieur à 20.

RAYONNEMENT SOLAIRE DIRECT JOURNALIER

Les valeurs de rayonnement solaire direct par beau temps qui tiennent compte du masque des arbres (moyennes saisonnières des journées du 15 mai, du 15 juin, du 15 juillet et du 15 août), indiquent que les routes nationales ou régionales qui traversent des boisés reçoivent de manière globale (moyenne des 2 côtés de route) toujours plus d'énergie lumineuse incidente que les routes locales, quelque soit leur orientation (Tableau VI). On remarque également que le fait de se trouver d'un côté ou de l'autre de la route influence la plupart du temps le rayonnement solaire reçu, le côté le plus exposé au soleil en recevant évidemment davantage. Les routes qui reçoivent le plus d'énergie solaire sont les routes orientées est – ouest. Cette orientation est celle où l'on trouve la plus grande différence entre les 2 côtés, et ce, le long des routes étroites. À l'inverse, les routes orientées nord – sud sont celles où les 2 côtés de route reçoivent la même quantité d'énergie lumineuse. Ce sont aussi les routes qui reçoivent le moins d'énergie solaire en milieu boisé.

Discussion

Dans le Haut-Saint-Laurent, le principal facteur expliquant la présence du roseau commun le long d'une route est le niveau hiérarchique de la route. Plus une route est importante, plus la probabilité d'y trouver du roseau augmente. Le lien entre l'importance d'une route et la présence du roseau peut s'expliquer de plusieurs manières. Une route importante (nationale ou régionale), qui sert de voie de transit, a une chaussée plus large. Son emprise totale (chaussée, accotements, fossés et berges) est aussi plus large. La trouée linéaire créée par la route est donc plus importante que pour une simple route locale (Parendes & Jones, 2000; Trombulak & Frissell, 2000). L'emprise d'une route large reçoit davantage d'énergie lumineuse, ce qui favorise d'autant une espèce héliophile comme le roseau (Haslam, 1972; Mal & Narine, 2004). Un indice en ce sens sont les rapports de cote des routes larges (nationales et régionales) traversant des boisés : ils sont systématiquement plus élevés que ceux des routes étroites (locales) traversant, eux aussi, des boisés. Il en est de même pour le rayonnement solaire

reçu qui est toujours plus élevé pour les routes nationales et régionales que pour les routes locales en milieu boisé. L'influence négative du boisé sur le roseau (son ombrage) est donc minimisée lorsqu'il est traversé par une route large (Parendes & Jones, 2000).

Une route large (nationale ou régionale) possède en général des fossés de drainage plus profonds qu'une route locale, près de laquelle ils sont d'ailleurs souvent absents dans le Haut-Saint-Laurent. En outre, le revêtement pavé (donc imperméable) qui caractérise la totalité des routes nationales et régionales dans le Haut-Saint-Laurent dirige plus rapidement, et en plus grande quantité, l'eau de fonte et de pluie vers les fossés de drainage qu'un revêtement de gravier (souvent caractéristique des routes locales), ce qui augmente d'autant la quantité d'eau que reçoivent les fossés (Rogers & Faha, 2007). En somme, une route importante fournira un habitat de meilleure qualité pour l'établissement du roseau commun et l'expansion subséquente des populations qu'une route locale car cet habitat sera plus vaste, plus humide et plus éclairé. Le sol des berges routières et l'eau qui circule dans les fossés des grandes routes ont aussi des caractéristiques physico-chimiques fortement influencées par l'épandage d'une quantité importante de sels de déglacage en hiver (Bryson & Barker, 2002). La plus grande quantité de sel épandu le long d'une route importante favorise probablement le roseau aux dépens des autres espèces végétales qui sont présentes dans les fossés et qui tolèrent moins bien le sel (Vasquez *et al.*, 2005). Enfin, il est aussi possible que le souffle produit par le passage à grande vitesse de véhicules lourds, qui ne circulent que sur les grandes routes, favorise la dissémination des graines de roseau qui sont très légères et contribuent de manière significative à la propagation de l'haplotype M du roseau au Québec (Brisson, Paradis & Bellavance, 2008).

Les dépôts de surface ont une forte influence sur la répartition du roseau commun exotique le long des routes. Les dépôts mal drainés, comme les argiles marines ou les sols organiques, conservent plus longtemps leur humidité en surface, et sont donc plus favorables au roseau que les sables ou les tills qui s'assèchent rapidement (Robitaille & Allard, 1996). Il est donc probable que les fossés qui longent

TABLEAU VI. Rayonnement solaire direct estival par beau temps (moyennes saisonnières des journées du 15 mai, du 15 juin, du 15 juillet et du 15 août) dans la municipalité régionale (MRC) de comté du Haut-Saint-Laurent (Québec, Canada). Le rayonnement indiqué est celui qui atteint les fossés de drainage de routes bordées de part et d'autre par des boisés. Il prend donc en considération l'effet de masque causé par les arbres. À titre de comparaison, le rayonnement solaire maximal (sans effet de masque en milieu ouvert) est en moyenne de 36,8 MJ·m⁻²·j⁻¹.

Orientation de la route	Route nationale ou régionale (largeur d'emprise de 28 m en moyenne)			Route locale (largeur d'emprise de 17 m en moyenne)		
	Rayonnement (MJ·m ⁻² ·j ⁻¹)		Moyenne des 2 côtés de la route	Rayonnement (MJ·m ⁻² ·j ⁻¹)		Moyenne des 2 côtés de la route
	Côté de la route le plus exposé au soleil	Côté de la route le moins exposé au soleil		Côté de la route le plus exposé au soleil	Côté de la route le moins exposé au soleil	
Est – ouest	31,1	24,2	27,7	29,9	10,8	20,4
Nord – sud	17,1	17,1	17,1	11,2	11,2	11,2
Nord-est – sud-ouest	23,9	15,3	19,6	16,5	10,8	13,7
Nord-ouest – sud-est	23,9	15,3	19,6	16,5	10,8	13,7

les routes et qui traversent des tourbières ou reposent sur des argiles soient plus gorgés d'eau et évacuent moins rapidement les eaux de fonte et de pluie que les fossés qui reposent sur du sable, du till ou du roc, ce qui favorise d'autant une espèce de milieu humide comme le roseau. Il est aussi probable que les fossés des routes situées sur des argiles dans la MRC du Haut-Saint-Laurent drainent davantage d'éléments nutritifs en provenance des exploitations agricoles voisines que ceux des routes situées sur les dépôts mieux drainés. En effet, dans cette région, les exploitations agricoles se situent surtout sur la plaine argileuse de l'ancienne mer de Champlain. La culture du maïs, qui requiert beaucoup d'engrais, y est de nos jours très étendue (Bouchard & Domon, 1997). Or, le roseau exotique est particulièrement compétitif lorsque les conditions du milieu sont enrichies en azote (Romero, Brix & Comín, 1999; Minchinton & Bertness, 2003; Rickey & Anderson, 2004). Le fort développement de la culture du maïs dans le Haut-Saint-Laurent depuis le début des années 1980, associé à un déboisement accéléré de la plaine argileuse pour élargir les champs, ont probablement contribué d'une certaine manière à la prolifération du roseau le long des routes (Domon, Bouchard & Gariépy, 1993; Pan *et al.*, 1999).

En principe, l'orientation d'une route qui traverse un boisé devrait faciliter ou nuire à l'installation et la croissance d'une population de roseau commun. En effet, dans un boisé, les arbres créent un écran dont l'influence varie selon leur hauteur et l'orientation de la trouée linéaire formée par la route (Bogren, 1991). Si la trouée est placée de manière à ce que le soleil illumine longtemps la route (route placée à peu près dans le même axe que la trajectoire du soleil, donc route est – ouest), le côté nord de la route (enseulé à midi) recevra plus d'énergie que le côté sud (à l'ombre). Par contre, si la route est placée perpendiculairement à la trajectoire du soleil (route nord – sud), celle-ci ne sera illuminée dans sa totalité que lorsque le soleil sera proche du zénith, le côté est étant ombragé le matin, le côté ouest en après-midi. En milieu boisé, on devrait donc observer plus de roseau le long des routes est – ouest que le long des autres routes, particulièrement celles orientées nord – sud. Le modèle de rayonnement solaire indique clairement que les routes les plus larges sont celles qui reçoivent le plus de lumière en milieu boisé, ce qui est favorable au roseau. Par contre, contrairement aux attentes, l'orientation de la route ne semble jouer un rôle significatif sur la présence du roseau qu'en milieu ouvert. De plus, le modèle élaboré dans ce travail suggère que les routes orientées est – ouest ne sont pas celles où la probabilité d'y trouver du roseau est la plus grande, alors que ce sont pourtant les routes les plus illuminées, et donc *a priori* celles qui sont les plus favorables au roseau. Comment peut-on expliquer les différences entre les hypothèses de départ et les observations de terrain?

Les données recueillies sur le terrain possèdent certaines caractéristiques qui pourraient expliquer en partie ces différences. D'abord, les observations de présence ou d'absence du roseau en milieu ouvert sont dix fois plus nombreuses que celles situées en milieu fermé. De plus, la proportion des points de présence du roseau est beaucoup plus faible en milieu fermé (8 %) qu'en milieu ouvert (24 %), et ce,

quelque soit l'orientation de la route. Enfin, dans le Haut-Saint-Laurent, certaines combinaisons de catégories de route en milieu fermé sont très rares, voir inexistantes, particulièrement en ce qui concerne les routes nationales ou régionales sur dépôts mal drainés. Les observations de certaines combinaisons de catégories sont aussi très localisées spatialement (1 ou 2 petits tronçons de route) au sein de l'aire d'étude. En somme, le modèle ne peut pas être aussi performant en milieu fermé qu'en milieu ouvert, et il est difficile en conséquence de tester certaines hypothèses bien précises. L'observation d'une influence de l'orientation de la route sur la présence du roseau en milieu ouvert est pour sa part très difficile à expliquer. On peut émettre l'hypothèse que les fossés des routes bordant des terres agricoles argileuses soient plus profonds (pour un meilleur drainage), et donc plus susceptibles d'être ombragés (notamment par des plants de maïs), mais cela reste à démontrer.

À partir de ces constatations et pour progresser davantage dans ce type de recherche, il serait nécessaire de faire une étude 1) au sein d'un territoire plus diversifié et plus vaste (où les combinaisons de catégories de route en milieu fermé se rencontreraient plus fréquemment et seraient mieux réparties spatialement), 2) où le rayonnement solaire serait mesuré directement sur le terrain (à l'aide d'un héliographe et d'un radiomètre), 3) où la taille réelle des arbres serait mesurée comme il se doit sur le terrain et 4) où on prendrait note du côté de la route où sont situées les populations de roseau commun. Cela permettrait probablement d'améliorer la précision des modèles et de tester de manière solide si les hypothèses de départ sont valables.

En conclusion, les routes constituent des corridors lumineux et humides propices à la dissémination à l'échelle d'une grande région d'une plante de milieu humide envahissante comme l'haplotype M du roseau commun. D'autres études ont aussi mis en évidence le fait que les routes agissent comme corridors de dissémination d'espèces de milieux humides, telle que l'alpiste roseau (*Phalaris arundinacea*; Lavoie, Dufresne & Delisle, 2005) et la salicaire pourpre (*Lythrum salicaria*; Delisle *et al.*, 2003). Le présent travail met en relief, pour la première fois, l'importance du type de route en présence (niveau hiérarchique, paysage environnant, dépôt de surface sous-jacent) sur la présence du roseau. Toutes les routes contribuent à la dissémination de la plante, mais pas avec la même envergure. Une stratégie qui pourrait être efficace pour empêcher le roseau de se propager davantage le long des routes serait de limiter le plus possible son accès à la lumière, soit en maintenant des lisières boisées en bordure des axes routiers, soit en favorisant la plantation d'arbustes compétitifs près des fossés de drainage (Jodoïn *et al.*, 2008). Une telle avenue serait probablement plus efficace à long terme et plus respectueuse de l'environnement que l'épandage d'herbicides, une mesure au demeurant interdite au Canada dans le cas du roseau.

Remerciements

Ce travail a été financé par un contrat de recherche avec le Ministère des Transports du Québec et par une subvention du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada. L'aide de terrain fournie par Hélène Côté-Poulin,

Patricia Gagnon, Marie-Claire LeBlanc et Catherine Plasse a été fortement appréciée.

Références

- Bart, D. & J. M. Hartman, 2003. The role of large rhizome dispersal and low salinity windows in the establishment of common reed, *Phragmites australis*, in salt marshes: New links to human activities. *Estuaries*, 26: 436–443.
- Bogren, J., 1991. Screening effects on road surface temperature and road slipperiness. *Theoretical and Applied Climatology*, 43: 91–99.
- Bouchard, A. & G. Domon, 1997. The transformations of the natural landscapes of the Haut-Saint-Laurent (Quebec) and their implications on future resource management. *Landscape and Urban Planning*, 37: 99–107.
- Brisson, J., É. Paradis & M.-È. Bellavance, 2008. Evidence of sexual reproduction in the invasive common reed (*Phragmites australis* subsp. *australis*; Poaceae) in eastern Canada: A possible consequence of global warming? *Rhodora*, 110: 225–230.
- Bryson, G. M. & A. V. Barker, 2002. Sodium accumulation in soils and plants along Massachusetts roadsides. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 33: 67–78.
- Burdick, D. M., R. Buchsbaum & E. Holt, 2001. Variation in soil salinity associated with expansion of *Phragmites australis* in salt marshes. *Environmental and Experimental Botany*, 46: 247–261.
- Chambers, R. M., D. T. Osgood, D. J. Bart & F. Montalto, 2003. *Phragmites australis* invasion and expansion in tidal wetlands: Interactions among salinity, sulfide, and hydrology. *Estuaries*, 26: 398–406.
- Charbonneau, N. C. & L. Fahrig, 2004. Influence of canopy cover and amount of open habitat in the surrounding landscape on proportion of alien plant species in forest sites. *Écoscience*, 11: 278–281.
- Deckers, B., K. Verheyen, M. Hermy & B. Muys, 2005. Effects of landscape structure on the invasive spread of black cherry *Prunus serotina* in an agricultural landscape in Flanders, Belgium. *Ecography*, 28: 99–109.
- Delisle, F., C. Lavoie, M. Jean & D. Lachance, 2003. Reconstructing the spread of invasive plants: Taking into account biases associated with herbarium specimens. *Journal of Biogeography*, 30: 1033–1042.
- Domon, G., A. Bouchard & M. Gariépy, 1993. The dynamics of the forest landscape of Haut-Saint-Laurent (Quebec, Canada): Interactions between biophysical factors, perceptions and policy. *Landscape and Urban Planning*, 25: 53–74.
- Efron, B., 1979. Bootstrap methods: Another look at the jackknife. *Annals of Statistics*, 7: 1–26.
- Foxcroft, L. C., M. Rouget, D. M. Richardson & S. Mac Fadyen, 2004. Reconstructing 50 years of *Opuntia stricta* invasion in the Kruger National Park, South Africa: Environmental determinants and propagule pressure. *Diversity and Distributions*, 10: 427–437.
- Géomatique Canada, 2003. Base nationale de données topographiques (cartes numériques). Ressources Naturelles Canada, Ottawa, Ontario.
- Haslam, S. M., 1972. *Phragmites communis* Trin. (*Arundo phragmites* L., *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steudel). *Journal of Ecology*, 60: 585–610.
- Hosmer, D. W. & S. Lemeshow, 2000. *Applied Logistic Regression*. 2nd Edition. John Wiley and Sons, New York, New York.
- Hudon, C., P. Gagnon & M. Jean, 2005. Hydrological factors controlling the spread of common reed (*Phragmites australis*) in the St. Lawrence River (Quebec, Canada). *Écoscience*, 12: 347–357.
- Hufty, A. & M. Thériault, 1983. Atlas d'abaques pour le calcul du rayonnement solaire par beau temps. Notes et documents de recherche no 18, Département de géographie, Université Laval, Québec, Québec.
- Jodoin, Y., C. Lavoie, P. Villeneuve, M. Thériault, J. Beaulieu & F. Belzile, 2008. Highways as corridors and habitats for the invasive common reed *Phragmites australis* in Quebec, Canada. *Journal of Applied Ecology*, 45: 459–466.
- Keller, B. E. M., 2000. Plant diversity in *Lythrum*, *Phragmites*, and *Typha* marshes, Massachusetts, USA. *Wetlands Ecology and Management*, 8: 391–401.
- Kolar, C. S. & D. M. Lodge, 2001. Progress in invasion biology: Predicting invaders. *Trends in Ecology and Evolution*, 16: 199–204.
- Lavoie, C., C. Dufresne & F. Delisle, 2005. The spread of reed canarygrass (*Phalaris arundinacea*) in Quebec: A spatio-temporal perspective. *Écoscience*, 12: 366–375.
- Lelong, B., C. Lavoie, Y. Jodoin & F. Belzile, 2007. Expansion pathways of the exotic common reed (*Phragmites australis*): A historical and genetic analysis. *Diversity and Distributions*, 13: 430–437.
- Maheu-Giroux, M. & S. de Blois, 2007. Landscape ecology of *Phragmites australis* invasion in networks of linear wetlands. *Landscape Ecology*, 22: 285–301.
- Mal, T. K. & L. Narine, 2004. The biology of Canadian weeds. 129. *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. *Canadian Journal of Plant Science*, 84: 365–396.
- Marie-Victorin, F., 1995. Flore laurentienne. 3^e édition. Presses de l'Université de Montréal, Montréal, Québec.
- MapInfo Corporation, 2005. MapInfo Professional. Version 8.0. MapInfo Corporation, Troy, Ohio.
- Menard, S. W., 1995. *Applied Logistic Regression Analysis*. Sage Publications, Thousand Oaks, California.
- Meyerson, L. A., K. Saltonstall, L. Windham, E. Kiviat & S. Findlay, 2000. A comparison of *Phragmites australis* in freshwater and brackish marsh environments in North America. *Wetlands Ecology and Management*, 8: 89–103.
- Minchinton, T. E. & M. D. Bertness, 2003. Disturbance-mediated competition and the spread of *Phragmites australis* in a coastal marsh. *Ecological Applications*, 13: 1400–1416.
- Minchinton, T. E., J. C. Simpson & M. D. Bertness, 2006. Mechanisms of exclusion of native coastal marsh plants by an invasive grass. *Journal of Ecology*, 94: 342–354.
- Ministère des Transports du Québec, 2004. Carte routière officielle. 3^e édition. Les Publications du Québec, Québec, Québec.
- Orson, R. A., 1999. A paleoecological assessment of *Phragmites australis* in New England tidal marshes: Changes in plant community structure during the last few millennia. *Biological Invasions*, 1: 149–158.
- Pagter, M., C. Bragato & H. Brix, 2005. Tolerance and physiological responses of *Phragmites australis* to water deficit. *Aquatic Botany*, 81: 285–299.
- Pan, D., G. Domon, S. de Blois & A. Bouchard, 1999. Temporal (1958–1993) and spatial patterns of land use changes in Haut-Saint-Laurent (Quebec, Canada) and their relation to landscape physical attributes. *Landscape Ecology*, 14: 35–52.
- Parendes, L. A. & J. A. Jones, 2000. Role of light availability and dispersal in exotic plant invasion along roads and streams in the H. J. Andrews Experimental Forest, Oregon. *Conservation Biology*, 14: 64–75.

- Philipp, K. R. & R. T. Field, 2005. *Phragmites australis* expansion in Delaware Bay salt marshes. *Ecological Engineering*, 25: 275–291.
- Richardson, D. M. & P. Pyšek, 2006. Plant invasions: Merging the concepts of species invasiveness and community invasibility. *Progress in Physical Geography*, 30: 409–431.
- Rickey, M. A. & R. C. Anderson, 2004. Effects of nitrogen addition on the invasive grass *Phragmites australis* and a native competitor *Spartina pectinata*. *Journal of Applied Ecology*, 41: 888–896.
- Robitaille, A. & M. Allard, 1996. Guide pratique d'identification des dépôts de surface au Québec. Les Publications du Québec, Québec, Québec.
- Rogers, W. M. & M. Faha, 2007. Porous pavement and other techniques in Portland. *Stormwater*, 8: 1–9.
- Romero, J. A., H. Brix & F. A. Comín, 1999. Interactive effects of N and P on growth, nutrient allocation and NH_4 uptake kinetics by *Phragmites australis*. *Aquatic Botany*, 64: 369–380.
- Rooth, J. E., J. C. Stevenson & J. C. Cornwall, 2003. Increased sediment accretion rates following invasion by *Phragmites australis*: The role of litter. *Estuaries*, 26: 475–483.
- Saltonstall, K., 2002. Cryptic invasion by a non-native genotype of the common reed, *Phragmites australis*, into North America. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99: 2445–2449.
- Silliman, B. R. & M. D. Bertness, 2004. Shoreline development drives invasion of *Phragmites australis* and the loss of plant diversity on New England salt marshes. *Conservation Biology*, 18: 1424–1434.
- Smith, P. A., 1994. Autocorrelation in logistic regression modelling of species' distributions. *Global Ecology and Biogeography Letters*, 4: 47–61.
- SPSS Inc., 2004. SPSS. Version 13.0. SPSS Inc., Chicago, Illinois.
- Stephenson, C. M., M. L. MacKenzie, C. Edwards & J. M. J. Travis, 2006. Modelling establishment probabilities of an exotic plant, *Rhododendron ponticum*, invading a heterogeneous, woodland landscape using logistic regression with spatial autocorrelation. *Ecological Modelling*, 193: 747–758.
- Thériault, M., 2006. MapStat. Version 2.01. Centre de recherche en aménagement et développement, Université Laval, Québec, Québec.
- Tremblay, T., M. Lamothe & F. Hardy, 2005. Géologie des formations superficielles, 31H/04, 31H/05 et 31G/01, rivière Châteauguay. Département des Sciences de la Terre, Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec.
- Trombulak, S. C. & C. A. Frissell, 2000. Review of ecological effects of roads on terrestrial and aquatic communities. *Conservation Biology*, 14: 18–30.
- Vasquez, E. A., E. P. Glenn, J. J. Brown, G. R. Guntenspergen & S. G. Nelson, 2005. Salt tolerance underlies the cryptic invasion of North American salt marshes by an introduced haplotype of the common reed *Phragmites australis* (Poaceae). *Marine Ecology Progress Series*, 298: 1–8.
- Wilcox, K. L., S. A. Petrie, L. A. Maynard & S. W. Meyer, 2003. Historical distribution and abundance of *Phragmites australis* at Long Point, Lake Erie, Ontario. *Journal of Great Lakes Research*, 29: 664–680.
- Windham, L. & R. G. Lathrop, 1999. Effects of *Phragmites australis* (common reed) invasion on aboveground biomass and soil properties in brackish tidal marsh of the Mullica River, New Jersey. *Estuaries*, 22: 927–935.
- Windham, L. & L. A. Meyerson, 2003. Effects of common reed (*Phragmites australis*) expansions on nitrogen dynamics of tidal marshes of the northeastern US. *Estuaries*, 26: 452–464.
- With, K. A., 2002. The landscape ecology of invasive spread. *Conservation Biology*, 16: 1192–1203.