Document généré le 4 juin 2025 15:01

Le Naturaliste canadien

Le rôle des infrastructures naturelles pour la gestion des eaux de ruissellement et des crues dans un contexte d'adaptation aux changements climatiques

Caroline Simard, Chloé L'Ecuyer-Sauvageau, Jean-François Bissonnette et Jérôme Dupras

Volume 143, numéro 1, hiver 2019

Colloque sur l'écologie routière et l'adaptation aux changements climatiques : de la recherche aux actions concrètes

URI : https://id.erudit.org/iderudit/1054114ar
DOI : https://doi.org/10.7202/1054114ar

Aller au sommaire du numéro

Éditeur(s)

La Société Provancher d'histoire naturelle du Canada

ISSN

1929-3208 (numérique)

Découvrir la revue

Citer cet article

Simard, C., L'Ecuyer-Sauvageau, C., Bissonnette, J.-F. & Dupras, J. (2019). Le rôle des infrastructures naturelles pour la gestion des eaux de ruissellement et des crues dans un contexte d'adaptation aux changements climatiques. *Le Naturaliste canadien*, *143*(1), 25–31. https://doi.org/10.7202/1054114ar

Résumé de l'article

Cet article présente une recension des écrits sur les infrastructures naturelles (IN) comme moyen d'adaptation aux changements climatiques, en prenant pour exemple la gestion des eaux de ruissellement et des crues. Une revue d'études de cas permet d'apprécier le potentiel des IN comme solution de rechange aux approches reposant sur des infrastructures conventionnelles dites grises. En effet, les approches d'aménagement du territoire urbain et périurbain qui intègrent les IN valorisent la production de services écosystémiques afin d'améliorer la résilience des villes et l'adaptation aux changements climatiques, avec comme objectif ultime de trouver des solutions durables et efficaces aux nouvelles conditions climatiques. Cet article propose des balises conceptuelles afin de mieux évaluer le potentiel des IN et la faisabilité de leur mise en oeuvre. Nous présentons une revue de cas d'implantation d'IN en regard de leur rapport coût-efficacité, de leur résilience et de leur capacité à concilier des intérêts souvent divergents entre les sphères sociales, économiques et environnementales.

Tous droits réservés © La Société Provancher d'histoire naturelle du Canada, 2018

Ce document est protégé par la loi sur le droit d'auteur. L'utilisation des services d'Érudit (y compris la reproduction) est assujettie à sa politique d'utilisation que vous pouvez consulter en ligne.

https://apropos.erudit.org/fr/usagers/politique-dutilisation/

Cet article est diffusé et préservé par Érudit.

Érudit est un consortium interuniversitaire sans but lucratif composé de l'Université de Montréal, l'Université Laval et l'Université du Québec à Montréal. Il a pour mission la promotion et la valorisation de la recherche.

https://www.erudit.org/fr/

Le rôle des infrastructures naturelles pour la gestion des eaux de ruissellement et des crues dans un contexte d'adaptation aux changements climatiques

Caroline Simard, Chloé L'Ecuyer-Sauvageau, Jean-François Bissonnette et Jérôme Dupras

Résumé

Cet article présente une recension des écrits sur les infrastructures naturelles (IN) comme moyen d'adaptation aux changements climatiques, en prenant pour exemple la gestion des eaux de ruissellement et des crues. Une revue d'études de cas permet d'apprécier le potentiel des IN comme solution de rechange aux approches reposant sur des infrastructures conventionnelles dites grises. En effet, les approches d'aménagement du territoire urbain et périurbain qui intègrent les IN valorisent la production de services écosystémiques afin d'améliorer la résilience des villes et l'adaptation aux changements climatiques, avec comme objectif ultime de trouver des solutions durables et efficaces aux nouvelles conditions climatiques. Cet article propose des balises conceptuelles afin de mieux évaluer le potentiel des IN et la faisabilité de leur mise en œuvre. Nous présentons une revue de cas d'implantation d'IN en regard de leur rapport coût-efficacité, de leur résilience et de leur capacité à concilier des intérêts souvent divergents entre les sphères sociales, économiques et environnementales.

Mots-clés : coût-efficacité, infrastructures naturelles, inondations, résilience, services écosystémiques

Abstract

This article provides a review of the literature on the use of green (or natural) infrastructures (GIs) as a means of adapting to climate change, using runoff and flood management as examples. An analysis of case studies assesses the potential of GIs to serve as alternatives to methods based on conventional grey infrastructures. Urban planning approaches that integrate GIs, recognise and value ecosystem services as a means of improving urban resilience and adaptation to climate change. The ultimate objective of this approach is to find sustainable and effective solutions to modified climatic conditions. This article proposes a conceptual framework to evaluate the potential of GIs and the feasibility of putting them into practice, and a case study review of the implementation of GIs in terms of their cost-effectiveness, resilience and capacity to reconcile often divergent social, economic and environmental interests is presented.

Keywords: cost-effectiveness, ecosystem services, floods, green infrastructures, resilience

Introduction

Les changements climatiques sont associés, entre autres, à une augmentation de la fréquence, de l'intensité et de la durée des évènements extrêmes tels que les inondations saisonnières, les épisodes de pluie abondante et de déficit hydrique (Ouranos, 2015). Palmer et collab. (2008) ont estimé que de 365 millions à un milliard de personnes résident sur des territoires à risque qui seront affectés par ces phénomènes. Les milieux bâtis, urbains et périurbains sont particulièrement vulnérables aux évènements climatiques extrêmes.

Les intervenants en aménagement du territoire d'Europe et d'Amérique du Nord mobilisent désormais le concept d'infrastructures naturelles (IN) afin de favoriser une meilleure intégration des fonctions écologiques des milieux naturels au sein des territoires urbains et périurbains (Bissonnette et collab., 2018; Dupras et collab., 2015). Le concept d'IN introduit l'idée selon laquelle les villes constituent des écosystèmes qui s'intègrent à une trame verte et bleue devant être protégée et mise en valeur pour assurer la production des services écosystémiques (SÉ) essentiels aux sociétés humaines (Liao, 2012). En remplissant des fonctions écologiques données, les écosystèmes fournissent des SÉ qui contribuent au bien-être humain. Le potentiel des écosystèmes de fournir des SÉ diffère selon leurs caractéristiques et leur emplacement (Gomez-Baggethun et Barton, 2013). Les milieux humides en milieux urbains constituent des IN efficaces dans la production de SÉ concernant directement la santé et la sécurité humaine. Par exemple, une plaine inondable en région urbaine atténue l'effet des inondations. Plusieurs avantages connexes (ou co-bénéfices) y sont associés : amélioration de la qualité de l'eau, recharge des nappes phréatiques, support pour la vie aquatique et faunique, et possibilités de récréation et de tourisme (Porse, 2014). Cependant, la production de

Caroline Simard est économiste à Ouranos et doctorante à l'Institut des sciences de la forêt tempérée de l'Université du Québec en Outaouais.

simard.caroline@ouranos.ca

Chloé L'Écuyer-Sauvageau est doctorante à l'Institut des sciences de la forêt tempérée de l'Université du Québec en Outaouais.

Jean-François Bissonnette est professeur adjoint au département de géographie de l'Université Laval.

Jérôme Dupras est professeur au Département des sciences naturelles de l'Université du Québec en Outaouais.

tels services ou avantages est complexe en raison de la forte fragmentation écologique des milieux urbains (Gomez-Baggethun et Barton, 2013).

Il existe encore peu d'études de synthèse (Bowler et collab., 2010; Jaffe, 2010; Kazmierczak et Carter, 2010) sur les diverses expériences d'aménagement des IN ayant eu cours dans les régions urbaines à travers le monde. Nous proposons une telle étude afin d'évaluer le potentiel des IN pour l'adaptation aux changements climatiques.

Malgré l'importance des débats scientifiques entourant la contribution des IN à la résilience[1] des écosystèmes urbains, leur potentiel et la faisabilité de leur mise en œuvre demeurent difficiles à évaluer. Nous avons développé un cadre d'analyse par une revue de la littérature basée sur une analyse thématique dirigée en fonction d'une grille d'analyse composée de trois « codes » ou thèmes (Cresswell, 2006) : 1) résilience, 2) coût-efficacité et 3) conciliation multifonctionnalité/acceptabilité sociale. Afin de préciser le potentiel des IN pour l'adaptation aux changements climatiques, une revue de cas d'implantation d'infrastructures naturelles a été réalisée.

Composer avec des évènements climatiques extrêmes

Quelles solutions face au problème des inondations ?

Les évènements climatiques extrêmes constituent une préoccupation majeure pour les collectivités. Au Québec, les inondations du printemps 2017 ont illustré clairement les enjeux liés à ces phénomènes[2]. Ces inondations ont été responsables de nombreux dommages aux habitations riveraines et ont forcé l'évacuation de centaines de résidents (CMM, 2017). Face à ce problème, plusieurs solutions existent, celles-ci allant de l'investissement dans les grands ouvrages d'ingénierie tels que les barrages et les digues de retenue, jusqu'à un ensemble de projets valorisant les fonctions des écosystèmes.

L'approche préventive du contrôle des inondations fondée sur un meilleur aménagement écosystémique semble gagner en popularité dans les milieux municipaux. Certains auteurs estiment d'ailleurs que les approches traditionnelles de gestion des eaux basées sur des infrastructures bâties telles que des digues de retenue ne seraient pas économiquement et écologiquement viables (Kline et Cahoon, 2010; Jaffe, 2010). Par exemple, la stabilisation des berges tend à fossiliser les rivières en empêchant le mouvement naturel des canaux et en coupant la connexion entre le cours d'eau et la plaine inondable (Biron et collab., 2014). De plus, puisque les interventions de contrôle requièrent un entretien régulier et coûteux, plusieurs auteurs mettent en doute cette approche comme stratégie de gestion à long terme (Kline et Cahoon, 2010; Roni et Beechie, 2012).

Les infrastructures naturelles : une approche d'aménagement intégrée

Bien qu'il en existe une variété de définitions, nous retenons que les infrastructures naturelles (IN) sont « un ensemble d'espaces verts et bleus interreliés permettant de préserver la valeur et les fonctions des écosystèmes qui fournissent des bénéfices aux sociétés humaines » (Benedict et McMahon, 2012). Sur le plan de la gestion des eaux de ruissellement, plusieurs infrastructures naturelles permettent d'améliorer la résilience d'un système aux effets de pluies abondantes. Les IN englobent donc autant les plaines inondables que des parcs urbains ou des milieux humides, voire des espaces privés à plus petite échelle tels que les jardins privés et pluviaux, les marais filtrants ou les toits verts (USA-EPA, 2015) (voir tableau 1).

Les IN peuvent figurer au cœur des stratégies de gestion des eaux de ruissellement de type préventive qui s'appuient en grande partie sur la protection, la restauration et le développement des milieux naturels, semi-naturels ou aménagés (Pattison-Williams et collab., 2018). Ces stratégies permettent d'améliorer les fonctions écosystémiques liées à la régulation de l'écoulement des eaux. Leur conception repose sur une meilleure connaissance des écosystèmes, de leurs caractéristiques hydrologiques et des bénéfices que ceux-ci peuvent apporter en ce qui concerne la gestion des eaux de ruissellement et les bénéfices pour la santé et les loisirs.

Les infrastructures naturelles : des solutions d'adaptation pérennes ?

Les solutions face au risque d'inondation sont nombreuses. Il est possible de s'attarder à l'aléa pour diminuer son intensité, ce qui a été la ligne directrice pendant plusieurs années avec des infrastructures lourdes, mais il est aussi possible de s'attarder à la vulnérabilité pour la diminuer également. Les IN semblent faire partie à la fois de la diminution de l'aléa et de la vulnérabilité. Par ailleurs, il est à noter que les IN demandent peu ou pas d'entretien et ont une durée de vie illimitée (USA-EPA, 2015). Les paramètres d'analyse présentés ci-dessous montrent comment elles peuvent constituer des solutions pérennes d'adaptation aux changements climatiques.

Rapport coût-efficacité

Les IN participent au mouvement de la croissance intelligente (*smart growth*) et de l'économie circulaire (Benedict et McMahon, 2012). La planification des IN favoriserait un usage plus efficient[3] des ressources matérielles disponibles. À cet égard, des chercheurs ont formulé l'hypothèse selon

1. La résilience est une notion complémentaire à l'adaptation. Conformément à la définition de Berkes et collab. (2007), la résilience est un état qui caractérise l'écosystème et qui traduit la capacité d'absorber une perturbation sans que ses caractéristiques fondamentales en soient changées de façon importante et sans retour. Cette notion, bien qu'apparentée, diffère de l'adaptation qui désigne plutôt une action. La résilience peut favoriser l'adaptation, mais ce n'est pas une condition *sine qua non*.
2. Pour plus de détails sur cet évènement d'actualité, vous pouvez consulter la page : https://ici.radio-canada.ca/sujet/inondations-printemps-2017.
3. L'usage efficient réfère ici à l'efficience économique ou allocative (par opposition à l'efficience technique). Une allocation de ressources est dite économiquement efficiente si l'ensemble des biens et services qui en découlent, y compris les services écologiques, permet d'éviter le gaspillage.

Tableau 1. Typologie des infrastructures naturelles et grises (Bartesaghi Koc et collab., 2017; Cadenasso et collab., 2007; Marino et Lapintie, 2018; Rayfield et collab., 2015; Tzoulas et collab., 2007).

Canopée urbaine	Espaces publics végétalisés	Toits verts	Structures verticales vertes	Gestion des eaux usées	Structures de transport
• Rues vertes • Arbres et arbustes de rue • Foresterie urbaine	• Ceintures vertes • Corridors verts • Couvert végétalisé/ végétatif • Espaces verts • Espace urbain/ public ouvert • Parcs urbains • Structures végétales urbaines • Couvert de sol végétalisé • Bacs publics de végétation • Espaces protégés	• Écotoits • Toits verts (végétalisés) • Toits bleus (pluviaux) • Toits vivants • Jardins de toit	• Biomurs • Façades vertes • Murs verts • Murs vivants • Végétation verticale	• Marais filtrants • Jardins pluviaux • Biorétention • Égouts séparateurs • Égouts pluviaux • Bassins d'eau de pluie • Milieux humides naturels	• Chaussée perméable • Trottoirs perméables • Saillies de trottoirs végétalisées • Trottoirs surélevés • Terre-plein central végétalisé • Rues vertes et conviviales

laquelle l'aménagement du territoire par la valorisation des fonctions écosystémiques offre un meilleur ratio coût-efficacité (Cerin, 2006). D'un point de vue théorique, si la valeur et les fonctions des infrastructures grises[4] sont appelées à se déprécier, la valeur et les fonctions des IN s'apprécient dans le temps, puisque le sol et la végétation ont la capacité de se régénérer naturellement (Kline et Cahoon, 2010).

La gestion des évènements climatiques extrêmes ne peut plus se faire sans considérer la question des coûts à long terme. De 1970 à 2016, les dédommagements versés dans le cadre du programme fédéral « Accords d'aide financière en cas de catastrophe » ont augmenté de façon importante, passant de 10 millions de dollars pour la période 1970-1995 à 360 millions de dollars pour la période 2011-2016 (SPC, 2017)[5]. Étant donné la nature des risques liés aux inondations, et selon le mode d'indemnisation actuelle, l'intervention après dommages doit être prise en charge par les gouvernements qui ont donc tout intérêt à intervenir en amont pour prévenir les inondations (Sakshi, 2009). Les études de cas tendent à démontrer que les IN ont de meilleurs ratios coût-efficacité pour atténuer les risques d'inondation, surtout lorsqu'on tient compte de leur caractère multiéchelle et multifonctionnel (Demuzere et collab., 2014).

Coûts et avantages des infrastructures naturelles

Plusieurs études de cas sont probantes quant au potentiel de rentabilité des IN comme mesures de prévention des inondations, à condition de considérer l'ensemble des coûts. Kousky et collab. (2013) ont constaté que les coûts liés aux exclusions de construction dans la plaine inondable sont inférieurs aux avantages liés à la réduction des dommages potentiels, et qu'ils sont donc rentables pour la société, si les exclusions sont appliquées de façon ciblée et non uniforme, selon les caractéristiques spatiales des terrains. Par ailleurs, Wahlund et collab. (2015) ont pu déterminer que lorsqu'on tient compte des bénéfices environnementaux pour la société, liés notamment à l'amélioration du paysage et de la qualité de l'eau, plusieurs IN utiles pour atténuer les impacts des inondations deviennent plus rentables que les compensations. Cet exemple montre que la considération de la multifonctionnalité des IN dans les évaluations publiques peut modifier le résultat de l'évaluation.

Aménager et préserver les IN pour favoriser la résilience des écosystèmes

La résilience décrit soit la capacité de récupération après un choc, soit une perturbation temporaire, ou encore la capacité d'adaptation à long terme (Begum et collab., 2007). En ce qui concerne la gestion de l'écoulement des eaux, les IN maximisent la résilience de l'écosystème, autant par la capacité à faire face à des inondations saisonnières que celle de maintenir certaines propriétés de base face à des modifications de tendances à plus long terme comme celles qu'impliquent les changements climatiques (Begum et collab., 2007). De plus, les IN favorisent la résilience des écosystèmes urbains dans la mesure où ils améliorent la connectivité écologique d'une mosaïque de milieux naturels ou semi-naturels qui maintiennent les cycles biogéochimiques.

La question de la résilience amène à considérer les interventions d'aménagement qui permettent de préserver en amont les capacités d'un écosystème à répondre aux variations ou aux perturbations. Les écosystèmes valorisés par l'aménagement des IN peuvent fournir un ensemble de SÉ (*bundle*) qui confère à ceux-ci un caractère multifonctionnel

4. On définit les infrastructures grises en contraste avec la définition des infrastructures vertes. Il s'agit d'ouvrages bâtis traditionnellement pour gérer le déplacement de l'eau en milieu urbain et périurbain et protéger les bâtiments des dommages causés par l'eau. Les égouts pluviaux, les canalisations, les stations de relèvement, la surélévation des trottoirs mais aussi les routes constituent quelques exemples courants.

5. Des causes multifactorielles sont en jeu dans l'augmentation des coûts de dédommagements par personne, dont « l'imprévisibilité croissante, le nombre et la gravité des catastrophes » (SPC, 2014).

(Berry et collab., 2015). Par exemple, Alves et collab. (2018) soulignent que l'implantation d'un toit vert permet de réduire la consommation en énergie liée à la climatisation et au chauffage et de lutter contre les îlots de chaleur, mais que ce toit vert permet également de fournir un habitat pour la faune et les insectes, d'améliorer la pollinisation, de mettre en contact les humains avec les éléments naturels et de fournir de la biomasse végétale et des biens alimentaires. L'utilisation d'IN pour la gestion de l'eau permet de produire des avantages connexes susceptibles d'améliorer la résilience des écosystèmes et le bien-être des populations et confère un caractère multifonctionnel. Malheureusement, les évaluations économiques négligent souvent l'ensemble des avantages issus d'écosystèmes plus résilients à long terme, car elles peinent à traiter la multifonctionnalité des options d'aménagement. L'approche économique des avantages connexes (Chan et collab., 2011) permet d'évaluer les bénéfices associés aux ensembles de SÉ. Ainsi, les décisions d'aménagement prennent en compte les coûts réels de différentes options d'aménagement.

Conciliation des objectifs sociaux, environnementaux et économiques

La conciliation des objectifs divers dans la mise en œuvre d'infrastructures naturelles soulève nécessairement des enjeux de gouvernance. Dans le cadre de cette étude, la gouvernance est à la fois un cadre décisionnel et une manière de gérer les interactions humaines, que ce soit à l'aide d'institutions formelles ou informelles (Porse, 2013). Le contexte actuel de l'aménagement des IN est caractérisé par une considération accrue des initiatives ascendantes (*bottom-up*) qui s'appuient sur des coalitions entre citoyens et pouvoirs municipaux (Bissonnette et collab., 2018). La difficulté à obtenir une adhésion des propriétaires fonciers concernés ou la perception du public à l'égard de certains projets sont des barrières importantes à l'adoption des projets d'aménagement urbain intégrant des IN (Dhakal et Chevalier, 2016).

Les méthodes traditionnelles de gestion de l'eau sont souvent caractérisées par des modes de gouvernance s'appuyant sur des spécialistes et laissant peu de place à la participation citoyenne (Dhakal et Chevalier, 2016; Matthews et collab., 2015). Les décisions peuvent alors paraître opaques aux yeux du public, ce qui peut nuire à l'adoption de pratiques relatives à la gestion de l'eau chez les citoyens (Cairns et collab., 2016; Matthews et collab., 2015). De plus, l'incongruence trop souvent observée entre les limites administratives et hydrologiques complique la mobilisation des ressources et l'implication citoyenne dans la gestion intégrée de la ressource-eau (Dhakal et Chevalier, 2016). Pourtant, plusieurs cas démontrent l'importance d'assurer la collaboration entre les divers paliers de gouvernance, tout en considérant les compromis potentiels entre les intérêts divergents des groupes d'acteurs souvent hétérogènes : citoyens, investisseurs et groupes environnementaux (Buurman et Padawangi, 2017; Matthews et collab,. 2015).

Présentation des cas d'étude

Mesures de restriction de zonage et de conservation

Le bassin versant de la rivière des Outaouais

Dès les années 1950, les régions de l'Outaouais et du Grand Montréal ont rencontré des problèmes liés aux inondations saisonnières à l'image de celles du printemps 2017 dans plusieurs régions du Québec. Plus particulièrement, la décennie 1970 a révélé toute l'acuité du problème des inondations en Outaouais. La rivière des Outaouais présente une forte variabilité de débit[6], et des inondations ont causé des dommages importants en 1972, 1973, 1974 et 1976. Pour la première fois, en 1974, les gouvernements ont indemnisé les victimes d'inondations de la région, ce qui causa un précédent et les obligea à réitérer ce geste en 1976 (Lamontagne et collab., 1982; Tremblay et collab., 2014).

À la fin des années 1980, Ouellette et collab. (1988) ont analysé un programme de zonage de plaines inondables proposé par la Communauté régionale de l'Outaouais (programme fédéral de cartographie, Convention Canada-Québec) qui consistait à interdire les nouvelles constructions dans une zone jugée trop à risque (récurrence de 0-20 ans) et à encadrer les constructions dans les zones à risque modéré (récurrence de 20-100 ans) (Morissette et collab., 1998). La cartographie des zones à risque et l'implantation du programme de restriction devaient permettre de réduire le montant des compensations versé par le gouvernement en cas de dommage et de financer le programme lui-même. Quatre scénarios y ont été évalués pour 6 municipalités de la région. Ces scénarios tenaient compte de l'impact de la variation du taux d'actualisation, des prévisions de croissance du nombre de propriétés et de la valeur de celles-ci. Les résultats de l'étude ont indiqué que le programme était rentable collectivement, mais que son implantation ne permettait pas au gouvernement de récupérer les sommes investies dans le programme par la réduction des dédommagements à verser.

La décision gouvernementale a donc été d'interdire la construction résidentielle dans la zone inondable à risque élevé (récurrence de 0 à 20 ans), mais de l'autoriser dans la zone inondable à risque faible (récurrence de 20 à 100 ans) (CUO, 2012). Les principes écologiques n'ayant pas été intégrés à cette analyse, il n'a pas été possible d'envisager la résilience à long terme du milieu bâti en fonction de l'évolution des conditions climatiques (Dale et collab., 1998). Cette approche décisionnelle était couramment appliquée aux perturbations irrégulières comme les inondations dites de risque faible. Cet exemple illustre un cas où la solution envisagée se limite à réduire les effets négatifs sur la population en réaction à une crise.

La moraine d'Oak Ridges

L'exemple de la protection de la moraine d'Oak Ridges en Ontario est le pendant conservationniste du cas de la

6. Mentionnons que la rivière des Outaouais est très régularisée par des barrages, ce qui en fait un cas d'espèce. Cette particularité a été prise en compte par Tremblay et collab. (2014).

rivière des Outaouais. En 2001, face aux pressions associées à l'urbanisation dans la région de Toronto (McCarthy et collab., 2014), l'aire de conservation de la moraine d'Oak Ridges a été désignée à des fins de conservation (Bradford, 2008; MTRCA, 1980). La moraine couvre un territoire de 190 000 hectares et revêt une haute importance hydrologique et écologique à cause de sa situation géographique à la jonction de plusieurs bassins versants (Chapman et Putnam, 1984; Government of Ontario, 2002). Il s'agit d'une région importante pour la recharge des eaux souterraines (Sharpe et collab., 2004), pour la qualité et la quantité des ressources hydriques à l'échelle locale et régionale, en plus de fournir de nombreux habitats, dont des milieux humides d'importance au niveau provincial.

Selon Bradford (2008), au moment de développer le plan de conservation de la moraine en 2001, les connaissances quant à l'impact de l'urbanisation sur l'hydrologie ne permettaient pas de distinguer entre les usages permis ou interdits sur le territoire. C'est pourquoi les responsables du plan de gestion de la moraine d'Oak Ridges ont plutôt fait valoir le principe de précaution en assurant la protection de l'intégrité de l'écosystème. Les décideurs ont ainsi conservé les fonctions hydrologiques et écologiques de la moraine, maintenant la production de SÉ pour la région selon McCarthy et collab. (2014). Ces mêmes auteurs relatent que, bien qu'initiée par des décideurs provinciaux et régionaux, la conservation de ce milieu a été soutenue par la population. Cet exemple démontre l'importance de la gouvernance locale pour répondre à des préoccupations citoyennes, ainsi qu'une certaine complémentarité entre les approches de gouvernance ascendante (*bottom-up*) et descendante (*top-down*). Cette approche de protection des IN s'est effectuée en amont d'un problème, en réponse à une pression perçue par un ensemble de parties prenantes.

Approches de gestion des eaux de ruissellement

Le système de tarification des eaux pluviales de la ville de Victoria

Au début des années 2000, la ville de Victoria, en Colombie-Britannique, a amorcé des discussions afin de revitaliser son système d'égout datant d'avant 1920 et en mauvais état. Après la tenue de consultations, un modèle de gestion des eaux de ruissellement a été finalisé en 2014. Ce modèle inclut la création d'un nouveau tarif « eaux pluviales » pour les usagers, assorti d'un crédit de taxes pour les bonnes pratiques volontaires, le tout mis en application en 2016. Les lignes ci-dessous expliquent en quoi ces mesures auraient favorisé la prévention des inondations et une réduction de la pollution de l'eau (City of Victoria, 2018).

Ce tarif « eaux pluviales », une écotaxe, permet d'internaliser les coûts associés à de mauvaises pratiques de gestion des eaux pluviales en incitant les propriétaires à des comportements plus respectueux de l'environnement. Par exemple, en liant une portion de la taxe foncière à des caractéristiques des résidences et du quartier qui ont un impact sur la gestion de l'eau (p. ex. une forte part de structures imperméables sur la propriété ou dans la rue ou une densité d'habitations plus faible), les citoyens sont encouragés à choisir des infrastructures à faible impact. Le crédit de taxation pour l'adoption volontaire de pratiques de gestion des eaux pluviales telles que les barils de pluie, les structures d'infiltration, les jardins de pluie, le pavé perméable, les toits verts et les rigoles de drainage (City of Victoria, 2018; Sewell et Roueche, 1974) vient encourager les bons comportements. Ce type d'approche de gestion responsabilise les citoyens par rapport à leur gestion des eaux de ruissellement en leur offrant des incitatifs financiers. De plus, le fait d'inciter l'adoption d'IN à faible impact permet d'élargir le champ d'action de la ville aux terrains privés, contribuant ainsi à une meilleure gestion intégrée de la ressource-eau.

Le plan d'infrastructures vertes de la ville de New York

La ville de New York, située à la confluence d'écosystèmes terrestres et estuariens, a fait des progrès importants pour améliorer la qualité de ses écosystèmes en fournissant une large variété de SÉ urbains. Elle compte le plus grand nombre de parcs publics aux États-Unis et environ 21 % de la ville est recouvert par une canopée.

Parmi les éléments clés pour expliquer ces réalisations, Elmqvist et collab. (2013) proposent le Plan d'Infrastructures Vertes de la ville de New York (*NYC Green Infrastructure Plan*). En privilégiant des approches multi-objectifs (toits bleus, rues vertes, béton poreux et lots vacants), ce plan annonce des investissements de 2,4 milliards de dollars américains sur 20 ans et devrait réduire de 5,7 milliards de litres par année le volume des eaux de surverse (*CSO: combined sewer overflow*). La ceinture bleue de Staten Island, un des plus grands systèmes de gestion des eaux pluviales aux États-Unis (avec une superficie de 4 856 hectares de cours d'eau et de milieux humides), illustre l'importance des IN dans la ville. Gumb et collab. (2008) ont estimé que la ceinture bleue aurait capté 40 % des charges de nitrates et ainsi permis d'économiser près de 80 millions de dollars américains par rapport au recours à des infrastructures traditionnelles.

Contrairement à la ville de Victoria, la ville de New York appuie activement les IN publiques pour la gestion de ses eaux de ruissellement, sans négliger les initiatives privées. Cette approche permet d'adopter une vision globale de la gestion des eaux de ruissellement, dans la mesure où l'adoption de pratiques s'inscrit dans une organisation du territoire qui favorise les fonctions écosystémiques. Elle va au-delà d'une approche comme celle de la ville de Victoria, fondée sur les seuls avantages d'un crédit de taxation récompensant un comportement ciblé. Par contre, dans les deux cas, l'éducation et la sensibilisation de la population à l'importance des IN en milieu urbain sont de mise pour assurer une continuité dans l'adoption de bonnes pratiques et pour s'assurer de l'acceptabilité sociale de tels types d'action.

Conclusion

Au regard de l'adaptation aux changements climatiques, l'usage des IN permet d'améliorer les pratiques d'aménagement face aux risques accrus posés par une augmentation de la fréquence et de l'intensité des évènements extrêmes. Lorsqu'on les compare aux infrastructures grises, les IN permettent de maximiser la production de services écosystémiques et d'avantages connexes reliés aux milieux naturels, tout en favorisant une gestion préventive en amont des problèmes liés aux inondations. Contrairement aux infrastructures grises, les IN remplissent d'autres fonctions écologiques et socioéconomiques, ce qui leur confère une meilleure résilience et un caractère adaptatif (Elmqvist et collab., 2013).

Selon les milieux et les contextes, un ensemble de solutions complémentaires doit être mis en place, qu'elles impliquent des IN ou des infrastructures grises. Notre analyse démontre la pertinence de considérer le rapport coût-efficacité, la résilience et la multifonctionnalité des IN dans la gestion de l'écoulement des eaux et la prévention des inondations. Cependant, comme le démontre notre recension de cas d'implantation des IN, l'ensemble de ces facteurs est rarement considéré au moment de la mise en œuvre des actions. En effet, les mesures appliquées varient selon le contexte et dépendent fortement de facteurs contingents locaux qui s'appuient sur des dynamiques de gouvernance propres au contexte. Quoi qu'il en soit, de nombreux cas d'implantation des IN fournissent des exemples éloquents et des leçons essentielles.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier les organisateurs et les participants des évènements suivants : le « Colloque sur l'écologie routière et l'adaptation aux changements climatiques » (2017) et le « Sommet sur les infrastructures naturelles du Grand Montréal » (2016) pour avoir alimenté la réflexion au sujet de cet article. Ils tiennent également à souligner l'apport des réviseurs anonymes qui, par leurs commentaires judicieux, ont bonifié significativement cet article. Cette recherche a bénéficié du soutien financier de Génome Canada et Génome Québec (10512), dans le cadre du projet *Algal Blooms, Treatment, Risk Assessment, Prediction and Prevention Through Genomics* (ATRAPP) et de l'appui du Conseil de recherche en sciences humaines du Canada (435-2017-1078). ◂

Références

ALVES, A., J. PATINO GOMEZ, Z. VOJINOVIC, A. SANCHEZ et S. WEESAKUL, 2018. Combining co-benefits and stakeholders perceptions into green infrastructure selection for flood risk reduction. Environments, 5(29):1-23.

BARTESAGHI KOC, C., P. OSMOND et A. PETERS, 2017. Towards a comprehensive green infrastructure typology: a systematic review of approaches, methods and typologies, Urban Ecosystems, 20 :15-35.

BEGUM, S., M. J. STIVE et J.W. HALL (édit.), 2007. Flood risk management in Europe: Innovation in policy and practice. Advances in Natural and Technological Hazards Research, vol. 25, Édition Springer Science & Business Media, Dordrecht, 534 p.

BENEDICT, M.A. et E.T. MCMAHON, 2012. Green infrastructure: linking landscapes and communities. Island Press, Washington, 320 p.

BERKES, F. 2007. Understanding uncertainty and reducing vulnerability: lessons from resilience thinking, Natural Hazards, 41 : 283-295.

BERRY, P.M., S. BROWN, M. CHEN, A. KONTOGIANNI, O. ROWLANDS, G. SIMPSON et M. SKOURTOS, 2015. Cross-sectoral interactions of adaptation and mitigation measures. Climatic Change, 128 : 381-393.

BIRON, P.M., T. BUFFIN-BÉLANGER, M. LAROCQUE, G. CHONÉ, C.-A. CLOUTIER, M.-A. OUELLET, S. DEMERS, T. OLSEN, C. DESJARLAIS et J. EYQUEM, 2014. Freedom space for rivers: a sustainable management approach to enhance river resilience. Environmental management, 54 : 1056-1073.

BISSONNETTE, J.F., J. DUPRAS, C. MESSIER, M. LECHOWICZ, D. DAGENAIS, A. PAQUETTE, J. JAEGER et A. GONZALEZ, 2018. Moving forward in implementing green infrastructures: Stakeholder perceptions of opportunities and obstacles in a major North American metropolitan area. Cities, 81 : 61-70.

BRADFORD, A., 2008. Water policy for ecosystem integrity: Oak Ridges Moraine Conservation Plan, Ontario, Canada. Water International, 33 : 320-332.

BUURMAN, J. et R. PADAWANGI, 2017. Bringing people closer to water: integrating water management and urban infrastructure. Journal of Environmental Planning and Management, 60 : 1-18.

CADANESSO, M., S.T.A. PICKETT et K. SCHWARTZ. 2007. Spatial heterogeneity in urban ecosystems: Reconceptualizing land cover and a framework for classification. Frontiers in Ecology and the environment, 5 : 80-88.

CAIRNS, S., P. ARROS et S.J. O'NEILL, 2016. Incenting the Nature of Cities: Using financial approaches to support green infrastructure in Ontario. Sustainable Prosperity, Ottawa, 34 p.

CERIN, P., 2006. Bringing economic opportunity into line with environmental influence: A discussion on the Coase theorem and the Porter and van der Linde hypothesis. Ecological Economics, 56 : 209-225.

CHAN, K., L. HOSHIZAKI et B. KLINKENBERG, 2011. Ecosystem services in conservation planning: Targeted benefits vs. co-benefits or costs? PLoS ONE 6 (9) : e24378.

CHAPMAN, L.J. et D.F. PUTNAM, 1984. The physiography of southern Ontario, 3e édition, Toronto: Ontario Geological Survey, Ottawa, 270 p.

CITY OF VICTORIA, 2018. Stormwater management in Victoria. Engineering Department. Disponible en ligne à : http://www.victoria.ca/assets/Departments/Engineering~Public~Works/Images/Stormwater/SW_General_Fact%20Sheet-%20final.pdf. [Visité le 2018-08-07].

[CMM] COMMUNAUTÉ MÉTROPOLITAINE DE MONTRÉAL, 2017. Commission de l'aménagement. Portrait des inondations printanières de 2017 sur le territoire métropolitain, du cadre légal et des règles applicables en matière d'aménagement, de développement du territoire pour les plaines inondables. Volets 1 et 2 du mandat sur les inondations printanières de 2017, septembre 2017. Disponible en ligne à : http://cmm.qc.ca/fileadmin/user_upload/documents/20170915. [Visité le 2018-08-07].

CRESSWELL, J., 2006. Qualitative inquiry and research design: choosing among five approaches, 2e édition, Sage Publication, Thousand Oaks, 416 p.

[CUO] COMMUNAUTÉ URBAINE DE L'OUTAOUAIS, 2012. Schéma d'aménagement révisé de la Communauté urbaine de l'Outaouais, Service de la planification, adopté par le conseil de la C.U.O. le 14 octobre 1999, Entrée en vigueur le 5 janvier 2000, Compilation administrative au 15 juin 2012, 268 p.

DALE, V.H., A.E. LUGO, J.A. MACMAHON et S.T. PICKETT, 1998. Ecosystem management in the context of large, infrequent disturbances. Ecosystems, 1 (6) : 546-557.

DEMUZERE, M., K. ORRU, O. HEIDRICH, E. OLAZABAL, D. GENELETTI, H. ORRU, A.G. BHAVE, N. MITTAL, E. FELIU et M. FAEHNLE, 2014. Mitigating and adapting to climate change: Multi-functional and multi-scale assessment of green urban infrastructure. Journal of Environmental Management, 146 : 107-115.

DHAKAL, K.P. et L.R. CHEVALIER, 2016. Urban stormwater governance: the need for a paradigm shift. Environmental management, 57 : 1112-1124.

DUPRAS, J., C. DROUIN, P. ANDRÉ et A. GONZALEZ, 2015. Towards the establishment of a green infrastructure in the region of Montreal (Quebec, Canada). Planning Practice and Research, 30 : 355-375.

ELMQVIST, T., M. FRAGKIAS, J. GOODNESS, B. GÜNERALP, P.J. MARCOTULLIO, R.I. MCDONALD, S. PARNELL, M. SCHEWENIUS, M. SENDSTAD, K.C. SETO et C. WILKINSON (édit.), 2013. Urbanization, biodiversity and ecosystem services: challenges and opportunities: a global assessment. Springer Netherlands, Dordrecht, 755 p.

GÓMEZ-BAGGETHUN, E. et D.N. BARTON, 2013. Classifying and valuing ecosystem services for urban planning. Ecological Economics, 86 : 235-245.

GOVERNMENT OF ONTARIO, 2002. Oak Ridges Moraine conservation plan. Disponible en ligne à : http://www.mah.gov.on.ca/AssetFactory.aspx?did=11177. [Visité le 2018-08-07].

GUMB, D., J. GARIN, S. MEHROTRA et B. HENN, 2008. Watershed approach to integrating green and hard infrastructure: New York City's Staten Island Bluebelt. Proceedings of the Water Environment Federation, 2008 (6) : 951-958.

ICI RADIO-CANADA, 2017. Classés dans deux zones inondables, des sinistrés sont toujours dans l'incertitude, d'après un reportage de Florence Ngué-No, ICI Ottawa-Gatineau, 2 septembre 2017. Disponible en ligne à : https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1053710/maisons-zones-inondables-0-20-100-ans-sinistres-confusion-indemnisation-reconstruction-gatineau. [Visité le 2018-08-07].

KLINE, M. et B. CAHOON, 2010. Protecting river corridors in Vermont. Journal of the American Water Resources Association, 46 (2) : 227-236.

KOUSKY, C., S.M. OLMSTEAD, M.A. WALLS et M. MACAULEY, 2013. Strategically placing green infrastructure: cost-effective land conservation in the floodplain. Environmental science & technology, 47 (8) : 3563-3570.

LAMONTAGNE, M., L. ROY, L. OUIMET et G. CAVADIAS, 1982. Projet d'ouvrage de contrôle sur la rivière des Mille Îles : rapport d'enquête et d'audience publique. Bureau d'audiences publiques sur l'environnement, Québec, 167 p.

LANTHIER, C. et J. BERGERON, 2017. Zones inondables : une grande réflexion s'amorce. Radio-Canada. Disponible en ligne à : https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1034266/reflexions-zones-inondables-gatineau. [Visité le 2018-08-07].

LIAO, K.H, 2012. A theory on urban resilience to floods—a basis for alternative planning practices. Ecology and Society, 17 (4) : 48.

MARINO, M. et K. LAPINTIE, 2018. Exploring the concept of green infrastructure in urban landscape. Experiences from Italy, Canada and Finland. Landscape Research, 43 : 139-149.

MATTHEWS, T., A.Y. LO et J.A. BYRNE, 2015. Reconceptualizing green infrastructure for climate change adaptation: Barriers to adoption and drivers for uptake by spatial planners. Landscape and Urban Planning, 138 : 155-163.

MCCARTHY, D., G. WHITELAW, F. WESTLEY, D. CRANDALL et D. BURNETT, 2014. The Oak Ridges Moraine as a social innovation: strategic vision as a social-ecological interaction. Ecology and Society, 19 (1) : 48.

METROPOLITAN TORONTO AND REGION CONSERVATION AUTHORITY, 1980. Watershed plan. Disponible en ligne à : http://trca.on.ca/trca-user-uploads/WatershedPlan.pdf. [Visité le 2018-08-07].

MORISSETTE, P., P. OUELLETTE, N. EL-JABI, D. LEBLANC et J. ROUSSELLE, 1988. An economic assessment of the flood-plain zoning program in the Outaouais region, Série scientifique no 161, Environnement Canada, Sainte-Foy, 38 p. Disponible en ligne à : http://publications.gc.ca/collections/collection_2018/eccc/En36-502-161-eng.pdf. [Visité le 2018-03-07].

OUELLETTE, P., D. LEBLANC, N. EL-JABI et J. ROUSSELLE, 1988. Cost-benefit analysis of flood-plain zoning. Journal of Water Resources Planning and Management, 114 (3) : 326-334.

OURANOS, 2015. Vers l'adaptation. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec, Édition 2015, Montréal, 415 p.

PALMER, M.A., D.P. LETTENMAIER, N.L. POFF, S.L. POSTEL, B. RICHTER et R. WARNER, 2009. Climate change and river ecosystems: protection and adaptation options. Environmental management, 44 : 1053-1068.

PATTISON-WILLIAMS, J.K., J.W. POMEROY, P. BADIOU et S. GABOR, 2018. Wetlands, flood control and ecosystem services in the Smith Creek Drainage Basin: A case study in Saskatchewan, Canada. Ecological Economics, 147 : 36-47.

PORSE, E. 2014. Risk-based zoning for urbanizing floodplains. Water science and technology, 70 : 1755-1763.

RAYFIELD B., J. DUPRAS, X. FRANCOEUR, M. DUMITRU, D. DAGENAIS, J. VACHON, A. PAQUETTE, M. LECHOWICZ, C. MESSIER et A. GONZALEZ, 2015. Les infrastructures vertes : un outil d'adaptation aux changements climatiques pour le Grand Montréal. Fondation David Suzuki, 498 p. Disponible en ligne à : https://fr.davidsuzuki.org/publication-scientifique/infrastructures-vertes-outil-dadaptation-aux-changements-climatiques-grand-montreal/.

RONI, P. et T. BEECHIE (édit.), 2012. Stream and watershed restoration: A guide to restoring riverine processes and habitats. John Wiley & Sons, New Jersey, 332 p.

SAKSHI, V., 2009. Catastrophic risk and insurance. Management et Avenir, 7 : 225-240.

SEWELL, W.D. et L. ROUECHE, 1974. Peak load pricing and urban water management: Victoria, BC, a case study. Natural Resources Journal, 14 : 383-400.

SHARPE, D., A. PUGIN et S. PULLAN, 2004. Regional unconformities and the sedimentary architecture of the Oak Ridges Moraine area, southern Ontario. Canadian Journal of Earth Sciences, 41 (2) : 183-198.

[SPC] SÉCURITÉ PUBLIQUE CANADA, 2014. Rapport sur les plans et les priorités 2014-2015, Gouvernement du Canada. Disponible en ligne à : https://www.securitepublique.gc.ca/cnt/rsrcs/pblctns/rprt-plns-prrts-2014-15/index-fr.aspx?wbdisable=true. [Visité le 2018-03-07].

[SPC] SÉCURITÉ PUBLIQUE CANADA, 2017. Évaluation 2016-2017 des Accords d'aide financière en cas de catastrophe. Disponible en ligne à : https://www.securitepublique.gc.ca/cnt/mrgnc-mngmnt/rcvr-dsstrs/dsstr-fnncl-ssstnc-rrngmnts/index-fr.aspx. [Visité le 2018-03-07].

TREMBLAY, L., J. DROLET, A. BOUTIN, D. BROUILLETTE, D. CLOUTIER, E. DUFRESNE-ARBIQUE, I. JALBERT, A.-M. LAPOINTE, J. LEVASSEUR et G. MARQUIS, 2014. Diagnostic de la zone de gestion intégrée de l'eau par bassins versants du COBAMIL. Conseil des bassins versants des Milles-Îles (COBAMIL), Sainte-Thérèse, 184 p.

TZOULAS, K., K. KORPELA, S. VENN, V. YLI-PELKONEN, A. KAZMERCZAK, J. NIEMELA et P. JAMES, 2007. Promoting ecosystem and human health in urban areas using green infrastructure: A literature review. Landscape and Urban Planning, 81 : 167-178.

[USA-EPA] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2015. Green infrastructure opportunities that arise during municipal operations. Office of Wetlands, Oceans and Watersheds National Estuary Program. Disponible en ligne à : https://www.epa.gov/sites/production/files/2015. [Visité le 2018-03-07].

VILLE DE GATINEAU, 2007. Zones à risque d'inondation et territoire assujetti au processus de détermination des zones à risque d'inondation (carte), Règlement de zonage 502-25-2007, Gatineau, 1 p. Disponible en ligne à : http://www.gatineau.ca/docs/guichet_municipal/urbanisme_habitation/reglements_urbanisme/pdf/reglement_zonage/R_0502_25_2007.pdf. [Visité le 2018-08-07].

VILLE DE GATINEAU, 2015. Schéma d'aménagement et de développement révisé de la Ville de Gatineau, Règlement nº 2050-2015, p. 8-123. Disponible en ligne à : https://www.gatineau.ca/docs/guichet_municipal/urbanisme_habitation/revision_schema_amenagement_developpement/documents_references/20131002_saddr.fr-CA.pdf. [Visité le 2018-08-07].

WAHLUND, N., L. FLORES, J. REYNEVELD, J. STONE, A. LULLOFF et D. FOWLER, 2015. Advancing environmental benefits in benefit-cost analysis at the local level: FEMA Policy Impacts in Southern Wisconsin. Earth Economics, Tacoma, 45 p.