

Planification spatiale des infrastructures vertes-bleues : quelle est l'importance des préférences des parties prenantes ?

Spatial planning of blue-green infrastructure: How important are stakeholder preferences?

S. Lacroix ^a, M. Kuller ^b, D. Dagenais ^c & F. Bichai ^a

^a Département des génies civil, géologique et des mines (CGM), École Polytechnique de Montréal sandrine.lacroix@etud.polymtl.ca, fbichai@polymtl.ca

^b Copernicus Institute of Sustainable Development, Faculty of Geosciences, Utrecht University m.kuller@uu.nl

^c Faculté de l'Aménagement, École d'urbanisme et d'architecture de paysage, Université de Montréal danielle.dagenais@umontreal.ca

RÉSUMÉ

Les outils combinant systèmes d'information géographique (SIG) et analyse décisionnelle multicritère (ADMC) offrent un fort potentiel pour soutenir la planification spatiale des infrastructures vertes-bleues (IVB). Ils permettent d'intégrer une diversité de critères tout en tenant compte des préférences des parties prenantes (PP), produisant ainsi des cartes interprétables pour la décision. Cette étude examine l'impact de l'intégration des préférences des PP dans la planification urbaine des IVB via l'outil SIG-ADMC SSANTO adapté au Québec (Canada). Les préférences constituent une source d'incertitude : il est pertinent de savoir si l'effort investi pour les déterminer est justifié par leur influence sur les résultats. Des ateliers ont permis de co-créditer et d'opérationnaliser les objectifs, puis de définir les poids relatifs attribués par les PP. Une analyse d'incertitude et de sensibilité globale, basée sur 90 000 simulations Monte Carlo, a évalué l'impact de ces paramètres sur les cartes d'adéquation spatiale. Les résultats suggèrent que la collecte des préférences pourrait être optimisée selon leur influence réelle, tout en confirmant que l'implication des PP reste essentielle. Ces conclusions fournissent des informations clés pour guider la planification stratégique et améliorer l'efficacité des outils SIG-ADMC pour la mise en œuvre des IVB.

ABSTRACT

Geographic Information Systems (GIS) combined with Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) tools hold strong potential to support the spatial planning of blue-green infrastructure (BGI). They allow for the integration of diverse criteria while considering stakeholder preferences, producing maps that are interpretable for decision-making. This study examines the impact of integrating stakeholder preferences into urban BGI planning using the GIS-MCDA tool SSANTO, adapted for Québec, Canada. Preferences constitute a source of uncertainty, raising the question of whether the effort invested in eliciting them is justified by their influence on the results. Workshops were conducted to co-create and operationalize objectives and to determine the relative weights assigned by stakeholders. A global uncertainty and sensitivity analysis, based on 90,000 Monte Carlo simulations, assessed the impact of these parameters on spatial suitability maps. The results suggest that the collection of preferences could be optimized according to their actual influence, while confirming that stakeholder involvement remains essential. These findings provide key insights to guide strategic planning and enhance the effectiveness of GIS-MCDA tools for BGI implementation.

KEYWORDS

Analyse de sensibilité, infrastructures vertes-bleues, outil de planification spatiale (SIG-ADMC), préférences de parties prenantes

1 INTRODUCTION

La planification urbaine des infrastructures vertes et bleues (IVB) pour la gestion des eaux pluviales mobilise une grande variété de disciplines en raison de leur nature multi-objectifs. L'intégration des préférences des parties prenantes (PP) dans le processus de planification des IVB est essentielle pour répondre adéquatement à la multifonctionnalité de ces systèmes [1]. Toutefois, la manière d'intégrer et de déterminer ces préférences demeure un défi [2].

Les outils basés sur l'analyse décisionnelle multicritère (ADMC) et les systèmes d'information géographique (SIG) peuvent soutenir les acteurs en prenant en compte une variété de critères tout en intégrant leurs préférences sous forme de poids [2]. Cependant, dans la pratique, les PP sont souvent impliquées uniquement lors de la phase de pondération des critères, alors qu'elles sont peu intégrées dans la structuration même du problème décisionnel, une étape pourtant cruciale dans le développement de tels outils [3,4].

De plus, ces outils comportent des incertitudes inhérentes, notamment parce qu'ils reposent sur des jugements et des préférences humaines. Les poids sont généralement considérés comme l'une des principales sources d'incertitude dans les modèles [5,6] et comme les plus faciles à faire varier, ce qui explique pourquoi ils sont les plus étudiés. Toutefois, se concentrer uniquement sur ces poids conduit à négliger de nombreuses autres sources d'incertitude présentes dans l'ensemble du processus décisionnel [7]. Comprendre comment ces incertitudes se propagent dans les modèles et comment les différents paramètres d'entrée interagissent permet aux PP d'évaluer l'impact réel de leurs préférences sur les solutions proposées, et ainsi de prendre des décisions plus éclairées.

Cette recherche vise à informer les PP de l'importance de leurs préférences dans les résultats (p. ex., cartes d'adéquation spatiale fournissant un score de 0 à 1 pour chaque pixel) d'un outil SIG-ADMC pour la planification urbaine des IVB. À partir des résultats des analyses, nous cherchons à :

- (i) Comprendre les préférences des PP provenant de différents domaines : Quels objectifs souhaitent-elles voir intégrés dans un outil SIG-ADMC de planification spatiale des IVB? Comment souhaitent-elles opérationnaliser ces objectifs (c.-à-d., pour qu'ils soient mesurables spatialement) ? Quelles sont leurs préférences quant à l'importance relative accordée à chacun de ces objectifs ?
- (ii) Identifier les paramètres d'entrée de l'outil SIG-ADMC ayant le plus d'influence : Quels paramètres d'entrée fondés sur les préférences des PP ont le plus d'impact sur les cartes d'adéquation spatiale des IVB ? Les efforts de détermination des préférences réalisés en (i) sont-ils justifiés au regard de leur influence réelle sur les résultats ?

2 METHODOLOGIE

2.1 Outil SIG-ADMC

Nous utilisons SSANTO (Spatial Suitability ANalysis Tool) [8], un outil initialement développé à Melbourne (Australie). L'approche adoptée repose sur l'adaptation et le développement d'outils existants, permettant de tirer parti des ressources disponibles et de valoriser leur réutilisation. Alors que la plupart des outils sont conçus à partir d'une seule étude de cas [3], nous adaptons ici SSANTO au contexte québécois (Canada). SSANTO évalue les meilleures *opportunités* du territoire pour implanter une IVB et les *besoins* du territoire en matière de bénéfices à tirer des IVB.

En ADCMC, la fonction d'agrégation combine les préférences inter- (poids des objectifs) et intra-objectifs (échelles de valeurs ; expliquées à la section 2.3) pour produire un score global facilitant la comparaison des solutions. Elle repose généralement sur une moyenne pondérée additive, où le score global est la somme des contributions pondérées de chaque objectif [6]. Cependant, cette approche ne reflète pas toujours fidèlement les préférences des PP et certaines hypothèses d'additivité peuvent être contestées en pratique [6].

2.2 Phase d'ateliers 1 : La co-création des objectifs avec les parties prenantes

Définir des objectifs reflétant ce qui importe réellement aux PP est essentiel pour aborder stratégiquement un problème décisionnel, comme le souligne la *pensée axée sur les valeurs* [10]. Nous avons élaboré une liste maîtresse de critères à partir de quatre sources : (1) la version originale de SSANTO, (2) un arbre de décision développé pour le sud du Québec [9], (3) les lignes directrices nord-américaines pour les IBV, et (4) la littérature et des projets parallèles. Ces critères ont été transformés en objectifs via un réseau moyens-fins [11], en

distinguant objectifs fondamentaux (poursuivis pour eux-mêmes) et objectifs moyens (moyens pour atteindre les objectifs fondamentaux), ce qui a permis d'identifier relations, complémentarités et redondances. Nous avons ensuite co-créé et validé ces hiérarchies d'objectifs pour différents groupes d'IBV lors de deux ateliers en présentiel en janvier 2023, réunissant 37 parties prenantes provenant des villes de Trois-Rivières et Montréal, de ministères provinciaux et de diverses organisations régionales et locales (ONG, instituts de santé publique, infrastructures urbaines, transports publics, climat et biodiversité) [12].

2.3 Phase d'ateliers 2 : L'opérationnalisation des objectifs avec les experts

Nous avons validé les attributs pour mesurer les objectifs identifiés à la phase d'ateliers 1 avec 17 experts locaux et identifié de nouveaux attributs pour 21 objectifs. Nous avons collecté ensuite 79 jeux de données pour représenter spatialement ces attributs dans l'outil, pour différents types d'IBV. Des consultations en ligne (12) ont permis de construire ce qu'on appelle les « échelles de valeurs » des attributs mesurables, c'est-à-dire standardiser les jeux de données spatiales sur une échelle de 0 à 1 pour juger de la performance des sites (pixels) à répondre à chaque objectif. Par exemple, pour réduire les coûts liés à la topographie dans les biorétentions, les pentes de 1,5 à 2 % sont considérées comme idéales (note d'adéquation : 1), celles de 5 % sont légèrement moins favorables (note : 0,75), et l'adéquation diminue progressivement jusqu'à 0 pour des pentes atteignant 20 %.

2.4 Phase d'ateliers 3 : La pondération des objectifs avec les parties prenantes

Nous avons déterminé les poids des objectifs, reflétant l'importance relative des objectifs, de 32 parties prenantes (secteurs eau, environnement, génie, etc.), dans deux études de cas différentes via un nouvel outil en ligne basé sur la méthode de pondération swing [13], à travers deux ateliers en ligne réunissant des parties prenantes académiques, professionnelles et gouvernementales de deux villes québécoises [14]. On a pu étudier quelles sont les préférences individuelles pour les objectifs de planification des IBV ? Existe-t-il des différences (consensus) dans les poids attribués par différents acteurs ? Les préférences varient-elles selon le type d'IBV et les objectifs de localisation ? Comment ces préférences se rapportent-elles à des variables comme le champ d'action, le domaine d'expertise ou la profession ?

2.5 Analyse de sensibilité et incertitudes

Nous avons réalisé une analyse d'incertitude (AI) et une analyse de sensibilité (AS) de 22 paramètres d'entrée liés aux préférences dans l'outil SSANTO [14], en appliquant le cadre hiérarchique développé à la phase d'ateliers 1 pour les petits systèmes (biorétention, noue et système d'infiltration) et les *besoins* du territoire à un secteur urbain du Québec. L'AI quantifie la variabilité des résultats due aux incertitudes des paramètres d'entrée, tandis que l'AS évalue leur influence sur les résultats, y compris les interactions entre critères [15]. Nous avons fait varier la forme des échelles de valeur, les poids des objectifs et un paramètre de non-additivité de la fonction d'agrégation à travers 90 000 simulations en utilisant la méthode de Monte Carlo à partir de distributions de probabilité spécifiques à chaque paramètre. À partir des cartes d'adéquation spatiale générées, nous avons calculé pour chaque pixel les valeurs minimale, maximale, moyenne et l'écart-type (résultats de l'AI).

L'analyse de sensibilité globale, plus adaptée que l'analyse locale, repose sur la variance et permet d'explorer toutes les combinaisons possibles de paramètres et d'évaluer les interactions entre eux. Deux indices de sensibilité sont calculés pour chaque pixel : (i) un indice de sensibilité traduisant l'effet individuel de chaque paramètre et (ii) un indice de sensibilité traduisant l'effet combiné d'un paramètre avec d'autres, en utilisant la méthode de Sobol [16], reconnue comme la plus efficace pour estimer ces indices. Cette approche permet de produire des cartes de sensibilité montrant l'impact de chaque paramètre et de leurs interactions sur l'adéquation spatiale.

3 RESULTATS

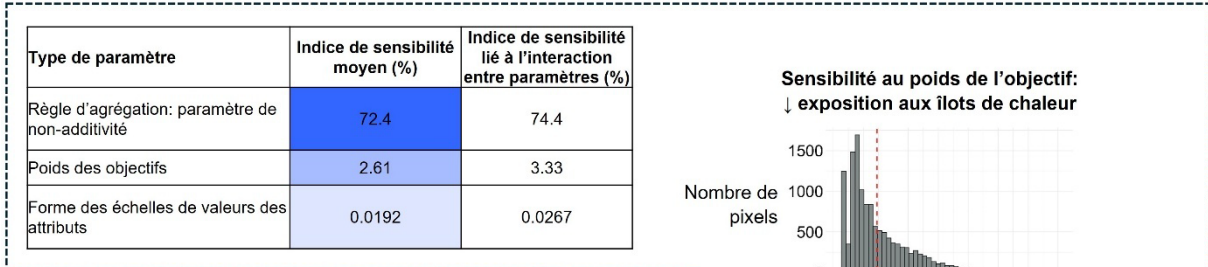
3.1 Quel est l'impact de ces préférences sur les résultats ?

La détermination des poids et des échelles de valeur pour les objectifs est longue et exigeante pour les experts et parties prenantes. Notre analyse de sensibilité globale montre que, parmi tous les paramètres, le paramètre d'agrégation non-additive a l'influence la plus forte sur les résultats, bien plus que les poids des objectifs ou la forme des échelles de valeur (Figure 1). Les poids restent néanmoins significatifs, notamment pour certains objectifs clés, justifiant une attention particulière lors de leur détermination. Les échelles de valeur, en revanche, influencent peu les résultats, suggérant que des méthodes simplifiées (par exemple, déterminer seulement leur

forme) suffisent pour leur définition.

Les résultats de l'analyse d'incertitude montrent que certaines zones peuvent varier de totalement inadaptées à très adaptées selon les paramètres, tandis que d'autres restent stables, mettant en évidence l'importance de considérer l'incertitude pour identifier les zones robustes et fiables pour la planification des IVB.

(i) Analyse de sensibilité



(ii) Analyse d'incertitudes

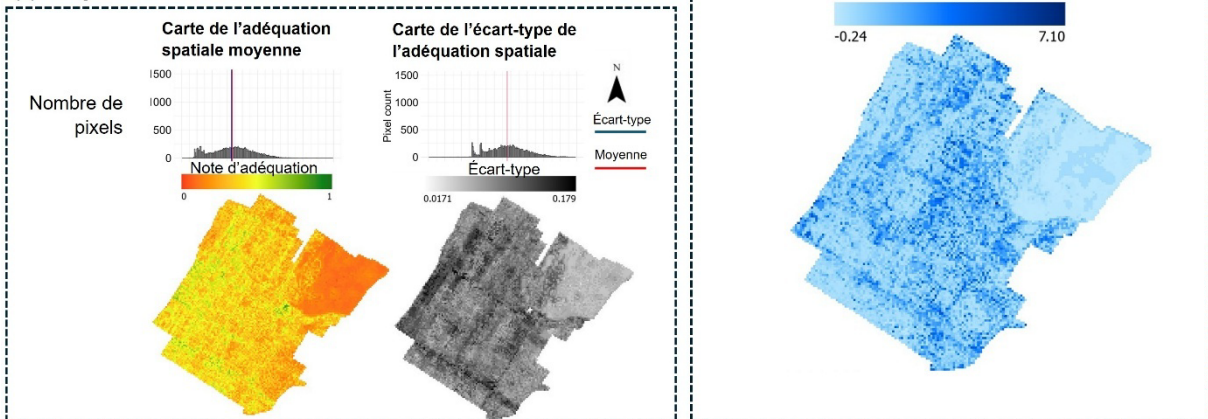


Figure 1. Résultats de l'analyse de sensibilité et d'incertitudes des paramètres d'entrée basés sur les préférences des parties prenantes dans un outil SIG-ADMC de planification spatiale des IVB. Le tableau (i) montre le classement des indices de sensibilité selon le type de paramètre d'entrée. La carte de droite (i) montre un exemple de carte de sensibilité pour le paramètre d'entrée « poids de l'objectif *minimiser l'exposition aux îlots de chaleur* » où on peut voir quelles zones sont les plus sensibles et comment la sensibilité varie spatialement. Les cartes de l'analyse d'incertitudes (ii) montrent à quel point les notes d'adéquation spatiales varient sous 90 000 simulations de l'outil SIG-ADMC, montrant que l'outil est assez stable.

4 CONCLUSION

Cette recherche a évalué l'influence des préférences des PP sur les résultats d'un outil SIG-ADMC de planification spatiale des IVB, soulignant l'importance de leur participation tout en alertant les développeurs d'outils sur certaines simplifications courantes, comme l'hypothèse d'additivité dans les fonctions d'agrégation en ADMC. Les résultats montrent que ce paramètre devrait être prioritairement déterminé avec les PP, suivi des poids des objectifs. Ces enseignements guideront les municipalités et les développeurs dans l'optimisation de la détermination des préférences pour la planification spatiale des IVB. Les outils SIG-ADMC représentent une solution prometteuse sous le contexte des changements climatiques et de la pression liée à l'urbanisation croissante pour soutenir la mise en œuvre des IVB tout en maximisant leurs bénéfices socio-environnementaux. Pour garantir leur usage fiable, les analyses d'incertitude et de sensibilité sont essentielles : elles permettent de comprendre le comportement et les limites de l'outil, d'identifier les paramètres les plus influents, de prioriser les données à collecter, de simplifier l'outil pour des contextes à ressources limitées et d'évaluer l'impact des choix des PP, fournissant ainsi des informations précieuses pour une planification stratégique des IVB.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Hansen, R., & Pauleit, S. (2014). *From Multifunctionality to Multiple Ecosystem Services? A Conceptual Framework for Multifunctionality in Green Infrastructure Planning for Urban Areas*. *Ambio*, 43, 516-529. doi:10.1007/s13280-014-0510-2
- [2] Ferretti, V., & Montibeller, G. (2016). *Key challenges and meta-choices in designing and applying multi-criteria spatial decision support systems*. *Decision Support Systems*, 84, 41-52. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.dss.2016.01.005>
- [3] Bousquet, M., Kuller, M., Lacroix, S., & Vanrolleghem, P. A. (2023). A critical review of MCDA practices in planning of urban green spaces and NBS. *Blue-Green Systems*, 00(0). <https://doi.org/10.2166/bgs.2023.132>
- [4] Malczewski, J., & Jankowski, P. (2020). *Emerging trends and research frontier in spatial multicriteria analysis*. *International Journal of Geographical Information Science*, 34(7), 1257-1282. doi:<https://doi.org/10.1080/13658816.2020.1712403>
- [5] de Brito, M. M., Almoradie, A., & Evers, M. (2019). *Spatially-explicit sensitivity and uncertainty analysis in a MCDA-based flood vulnerability model*. *International Journal of Geographical Information Science*, 33(9), 1788-1806. doi:10.1080/13658816.2019.1599125
- [6] Haag, F., Aubert, A. H., & Lienert, J. (2022). ValueDecisions, a web app to support decisions with conflicting objectives, multiple stakeholders, and uncertainty. *Environmental Modelling and Software* 150. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105361>
- [7] Ligmann-Zielinska, A., & Jankowski, P. (2014). *Spatially-Explicit Integrated Uncertainty and Sensitivity Analysis of Criteria Weights in Multicriteria Land Suitability Evaluation*. *Environmental Modelling & Software*, 57, 235-247. doi:10.1016/j
- [8] Kuller, M., M.Bach, P., 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. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.06.051
- [9] Dagenais, D., Thomas, I., & Paquette, S. (2017). Siting green stormwater infrastructure in a neighbourhood to maximise secondary benefits: lessons learned from a pilot project. *Landscape Research*, 42(2), 195-210.
- [10] Keeney, R. L. (1996). *Value-focused thinking a path to creative decision making*. MA: Harvard University Press. https://books.google.ca/books?hl=fr&lr&id=WtNASm7O3fQC&oi=fnd&pg=PA3&ots=oRrBIWMjSY&sig=XA4qRsQaYkPBNYqO4VZRjR9p9wE&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- [11] Marttunen, M., Haaga, F., Belton, V., Mustajoki, J., & Lienert, J. (2019). Methods to inform the development of concise objectives hierarchies in multi-criteria decision analysis. *European Journal of Operational Research*, 277, 604-620. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.02.039>
- [12] Lacroix, S., Kuller, M., Gougeon, G., Petrucci, J., Lemieux-Chalifour, F., Rioux, A., Dagenais, D., & Bichai, F. (2024). Can we stop reinventing the wheel in blue-green infrastructure planning? Using value-focused thinking to enable transferability of a multicriteria planning support system. *Landscape and Urban Planning*, 252. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2024.105188>
- [13] Eisenführ, F., Weber, M., & Langer, T. (2010). *Rational Decision Making*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-02851-9>
- [14] Lacroix, S., Kuller, M., Aubert, A., Dagenais, D., & Bichai, F. (2025). Uncovering stakeholder preferences for urban blue-green infrastructure siting: Insights from online swing weights elicitation. *Cities*, Ongoing publication.
- [15] Saltelli, A., Aleksankina, K., Becker, W., Fennell, P., Ferretti, F., Holst, N., . . . Wu, Q. (2019). *Why so many published sensitivity analyses are false: A systematic review of sensitivity analysis practices*. *Environmental Modelling & Software*, 114, 29-39. doi:10.1016/j.envsoft.2019.01.012
- [16] Sobol, I. M. (1993). *Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models*. *Mathematical Modeling and Computational Experiment*, 1, 407-414.