

## Évaluation multicritère des stratégies grises et bleues-vertes de gestion des eaux pluviales pour l'adaptation urbaine aux pluies extrêmes

Multicriteria evaluation of grey and blue-green stormwater management strategies for urban adaptation to extreme rainfall

McGrory, Melanie ; Marleau Donais, Francis ; Martel, Jean-Luc.

École de technologie supérieure - ÉTS Montréal

[melanie.mcgrory.1@ens.etsmtl.ca](mailto:melanie.mcgrory.1@ens.etsmtl.ca)

### RÉSUMÉ

L'intensification des pluies extrêmes liées aux changements climatiques surcharge les infrastructures pluviales conventionnelles, obligeant les municipalités à explorer des stratégies plus intégrées. Cette étude propose un cadre d'aide multicritère pour comparer des stratégies grises et des infrastructures vertes et bleues selon des dimensions techniques, environnementales, financières et sociales. Huit options sont évaluées sous un scénario d'investissement équivalent de 1 M\$ avec 14 critères. Les performances hydrauliques sont simulées avec un modèle PCSWMM calibré, sur un bassin versant urbain de 535 ha à Montréal, Canada. La méthode PROMETHEE permet d'établir la valeur globale des stratégies, dans une première application à un scénario d'investissement standardisé. Les résultats montrent que la biorétention, les parcs éponges et les jardins de pluie performant le mieux, tandis que les conduites surdimensionnées se classent dernières. Le cadre proposé offre un outil transparent et transférable pour guider la planification municipale adaptée aux pluies extrêmes.

### ABSTRACT

The intensification of extreme rainfall events due to climate change is making conventional stormwater systems increasingly inadequate, prompting municipalities to explore more adaptive strategies. This study develops a multicriteria decision-support framework to compare grey and blue-green stormwater strategies across technical, environmental, financial and social dimensions. Eight alternatives are evaluated under an equivalent 1M\$ investment scenario using 14 criteria. Hydraulic performances are simulated with a calibrated PCSWMM model applied to a 535-ha urban watershed in Montreal, Canada. The PROMETHEE method is used to determine the overall value of each strategy, in what constitutes a first application of this approach under a standardized investment scenario. The results show that bioretention, sponge parks and rain gardens perform best, while oversized conduits rank last. The proposed framework offers a transparent and transferable tool to support municipal planning and investment decisions for adaptation to extreme rainfall.

### MOTS CLÉS

Adaptation climatique, analyse multicritère, gestion intégrée des eaux pluviales, infrastructures vertes et bleues, modélisation hydraulique

---

## 1 INTRODUCTION

Les épisodes de pluies extrêmes s'intensifient sous l'effet des changements climatiques (Martel et al., 2021), dépassant de plus en plus souvent la capacité des réseaux d'égouts (Osseyrane and Rivard, 2011). Cette pression accrue pousse les municipalités à envisager des stratégies plus intégrées, telles que les infrastructures vertes et bleues (IVB), pour répondre à ces enjeux (Liu et al., 2021). Toutefois, la diversité des options disponibles, les contraintes budgétaires, le vieillissement des actifs et les exigences réglementaires compliquent considérablement la prise de décision à l'échelle d'un bassin versant urbain. Les approches multicritères sont de plus en plus mobilisées pour structurer ces choix, mais elles reposent souvent sur des analyses spatiales (Bousquet et al., 2023 ; Kuller et al., 2019) ou sur des projets individuels (Coulombe, 2021), plutôt que sur une comparaison détaillée des options dans un cadre d'investissement égal, adapté aux réalités des municipalités. La présente recherche vise à combler cette lacune en appliquant la méthode multicritère de surclassement PROMETHEE II (Brans and De Smet, 2016) à un bassin versant urbain de 535 hectares à Montréal, Canada. Huit stratégies grises, ainsi que vertes et bleues sont évaluées sous un investissement identique de 1 M\$, incluant conduites surdimensionnées (CS), chambres souterraines (CH), pavés perméables (PP), toits bleus (TB), toits verts (TV), jardins de pluie (JP), biorétention (BIO) et parcs éponges (PE). Cette standardisation permet une comparaison équitable reflétant la réalité de la planification municipale. L'objectif est de développer un cadre d'aide multicritère à la décision (AMCD) pour classer ces options selon leurs performances techniques, environnementales, financières et sociales, afin de soutenir la sélection de stratégies adaptées aux pluies extrêmes et cohérentes avec une approche de développement durable.

## 2 MÉTHODOLOGIE

La méthodologie repose sur une intégration entre la modélisation hydraulique (PCSWMM) des huit stratégies de gestion des eaux pluviales (SGEP) à l'échelle du bassin versant et une approche d'aide multicritère à la décision (AMCD) visant à comparer ces huit stratégies. L'AMCD comprend 14 critères élaborés à partir d'une revue de littérature et de consultations expertes, permettant de couvrir l'ensemble des dimensions techniques, environnementales, financières et sociales. Les critères quantitatifs et qualitatifs comprennent : volume de débordement, conformité réglementaire, pérennité et complexité d'entretien (critères techniques), qualité de l'eau, empreinte carbone, qualité de l'air, îlots de chaleur et biodiversité (critères environnementaux), coûts de maintenance (critère financier), puis sécurité routière, esthétique, bénéfiques pour la communauté et durée des travaux (critères sociaux). Les fonctions de préférence et les échelles d'évaluation sont définies pour traduire les différences de performance sur chacun de ces 14 critères en degrés de préférence (0 à 1). Le degré d'importance (poids) attribué à chaque critère a été attribué à l'aide de la méthode Simos révisée (Figueira and Roy, 2002), une méthode de pondération, afin de refléter les priorités municipales. L'analyse de surclassement PROMETHEE II est ensuite appliquée pour calculer les flux positifs, négatifs et nets (indices de dominance des stratégies), permettant d'obtenir le classement final des options. La robustesse du classement est examinée au moyen d'analyses de sensibilité portant sur les poids des critères et sur les coûts d'investissement ( $\pm 30\%$ ).

## 3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

### 3.1 PROMETHEE I (flux positifs et négatifs) et II (flux net)

L'analyse PROMETHEE II (Figure 1) permet de classer l'ensemble des options en fonction de leur flux net, où des valeurs positives indiquent qu'une stratégie surclasse plus souvent les autres qu'elle n'est surclassée. À l'inverse, un flux net négatif ne reflète pas une faiblesse intrinsèque de cette option, mais plutôt une performance relative moins favorable dans le contexte spécifique de ce bassin versant et du cadre d'investissement standardisé. Ainsi, la stratégie TV se classe plus bas, non pas en raison d'un manque de co-bénéfices, qui sont bien démontrés dans la littérature, mais puisque leur coût élevé limite leur impact à l'échelle du bassin versant. PROMETHEE II révèle une nette préférence pour les IVB, notamment les systèmes de BIO, PE et JP. Ces options obtiennent les flux nets les plus élevés, traduisant une performance intégrée supérieure lorsqu'on considère les dimensions technique, environnementale, financière et sociale. Cette performance résulte autant de leur capacité à gérer les eaux à la source que des co-bénéfices multiples qu'elles procurent, telle que l'amélioration de la qualité de l'eau, la réduction des îlots de chaleur, le soutien à la biodiversité et leur valeur esthétique. BIO est l'option la plus équilibrée : elle présente de solides performances hydrauliques, des bénéfices environnementaux importants et des coûts d'entretien modérés. Sa localisation dans l'emprise publique (bordures de rues, avancées de trottoir)

facilite aussi l'entretien et en fait un complément efficace au réseau mineur.

L'analyse complémentaire PROMETHEE I (flux positifs et négatifs) permet d'examiner les relations de dominance et d'incomparabilité (Figure 2). BIO et PE dominent la majorité des options, confirmant leurs avantages multidimensionnels. Toutefois, ces deux options sont incomparables entre elles, reflétant une situation de non-dominance stricte (Brans and De Smet, 2016). À l'opposé, CS obtiennent le flux positif le plus faible et le flux négatif le plus élevé, ce qui les place en position dominée par toutes les autres options. Leur adoption importante dans la pratique au Québec reflète l'influence des structures des programmes de financement provinciaux, plutôt que leur performance technique ou globale. Comme le montrent Marleau Donais et al. (2022) pour les projets de réfection de rues, les choix d'investissements sont aujourd'hui largement structurés par les mécanismes de financement, comme c'est le cas pour les SGEP. À l'inverse, les IVB dépendent de programmes de financement plus restreints, dont la pérennité est incertaine. Les PP présentent un profil contrasté ; ils affichent le flux positif le plus élevé, mais également un flux négatif presque équivalent, traduisant des forces hydrauliques marquées, mais aussi des faiblesses environnementales et sociales importantes. Ce type de configuration se traduit par une forte incomparabilité, ce qui est le cas ici pour PP, qui n'est comparable qu'aux CS.

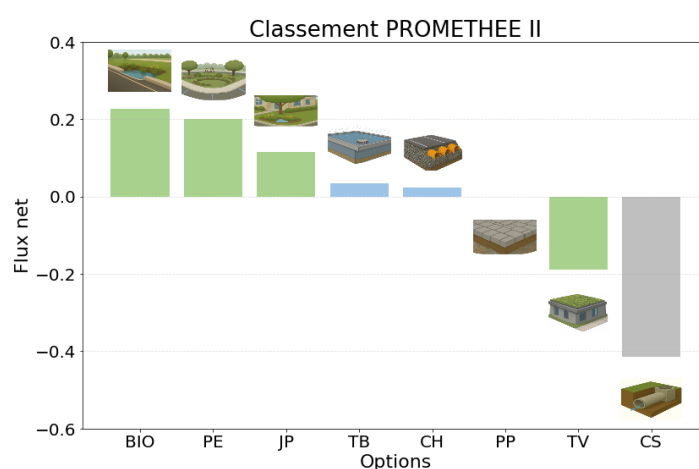


Figure 1. Classement PROMETHEE II, flux positifs (option dominante) et négatifs (dominée)

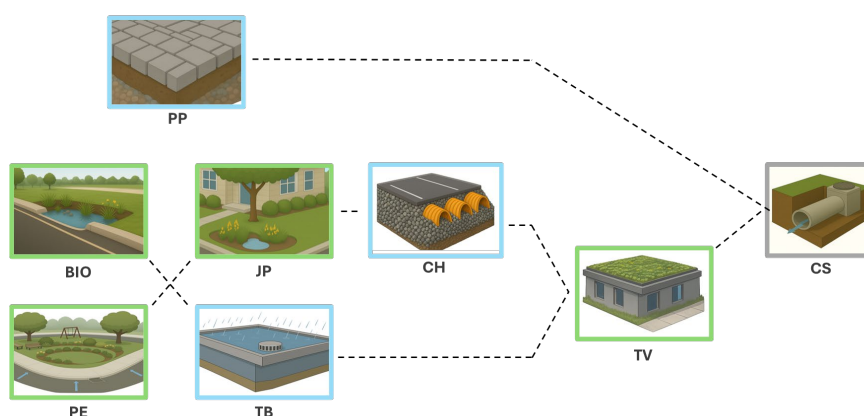


Figure 2. Classement PROMETHEE I, positions dominantes (gauche), dominées (droite) et non comparables des huit options selon PROMETHEE I ; les nœuds non reliés indiquent une incomparabilité.

### 3.2 Analyses de sensibilité

Les analyses de sensibilité sur la pondération des critères et les coûts d'investissement ( $\pm 30\%$ ) confirment la robustesse du classement. Les trois options les mieux classées (BIO, PE et JP) maintiennent leurs positions dominantes, tandis que les CS demeurent en dernière position. Les options intermédiaires présentent des variations plus marquées, notamment les PP, dont la performance oscille en raison de leur fort contraste entre

---

l'efficacité hydraulique et les impacts environnementaux.

## 4 CONCLUSION

Les résultats reflètent le contexte particulier du bassin versant urbain analysé et illustrent la manière dont le cadre méthodologique proposé permet de comparer des stratégies d'adaptation pluviale à l'échelle territoriale. Pour interpréter ces résultats, il est essentiel de considérer conjointement les analyses PROMETHEE I et II, qui révèlent non seulement le classement des options, mais aussi les relations de dominance et d'incomparabilité. Les analyses montrent que les BIO et PE dominent, mais qu'elles sont incomparables, ce qui indique l'existence de stratégies dominantes multiples plutôt qu'une unique stratégie optimale. Dans cette perspective, une avenue pertinente pour la planification municipale consisterait à développer des portefeuilles d'options, combinant plusieurs IVB pour optimiser la performance globale selon les objectifs municipaux.

Au-delà du cas étudié, l'un des principaux apports de ce travail réside dans la flexibilité et transférabilité du cadre proposé. La démarche intégrée, qui combine modélisation hydraulique et AMCD peut être adaptée à une variété de contextes urbains ou ruraux selon la disponibilité des données, les outils employés et le niveau de précision requis. Bien que PCSWMM ait été utilisé dans cette étude pour quantifier la performance technique, la structure décisionnelle demeure applicable avec d'autres modèles hydrologiques ou des approches simplifiées lorsque les données sont limitées. Le choix du modèle doit ainsi refléter la qualité de l'information disponible. Cette logique s'applique également au choix de l'AMCD, qui doit être cohérente à la nature du problème traité.

Dans de futures applications, la pondération pourrait être réalisée dans une démarche participative impliquant des acteurs municipaux ou communautaires, pour mieux refléter les priorités locales. D'autres dimensions méritent d'être approfondies, notamment l'influence des pratiques d'entretien et du climat froid sur la performance des IVB dans le classement. Enfin, des approches multiobjectifs constitueraient un prolongement naturel de ce cadre pour identifier des configurations plus efficaces à l'échelle du bassin versant.

## BIBLIOGRAPHIE

- Bousquet, M., Kuller, M., Lacroix, S., Vanrolleghem, P. A., 2023. A critical review of multicriteria decision analysis practices in planning of urban green spaces and nature-based solutions. *Blue-Green Systems* 5, 200–219. <https://doi.org/10.2166/bgs.2023.132>
- Brans, J. —P., de Smet, Y., 2016. PROMETHEE Methods, in: Greco, S., Ehrgott, M., Figueira, J.R. (Eds.), *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. Springer, New York, NY, p. 187–219. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4\\_6](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4_6)
- Coulombe, A., 2021. Évaluation de mesures d'adaptation aux inondations avec PCSWMM et PROMETHEE pour un très petit bassin versant (masters). École de technologie supérieure.
- Figueira, J., Roy, B., 2002. Determining the weights of criteria in the ELECTRE type methods with a revised Simos' procedure. *European Journal of Operational Research, EURO XVI: O.R. for Innovation and Quality of Life* 139, 317–326. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(01\)00370-8](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00370-8)
- Kuller, M., Bach, P.M., Roberts, S., Browne, D., Deletic, A., 2019. A planning-support tool for spatial suitability assessment of green urban stormwater infrastructure. *Science of the Total Environment* 686, 856–868. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.051>
- Liu, T., Lawluy, Y., Shi, Y., Yap, P.S., 2021. Low Impact Development (LID) Practices: A Review on Recent Developments, Challenges and Prospects. *Water, Air, and Soil Pollution* 232. <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05262-5>
- Marleau Donais, F., Abi-Zeid, I., Waygood, E. O. D., Lavoie, R., 2022. Municipal decision-making for sustainable transportation: Towards improving current practices for street rejuvenation in Canada. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 156, 152–170. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.12.009>
- Martel, J. —L., Brissette, F. P., Lucas-Picher, P., Troin, M., Arsenault, R., 2021. Climate Change and Rainfall Intensity—Duration—Frequency Curves: Overview of Science and Guidelines for Adaptation. *Journal of Hydrologic Engineering* 26, 03121001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0002122](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002122)
- Osseyrane, M., Rivard, G., 2011. Guide de gestion des eaux pluviales — Stratégies d'aménagement, principes de conception et pratiques de gestion optimales pour les réseaux de drainage en milieu urbain.