

Quelles stratégies d'adaptation face aux inondations urbaines?

Une approche multicritère pour aider la planification municipale



Vers des villes résilientes : l'adaptation climatique des infrastructures
22 avril 2026

Melanie McGrory, M.Sc.A, CPI

Francis Marleau Donais, Ing. Ph.D.



ÉCOLE DE
TECHNOLOGIE
SUPÉRIEURE
Université du Québec



**NSERC
CRSNG**



Contexte municipal

- Vieillesse des infrastructures urbaines (réseau pluvial ou unitaire)
 - Pressions croissantes liées aux changements climatiques (événements de pluie extrême et inondations)
 - Contraintes budgétaires et réglementaires
- Ces contraintes influencent fortement la **priorisation** des projets d'infrastructure



Image générée par DALL-E 3 (OpenAI, 2025) illustrant les principaux défis auxquels font face les municipalités : vieillissement des infrastructures urbaines, ressources financières limitées, pressions croissantes liées aux changements climatiques et besoin d'investissements stratégiques et durables. <https://openai.com/dall-e>

Adaptation des stratégies d'investissement

Les changements climatiques imposent un changement de paradigme:

- Structurer la décision autour des différentes dimensions décisionnelles
- Prioriser les projets en fonction de leur performance globale

Besoin de nouveaux outils d'aide à la décision

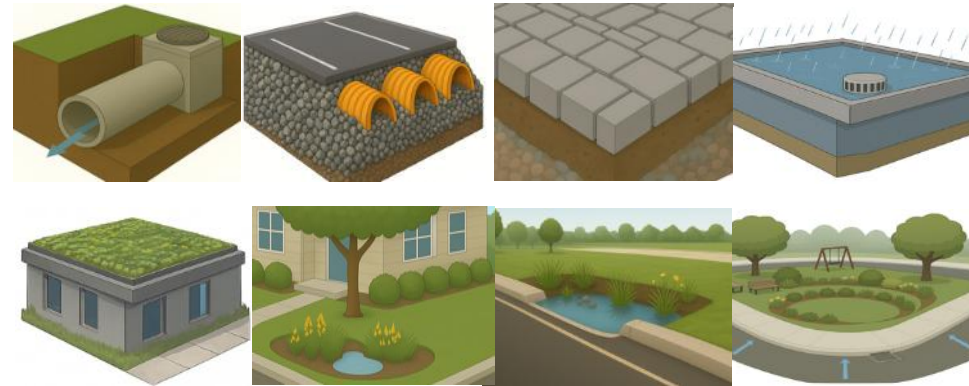


Image générée par DALL-E 3 (OpenAI, 2025) illustrant la transition vers une approche multicritère dans la prise de décision municipale, intégrant les dimensions technique, environnementale, sociale et économique dans un contexte de changements climatiques..
<https://openai.com/dall-e>

Projet d'aide multicritère à la décision appliqué aux inondations urbaines

Objectif:

Évaluer et classer les 8 options d'infrastructures afin d'identifier **l'investissement le plus approprié** en considérant plusieurs critères



Comment?

- À l'aide de la combinaison de deux outils complémentaires:



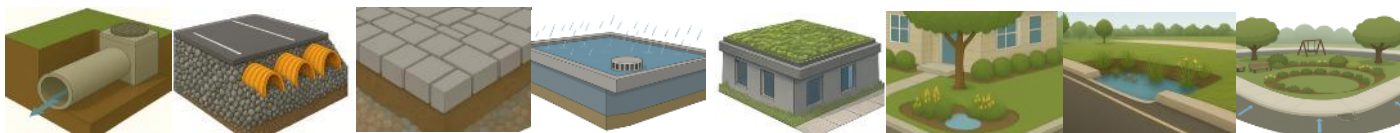
+



P R O M E T H E E
M E T H O D S

Le projet de recherche

Performance variable à investissement égal (1 M\$)



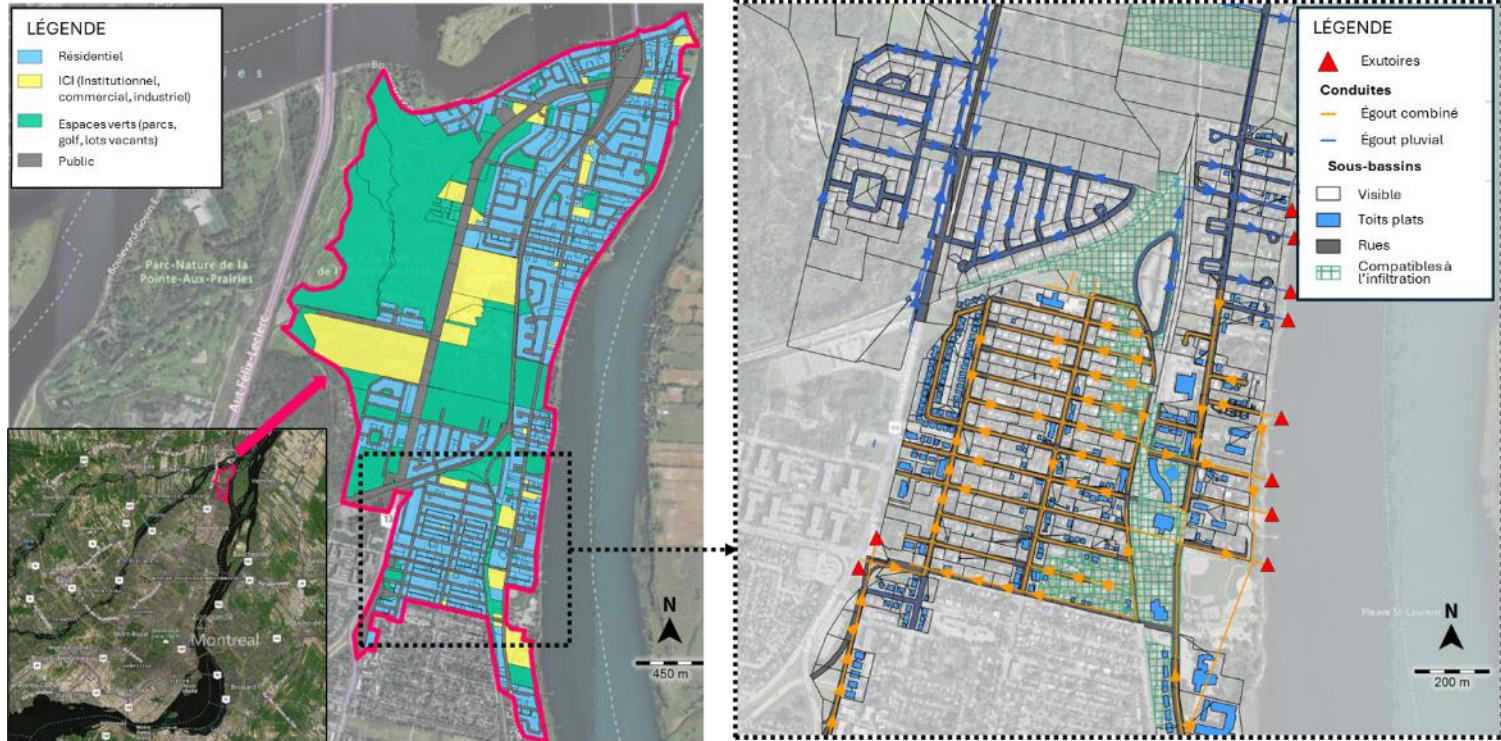
14 critères analysés

PCSWMM

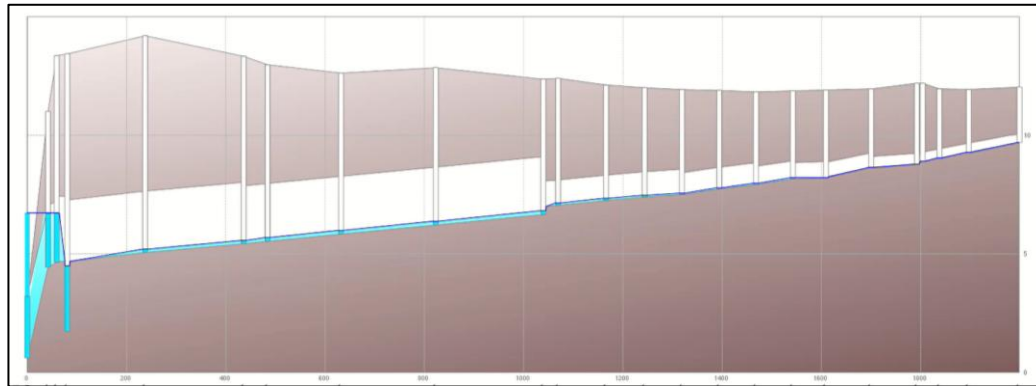
openLca
FROM THE BERNDIAN GROUP

Étude de cas: Pointe-Aux-Trembles, Montréal

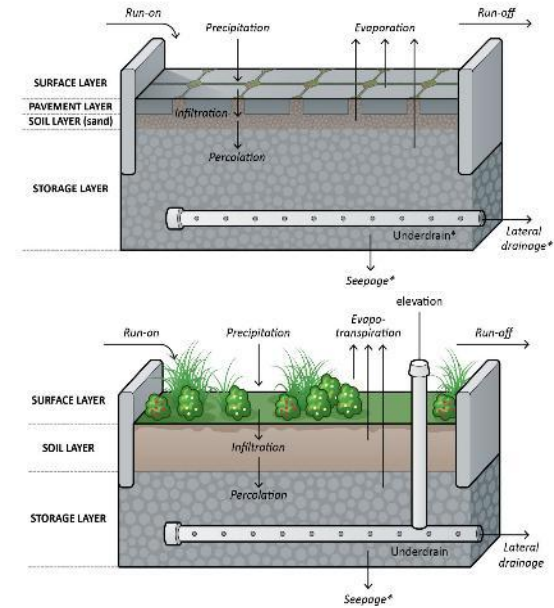
- Modèle calibré: PCSWMM (Site d'étude: 535 ha)



Modèle PCSWMM



Profil hydraulique du système de drainage mineur (PCSWMM)

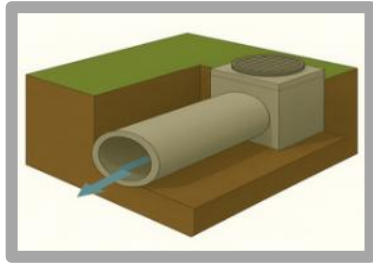


CHI (Computational Hydraulics Inc.). (2025). PCSWMM Cross-Section Library. Disponible à : <https://support.chiwater.com/pcswmm>

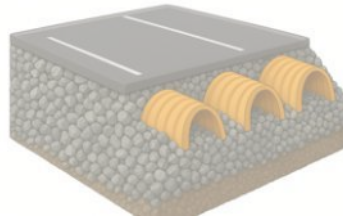
Coupes transversales des infrastructures dans PCSWMM

Objectif de recherche : Choisir l'investissement en infrastructure

- Évaluer et classer les 8 options d'infrastructures afin d'identifier l'investissement le plus approprié



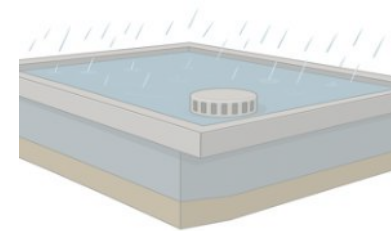
1. Conduites surdimensionnées



2. Chambres souterraines



3. Pavés perméables



4. Toits bleus



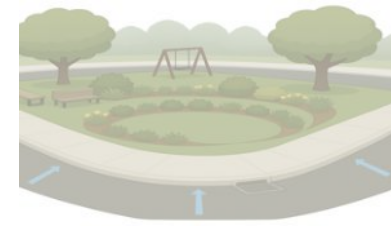
5. Toits verts



6. Jardins de pluie



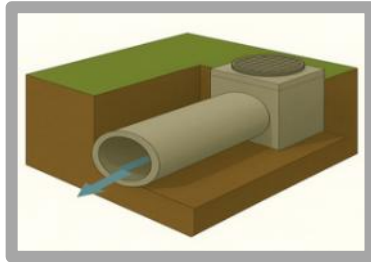
7. Biorétention



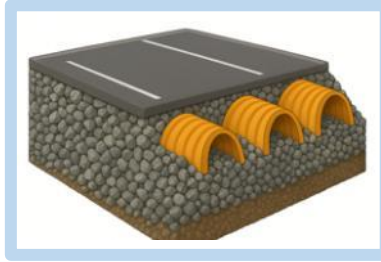
8. Parcs éponge

Objectif de recherche : Choisir l'investissement en infrastructure

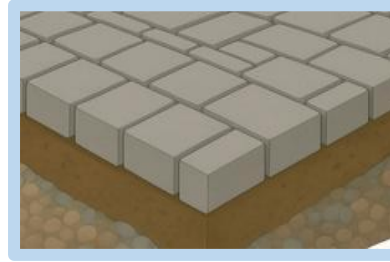
- Évaluer et classer les 8 options d'infrastructures afin d'identifier l'investissement le plus approprié



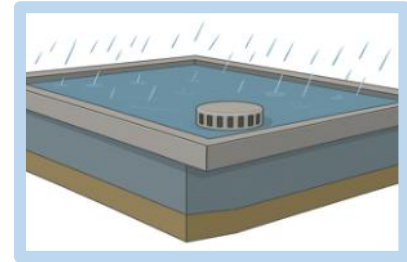
1. Conduites surdimensionnées



2. Chambres souterraines



3. Pavés perméables



4. Toits bleus



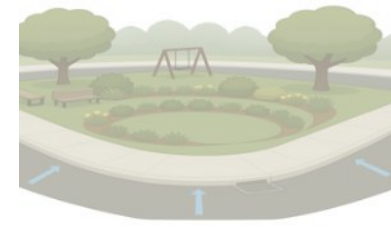
5. Toits verts



6. Jardins de pluie



7. Biorétention

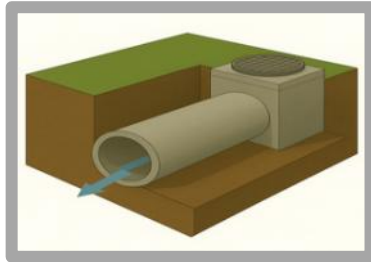


8. Parcs éponge

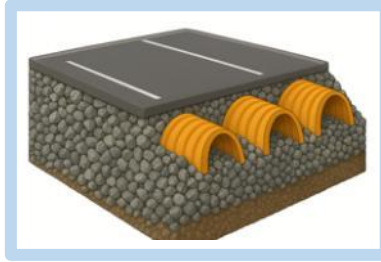
Infrastructures bleues: emmagasinent l'eau de pluie excédentaire et retardent son rejet

Objectif de recherche : Choisir l'investissement en infrastructure

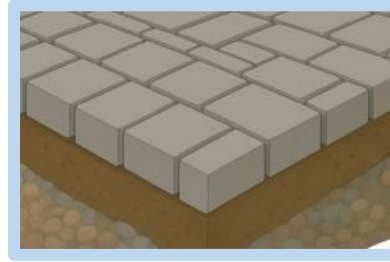
- Évaluer et classer les 8 options d'infrastructures afin d'identifier l'investissement le plus approprié



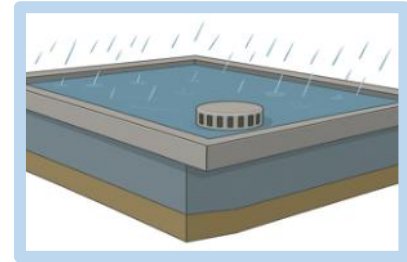
1. Conduites surdimensionnées



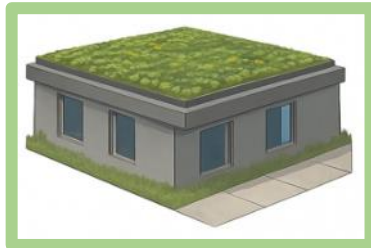
2. Chambres souterraines



3. Pavés perméables



4. Toits bleus



5. Toits verts



6. Jardins de pluie



7. Biorétention



8. Parcs éponge

Infrastructures vertes: Solutions fondées sur la nature qui imitent les processus naturels (infiltration, évapotranspiration et filtration des polluants)

Dimensionnement des alternatives pour 1 M\$

Option	Unité fonctionnelle	Quantité réalisable (1 M\$)	Nb unités (1 M\$)
Conduites surdimensionnées	100 m linéaire	266 m	2,66
Chambres souterraines	215 m ²	2 400 m ²	11
Pavés perméables	800 m ²	5 600 m ²	7
Toits bleus	900 m ² (4 drains à débit contrôlé)	25 200 m ²	28
Toits verts	300 m ²	2 400 m ²	8
Jardins de pluie	200 m ²	3 400 m ²	17
Biorétention	150 m ²	2 250 m ²	15
Parcs éponges	200 m ³ + 900 m ² de revêtement adjacent	1 096 m ²	5

Méthodologie

Aide multicritère à la décision (AMCD) sélectionnée

Cadre de prise de décision: AMCD guidée par des experts

- **Contexte décisionnel** (scénario d'investissement de 1 M\$), les **critères** (14) et les **options** (8)
- Les critères sont à la fois **quantitatifs** et **qualitatifs**
- La décision implique des compromis entre quatre types de critères clés: **technique**, **environnemental**, **social** et **financier**.
- Méthode utilisée:
 - PROMETHEE II : méthode **de surclassement** en analyse multicritère



PROMETHEE II

Méthode d'aide multicritère à la décision (AMCD)

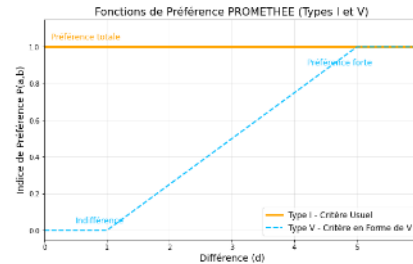
- PROMETHEE II : (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*)

1. Matrice de décision

Entrée:
Résultats pour les 8 options et les 14 critères



2. Fonction de préférence



Score de préférence de 0 (pas de préférence) à 1 (forte préférence)



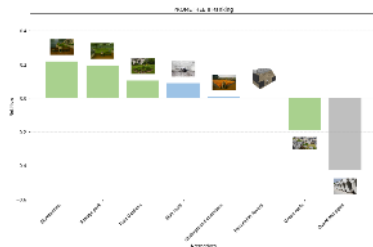
3. Attribution des poids



Méthode de Simos



6. Classement final des options



5. Classement par flux net:

$$\varphi(a) = \varphi^+(a) - \varphi^-(a)$$



4. Calcul des flux positifs et négatifs

Somme des préférences sur l'ensemble des critères

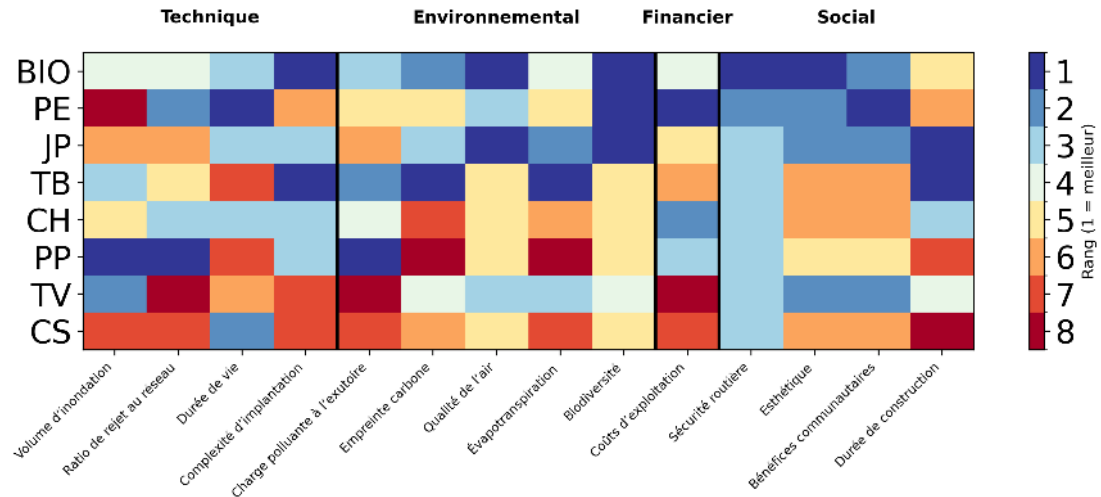
$$\varphi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum P(a, x)$$

$$\varphi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum P(x, a)$$

Méthode d'aide multicritère à la décision (AMCD)

- Critères **complets** (couvrent l'ensemble des dimensions), **opérationnels** (données fiables), **non redondants** (éviter le double comptage) et **minimaux** (essentiels)

1. Matrice de décision et définition de critères



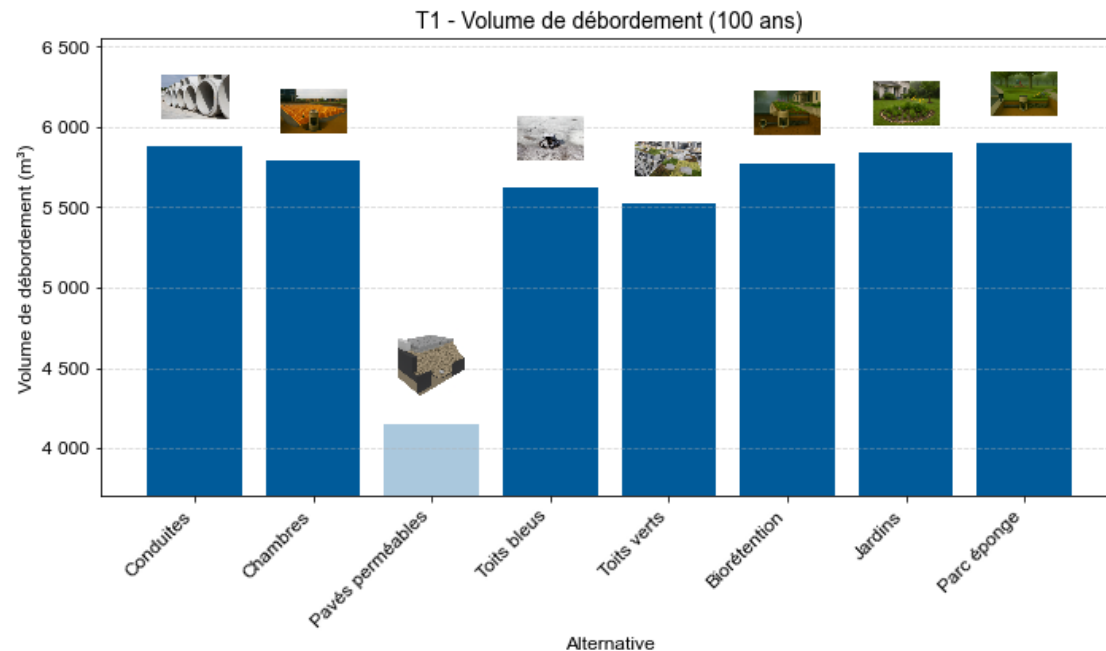


Critères techniques

Utilisés pour évaluer la performance du point de vue de l'ingénierie

1. Réduction des inondations

2. **Conformité réglementaire :** Respect du débit de rejet maximal de Montréal (35 L/s/ha)
3. **Durabilité de l'infrastructure:** Durée de vie estimée avant les réparations majeures
4. **Complexité d'entretien et de maintenance:** Complexité des opérations d'entretien

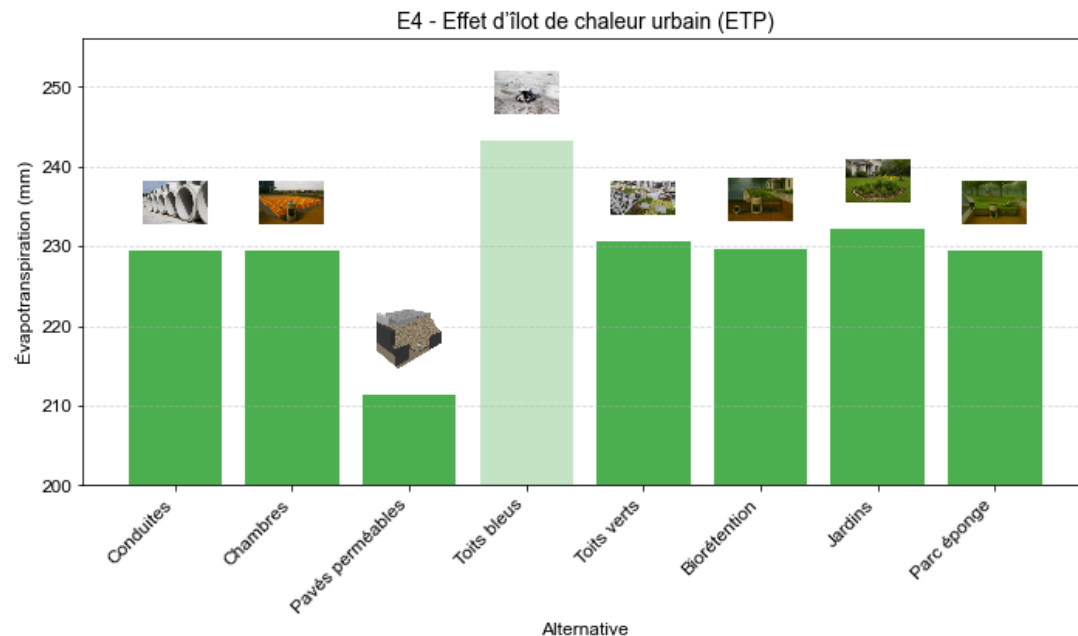




Critères environnementaux

Mesurent la performance écologique de chaque alternative

- Polluants** : Concentration des matières en suspension (MES) comme indicateur de qualité de l'eau
- Empreinte carbone**: Impact net en gaz à effet de serre (GES) exprimé en équivalent CO₂
- Qualité de l'air**: Potentiel d'amélioration de la qualité de l'air
- Effet d'îlot de chaleur urbain**
- Amélioration de la biodiversité** : Contribution aux habitats et aux espaces verts



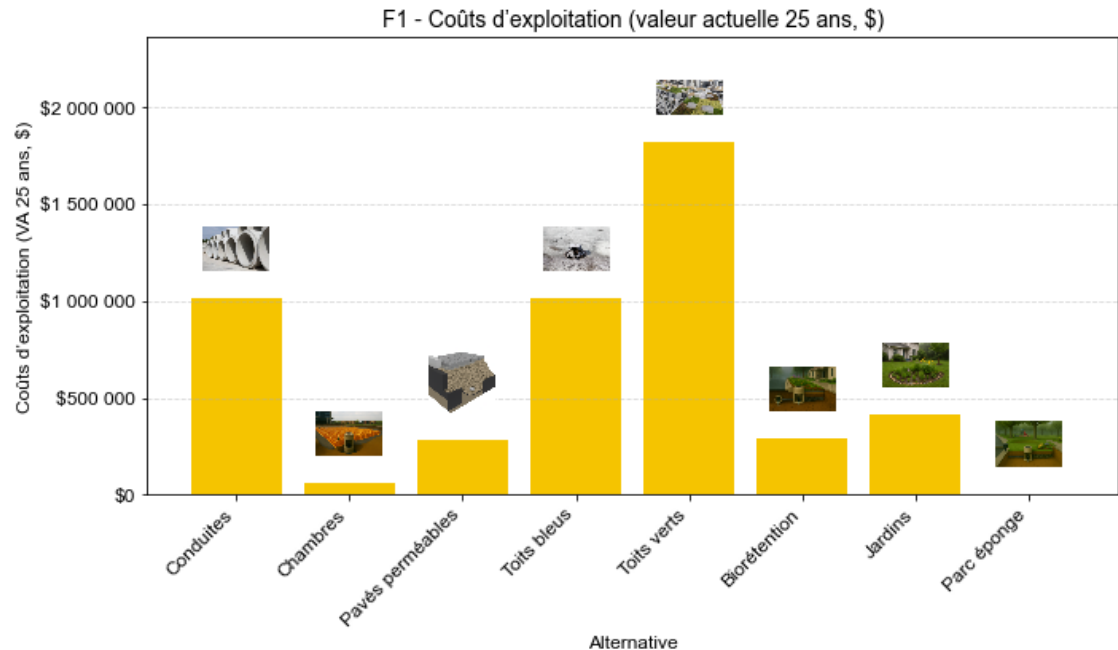


Critère financier

Évaluer les implications économiques à moyen-long terme

1. Coûts d'opération et d'entretien:

Coûts d'opération et de maintenance (O & M) sur 25 ans pour un investissement de 1 M\$.

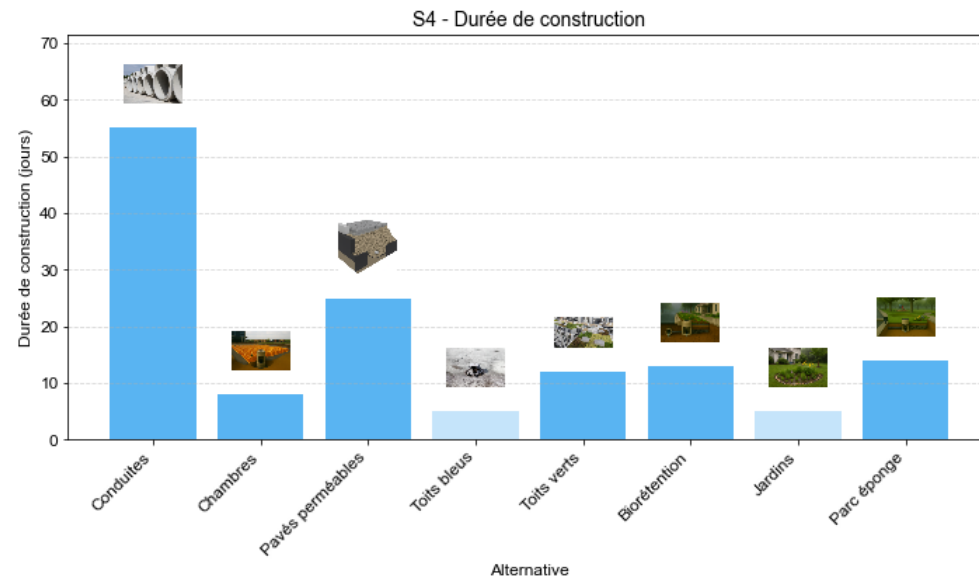




Critères sociaux

Les aspects sociaux jouent un rôle essentiel dans l'acceptabilité

1. **Sécurité routière:** Impact sur la sécurité et la visibilité
2. **Esthétique :** Qualité visuelle évaluée par jugement d'experts
3. **Bénéfices pour la communauté:** Potentiel à valoriser la vie publique et à encourager l'engagement citoyen
4. **Durée de construction:**
Temps estimé pour la mise en œuvre par site



Méthode d'aide multicritère à la décision (AMCD)

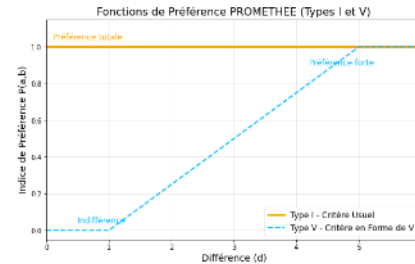
- PROMETHEE II : (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*)

1. Matrice de décision

Entrée:
Résultats pour les 8
options et les 14
critères



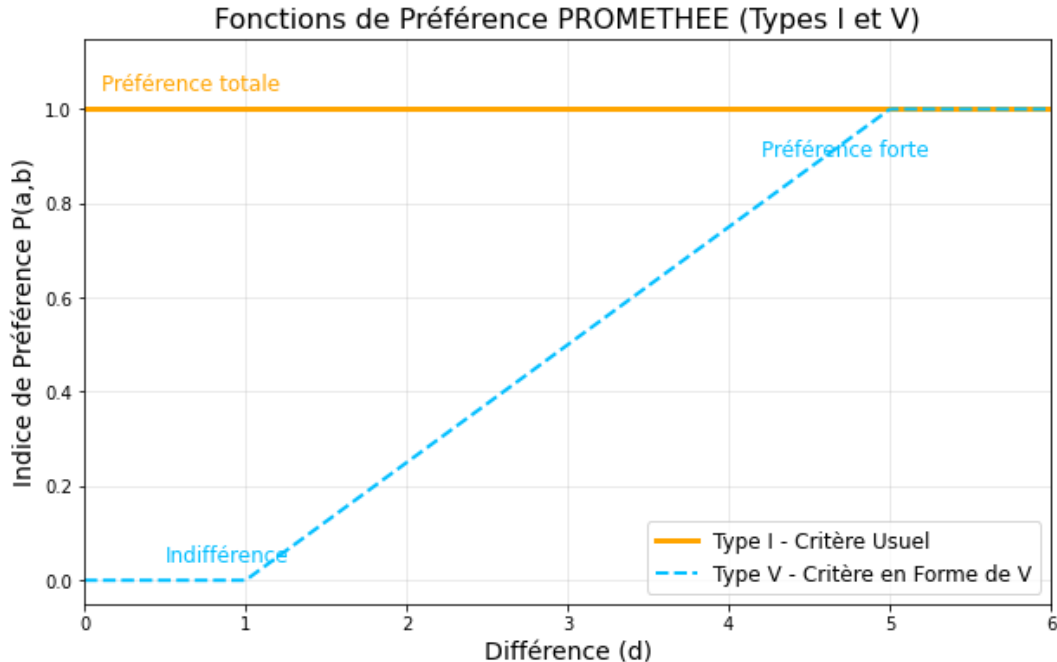
2. Fonction de préférence



Score de préférence de 0 (pas de préférence) à 1 (forte préférence)

Méthode d'aide multicritère à la décision (AMCD)

2. Fonction de préférence (comparaison par paires)



Deux types de fonctions de préférence $P(a, x)$ ont été utilisés dans cette analyse, selon la nature du critère :

Type I (Critère usuel) :

- Données qualitatives,
- Comparaison stricte: la préférence est soit 0, soit 1.

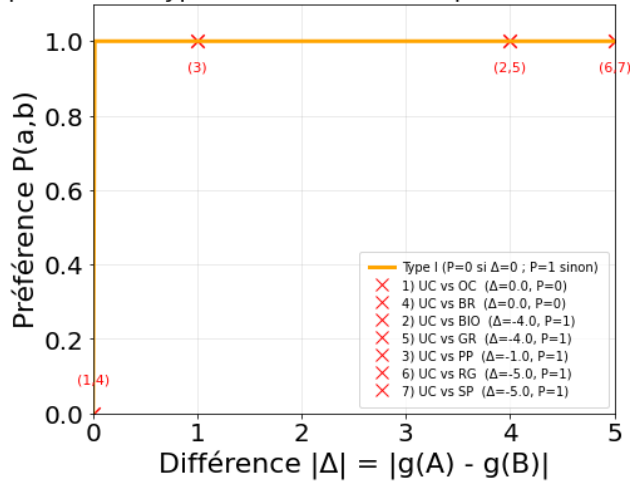
Type V (Linéaire)

- Données quantitatives,
- Seul d'indifférence (q) et un seuil de préférence (p),
- Augmentation progressive du score de préférence.

Méthode d'aide multicritère à la décision (AMCD)

2. Fonction de préférence (comparaison par paires)

Fonction de préférence Type I — S3 : Bénéfices pour la communauté (bénéfice)



Fonction de Type I - Critère usuel

Utilisé pour les critères qualitatifs

Exemple avec le critère: **Bénéfices pour la communauté**

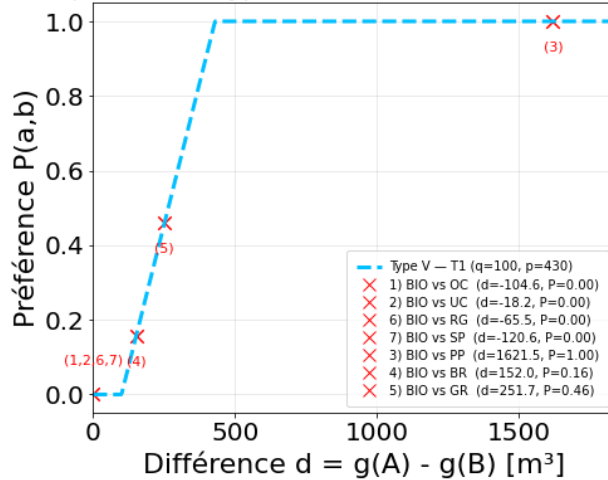
Critère	Score (0 à 5)
Parc éponge	5
Chambres souterraines	0

- Le « x » rouge # 7 représente la différence de score entre les parcs éponge (5) et les chambres souterraines (0).
- Puisque la différence est supérieure à 0, on considère qu'il y a une préférence complète pour les parcs éponge.

Méthode d'aide multicritère à la décision (AMCD)

2. Fonction de préférence (comparaison par paires)

Fonction de préférence Type V — T1 : Volume de débordement (coût)



Fonction de Type V - Critère en forme de V
Utilisé pour les critères quantitatifs

Exemple avec le critère: **volume d'inondation (m³)** – Seuil q = 100 m³, p = 430 m³

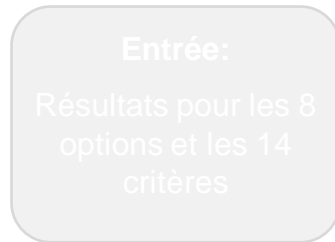
Critère	Volume d'inondation (m³)
Alternative A: Biorétention	5800
Alternative B: Pavés perméables	4100

- Le « x » rouge #3 représente la différence de 1700 m³ entre la biorétention et les pavés perméables,
- La fonction en forme de V attribue une préférence complète pour pavés perméables,
- Dans le cas de la comparaison entre biorétention et toits bleus (#4) = 150 m³, la fonction attribue une préférence proportionnelle à cette différence.

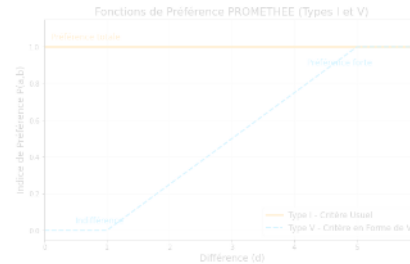
Méthode d'aide multicritère à la décision (AMCD)

- PROMETHEE II : (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*)

1. Matrice de décision



2. Fonction de préférence



3. Attribution des poids



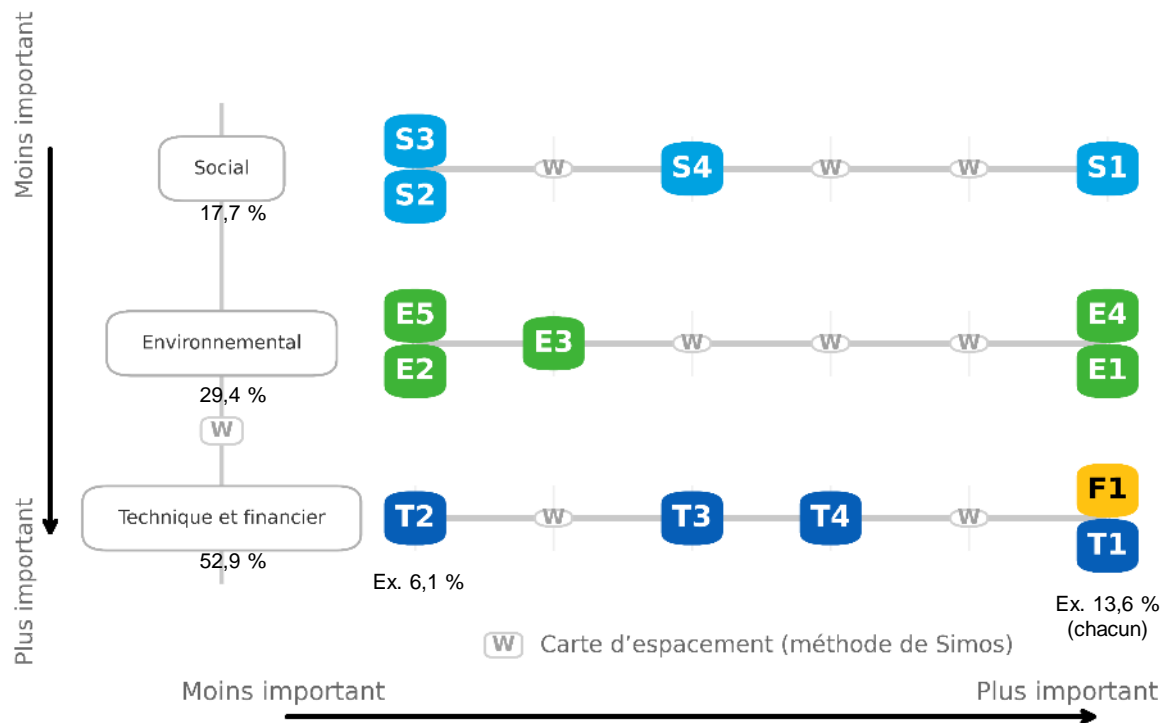
Méthode de Simos





Attribution des poids à chaque critère

Méthode de Simos révisée – Pondération et ordre des critères



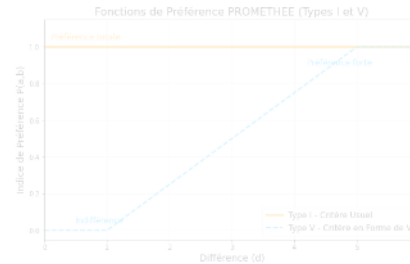
Méthode d'aide multicritère à la décision (AMCD)

- PROMETHEE II : (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*)

1. Matrice de décision



2. Fonction de préférence



Score de préférence de 0 (pas de préférence) à 1 (forte préférence)



3. Attribution des poids



Méthode de Simos



5. Classement par flux net:

$$\varphi(a) = \varphi^+(a) - \varphi^-(a)$$



4. Calcul des flux positifs et négatifs

Somme des préférences sur l'ensemble des critères

$$\varphi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum P(a, x)$$

$$\varphi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum P(x, a)$$

Méthode d'aide multicritère à la décision (AMCD)

4. Flux positifs et négatifs

$$\varphi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum P(a, x)$$

$$\varphi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum P(x, a)$$

5. Flux net

$$\varphi(a) = \varphi^+(a) - \varphi^-(a)$$



Le classement PROMETHEE II est basé sur ce flux net.

$\varphi^+(a)$ → Flux positif (à quel point l'alternative domine les autres)

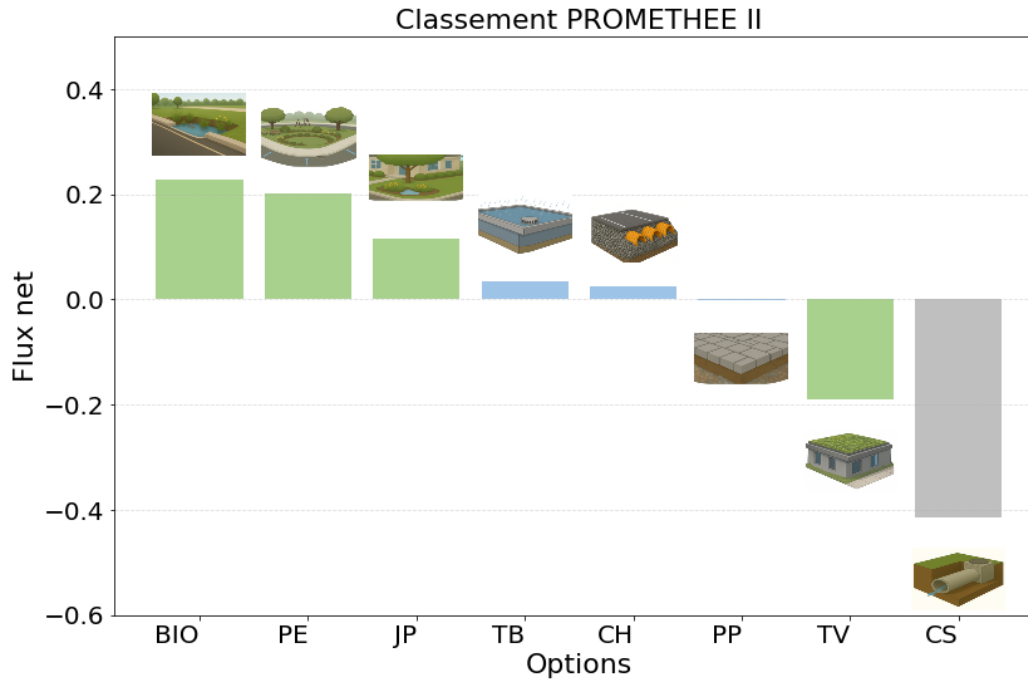
$\varphi^-(a)$ → Flux négatif (à quel point elle est dominée par les autres)

$\varphi(a)$ → Flux net (classement global)

$P(x,a)$ → Fonction de préférence

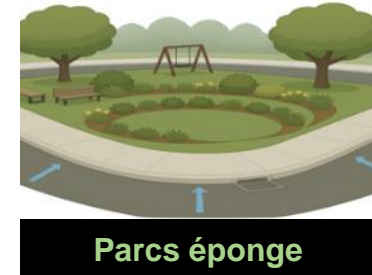
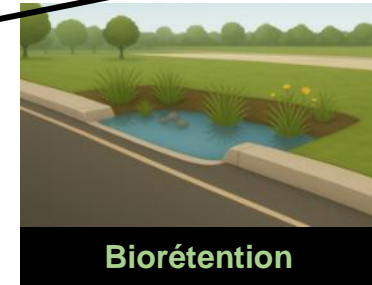
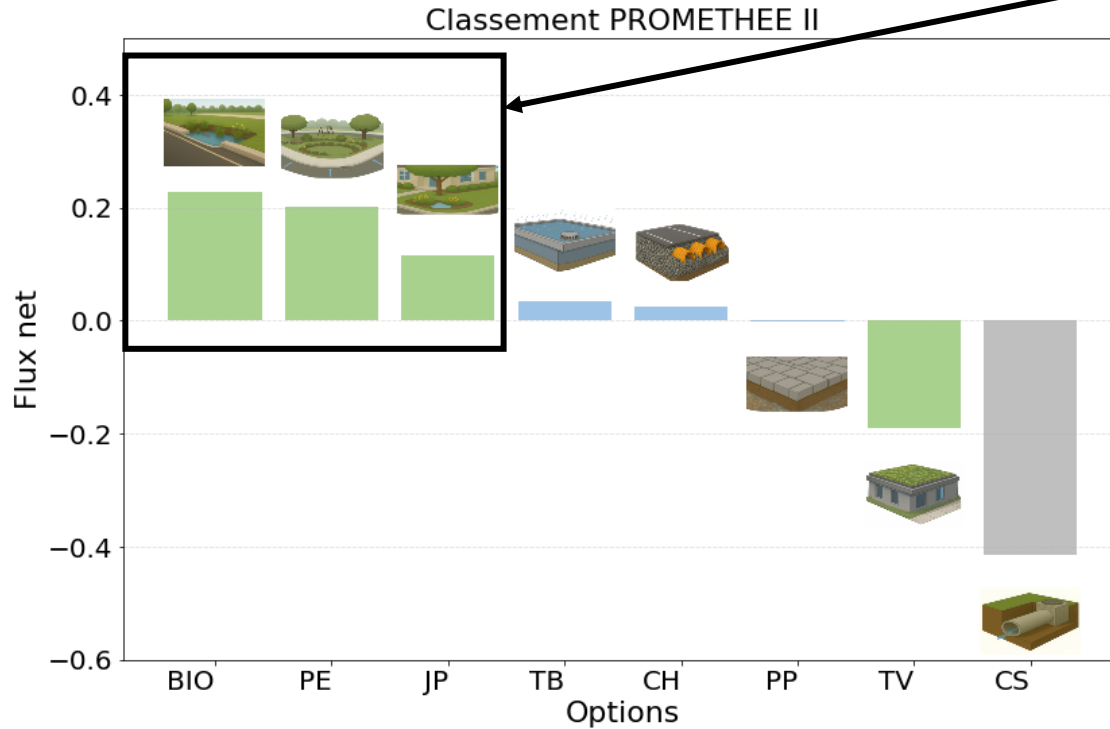
n → Nombre d'options

Résultats PROMETHEE II



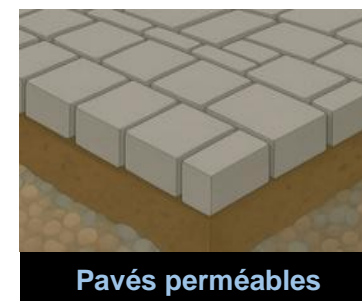
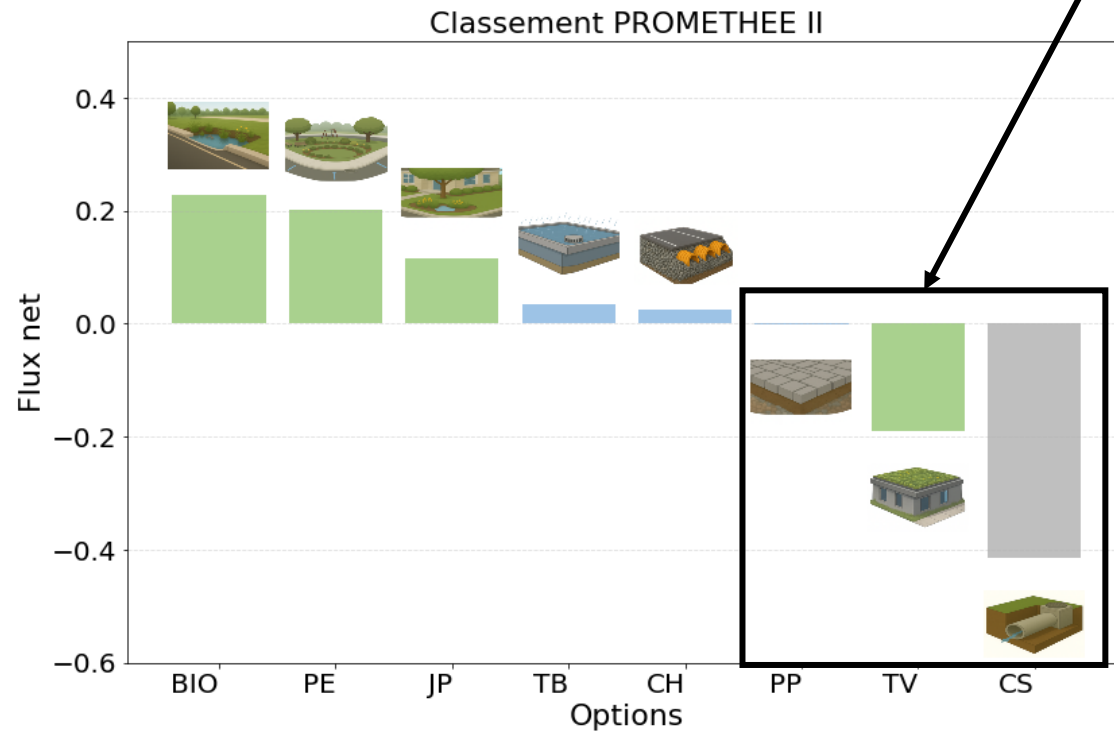
Résultats PROMETHEE II

options les plus performantes



Résultats PROMETHEE II

options les moins performantes



Principaux constats

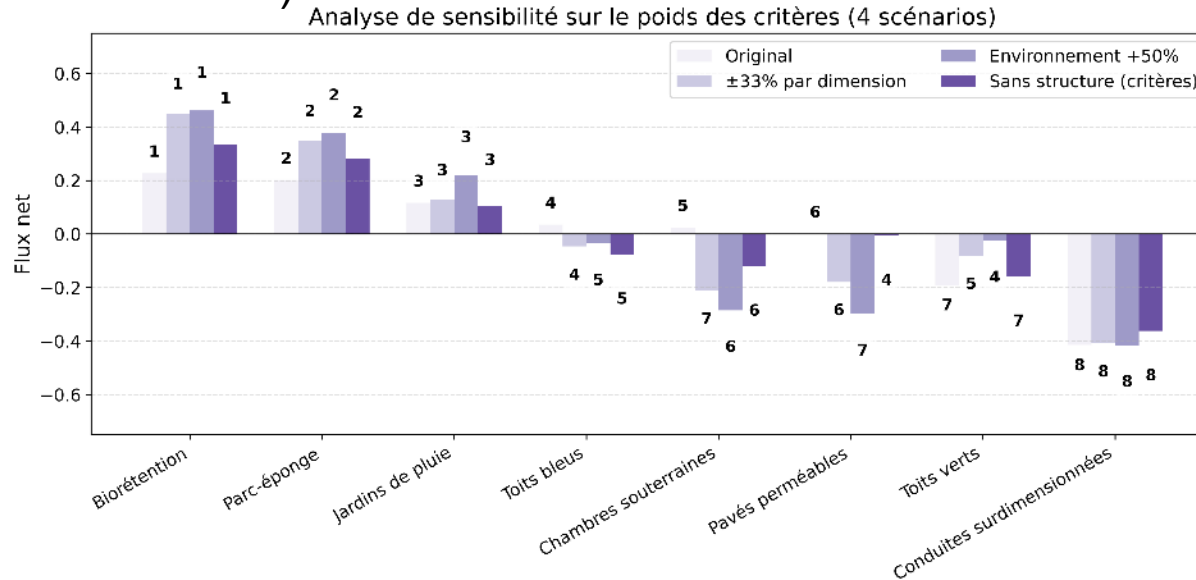
- L'analyse PROMETHEE II met en évidence une préférence claire pour les solutions **d'infrastructures vertes** (biorétention, parcs éponges et jardins de pluie)
- Ces solutions effectuent une gestion efficace des eaux pluviales en plus d'offrir des co-bénéfices environnementaux et sociaux, expliquant leur classement élevé
- Parmi les 8 options évaluées, la biorétention s'est révélée être la solution la plus équilibrée (technique, environnemental, social et économique)



Image générée avec le prompt : « A digital cross-sectional illustration showing... » par OpenAI, DALL-E 3 (2025). <https://chat.openai.com>

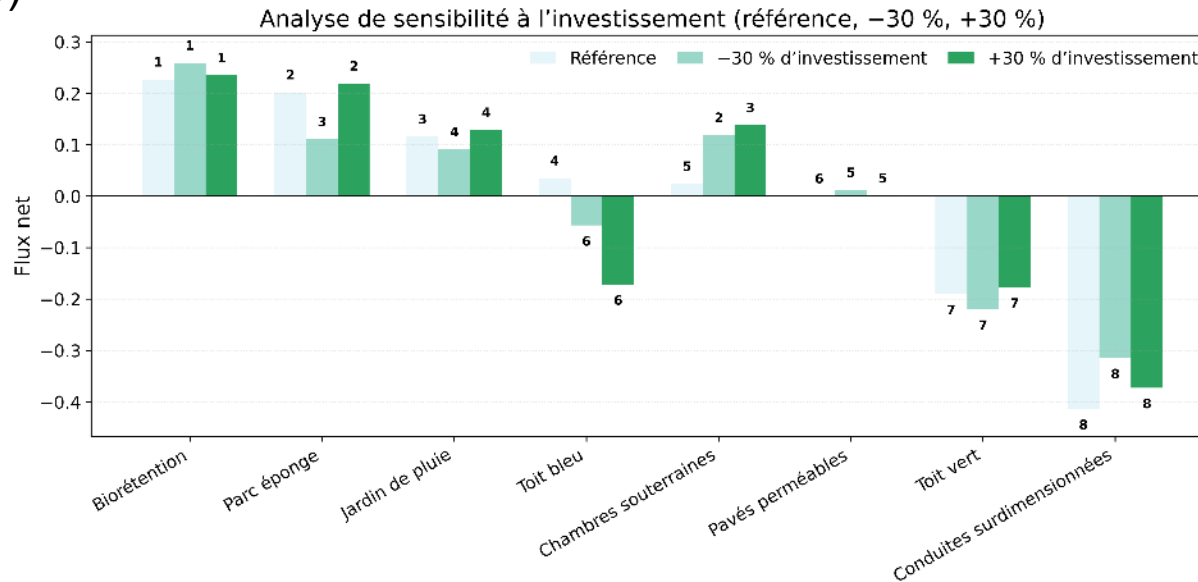
Analyses de sensibilité : résultats robustes

- Les 3 meilleures options demeurent constantes dans tous les scénarios
- L'alternative la moins performante reste inchangée
- Les variations de pondérations influencent les positions intermédiaires (classement robuste)



Analyses de sensibilité : résultats robustes

- La meilleure alternative demeure constante dans tous les scénarios
- Les deux options les moins performantes restent inchangées
- Les variations de prix influencent les positions intermédiaires (classement robuste)



Contexte d'utilisation et flexibilité du cadre

Adaptable

- Appui à la planification et à la priorisation des investissements
- Justification pour les autorisations ministérielles
- Renforce la transparence et la traçabilité des décisions



Souplesse d'application

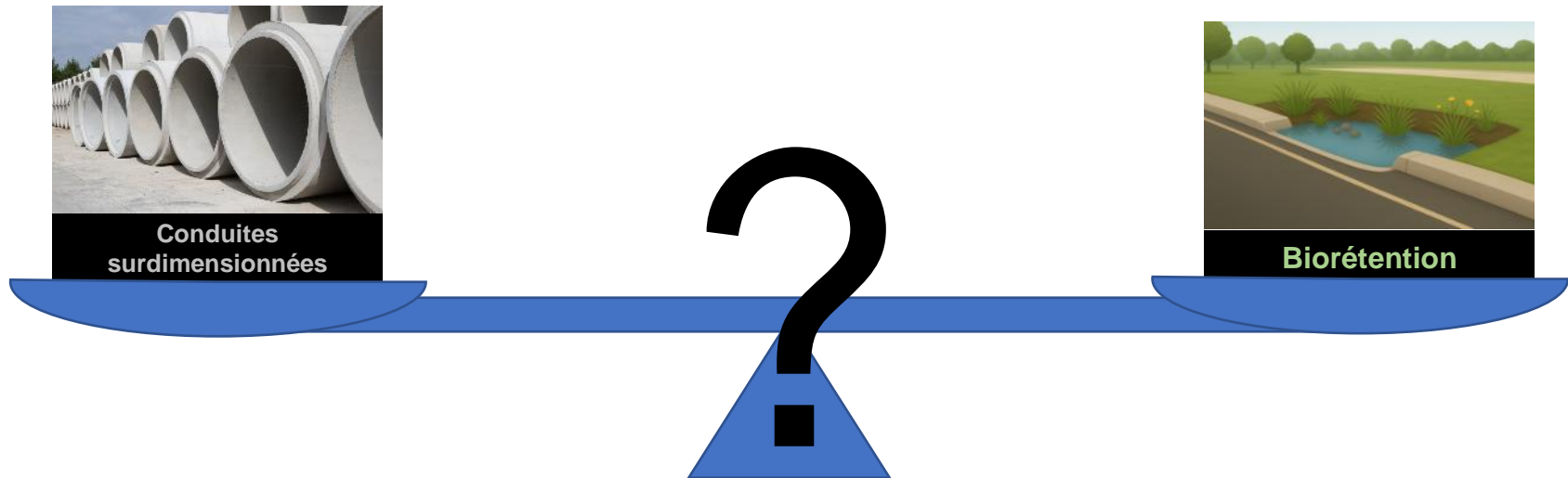
- Applicable à toutes les échelles de bassin versant
- Compatible avec divers outils de calcul et de modélisation (*PCSWMM, HEC-RAS, InfraWorks, méthode rationnelle, RSMeans, etc.*)

Reproductibilité

- Méthode transférable à d'autres secteurs ou budgets
- Les résultats doivent toutefois être réévalués selon le contexte local

Conclusions

- Les solutions traditionnelles (ex. conduites surdimensionnées) sont souvent privilégiées, mais sont-elles les plus adaptées dans un contexte de changements climatiques?



Conclusions

- Dans un contexte de changements climatiques, afin d'améliorer les pratiques, l'AMCD est une approche pertinente puisqu'elle permet de:
 - **Structurer les processus décisionnels**
 - **Expliciter le problème décisionnel et les objectifs**
 - **Favoriser une approche multidisciplinaire**
 - **Mobiliser les données disponibles**
 - **Comparer une diversité d'options réalistes et créatives**
 - **Illustrer les compromis clés via des outils d'aide à la décision**

**Aider à prendre des décisions de qualité
pour s'adapter aux changements
climatiques**

Adapt
INSTITUT

Le génie pour
Adaptation
Résilience
Solutions



ÉCOLE DE
TECHNOLOGIE
SUPÉRIEURE

Université du Québec

Équipe de recherche



Melanie McGrory
melanie.mcgrory.1@etsmtl.ca



Francis Marleau Donais
Francis.marleau-donais@etsmtl.ca



Jean-Luc Martel
jean-luc.martel@etsmtl.ca

Publication sur le sujet

MCGRORY, M. MARLEAU DONAIS, F. MARTEL, J-L. (En révision). “A multicriteria framework for prioritizing urban flood adaptation strategies using PCSWMM modelling results under a standardized investment scenario”.
Blue-Green Systems