

# Évaluation de l'impact des stratégies de mise en œuvre des infrastructures vertes sur la résilience urbaine

Symposium Ouranos 2025

Justine Petrucci  
Françoise Bichai (directrice de recherche)  
Sarah Dorner (co-directrice)  
Jonathan Jalbert (co-directeur)

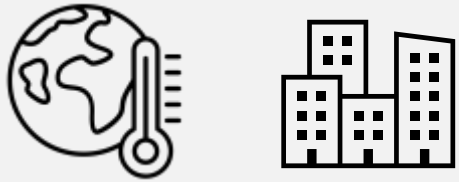
29 janvier 2025



Avec la participation financière de



# Contexte



- Défis environnementaux, sociaux et économiques liés au climat et à l'urbanisation



Le changement climatique génère:

- Précipitations intenses
- Élévation du niveau des eaux
- Vagues de chaleur fréquentes



- Impact sur les services urbains
- Menace pour la sécurité et le bien-être
- Atteinte à l'environnement naturel et bâti
- Conséquences économiques

**But**

**Améliorer la résilience des communautés urbaines**

# Objectifs

**Développer et appliquer un cadre d'analyse de la résilience** qui tienne compte à la fois de la gestion des eaux pluviales (résilience technique, axée sur les débordements et la réduction du ruissellement) et de l'aspect socio-écologique, en tenant compte de la santé des communautés urbaines.

## Sous-objectifs

Définir la résilience dans le contexte du projet

1

Identifier les concepts clés de la résilience et les indicateurs quantitatifs associés

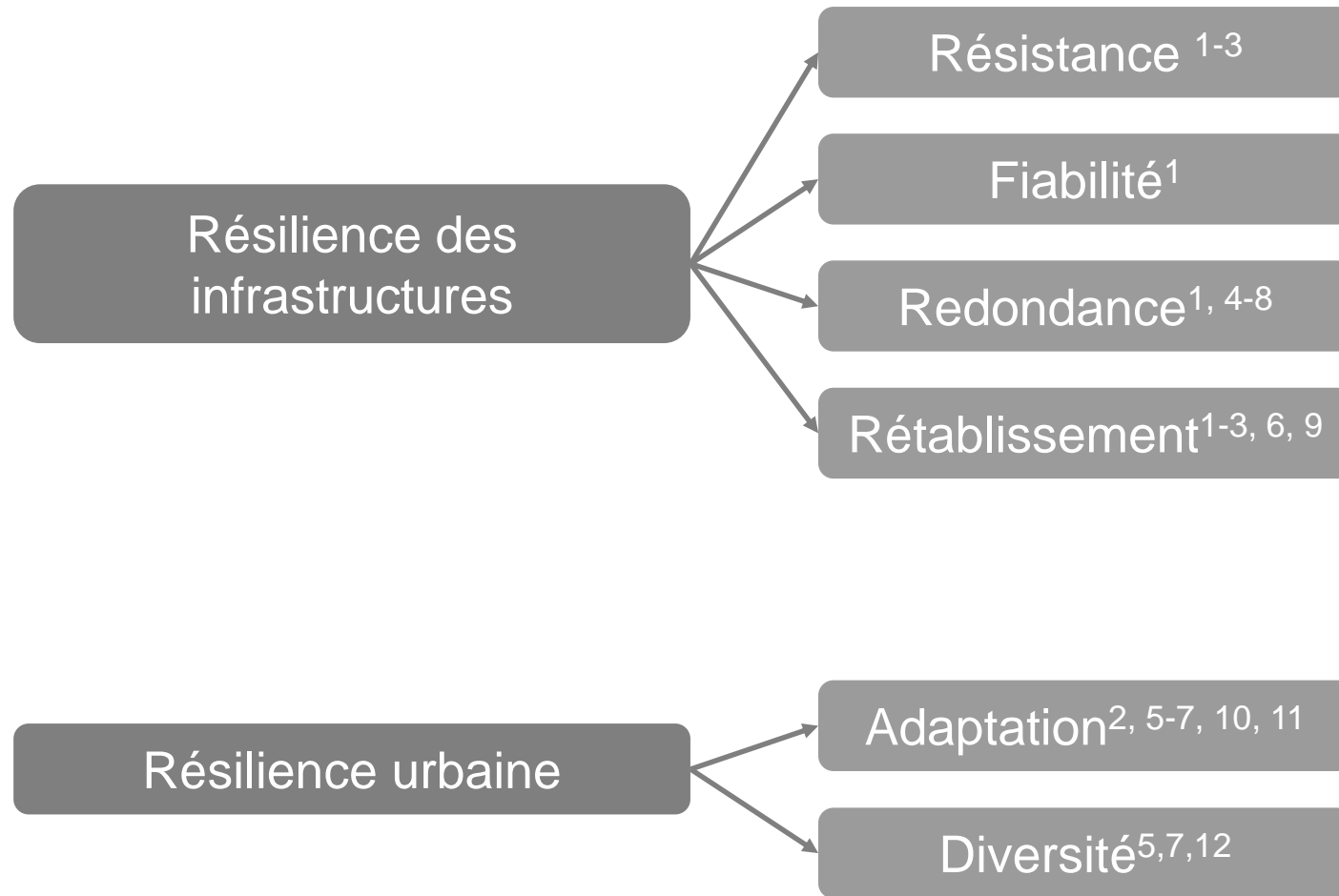
2

Définir des scénarios d'implantation d'infrastructures vertes

3

Appliquer le cadre d'analyse de la résilience

4



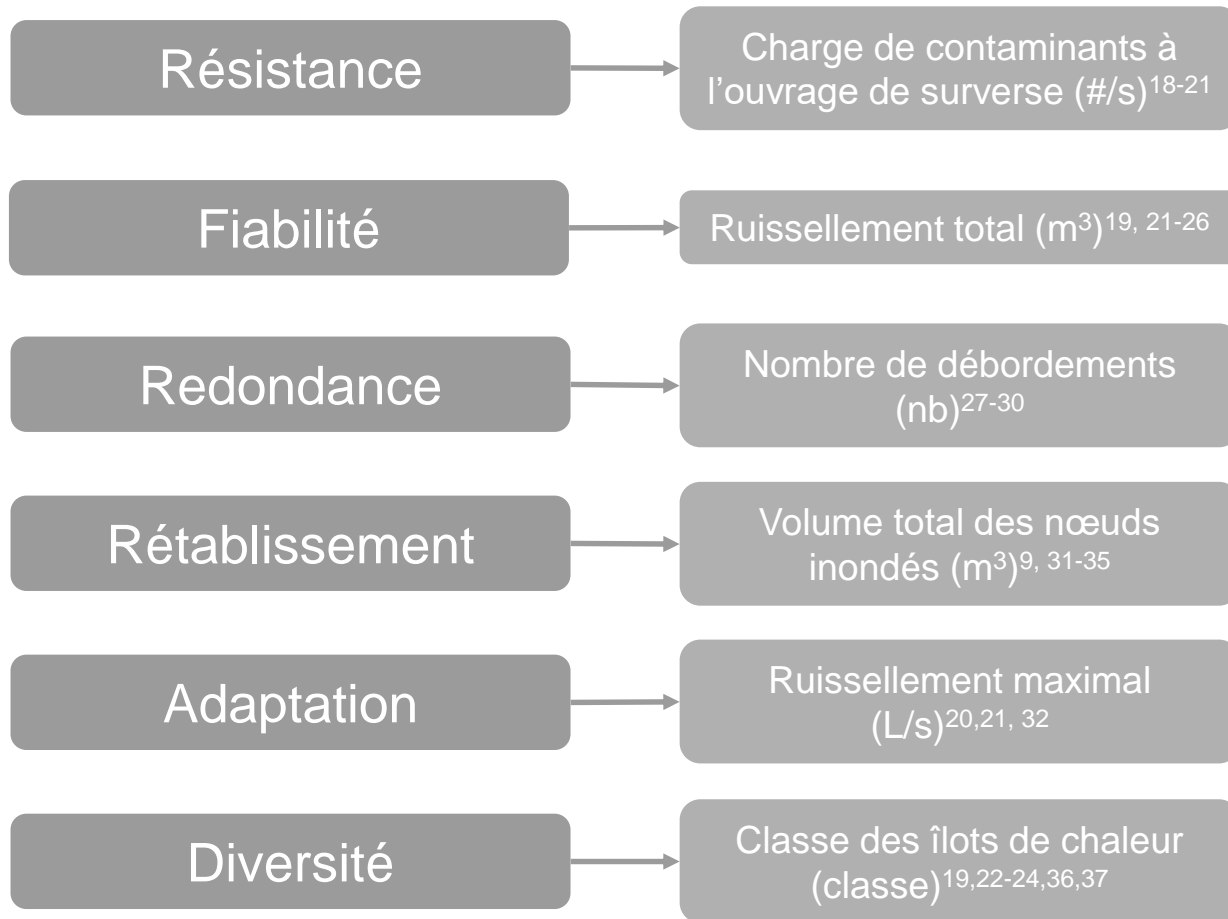
Thèmes principaux :  
changement climatique, santé



Peut être amélioré par les  
infrastructures vertes

## 2

## Identifier les concepts clé des la résilience et les indicateurs quantitatif associés



Thèmes principaux

Changements climatiques et santé



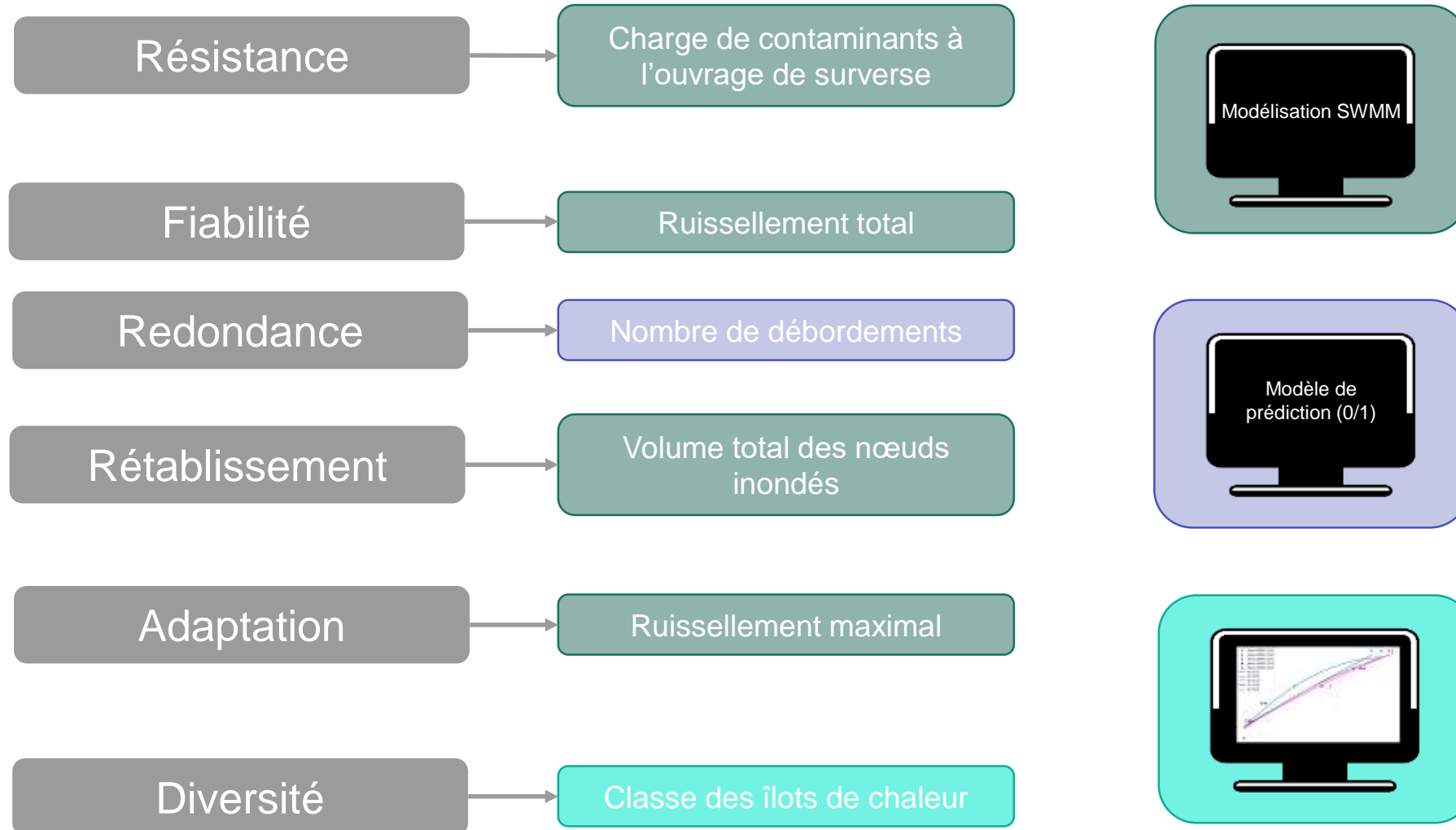
Peut être amélioré par les  
infrastructures vertes

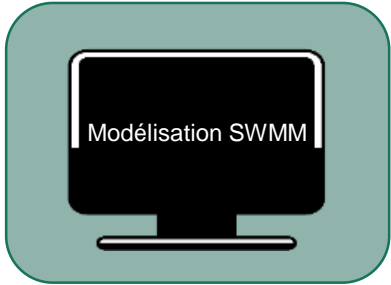


**Quantitatifs**

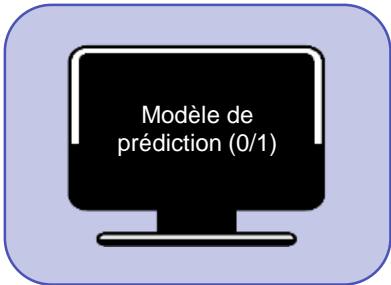
## 2

## Identifier les concepts clé de la résilience et les indicateurs quantitatifs associés

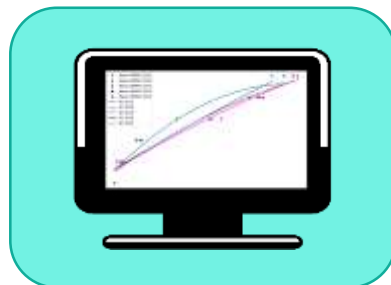




Obtention des valeurs directement dans l'interface SWMM.



- Modèle de prédiction des surverses basé sur les données observées de surverses.
- Utilisation d'un modèle de régression logistique avec, comme variables explicatives, le débit de pointe (pour un événement de pluie) et les volumes cumulés sur différentes périodes.



- Relation entre la classe d'îlot de chaleur et le pourcentage d'imperméabilisation.
- Calcul de l'aire sous la courbe.



Mais cela dépend de leur emplacement...

- Les espaces verts urbains et les infrastructures vertes aident les villes à:
  - S'adapter au changement climatique<sup>13-15</sup>
  - Renforcer la résilience urbaine<sup>16,17</sup>
- Utilisation d'un outil SIG-ADMC pour définir les scénarios d'implantation



# SSANTO- Spatial Suitability Analysis Tool

(Kuller et al., 2019; Lacroix et al., 2024)

## Un outil de planification pour évaluer l'adéquation spatiale des infrastructures vertes pour la gestion des eaux pluviales



Diagramme conceptuel de SSANTO (Kuller et al., 2017; Lacroix et al., 2024)

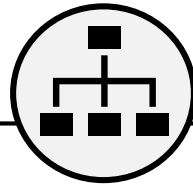


# SSANTO tool



## Type d'IV

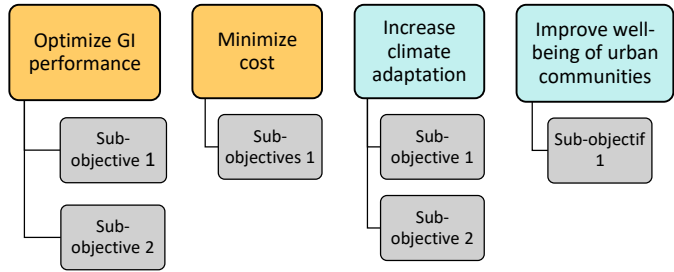
1. Biorétention et jardin de pluie
2. Système d'infiltration
3. Toits verts
4. Étang et lacs
5. Fossés
6. Baril récupérateur d'eau de pluie
7. Marais construits
8. Arbres
9. Parcs
10. Infrastructures nourricières



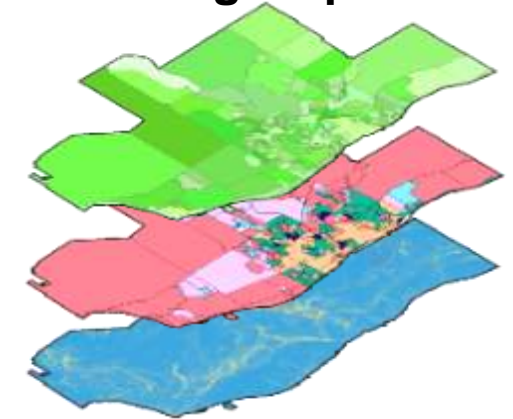
## Développer une hiérarchie d'objectifs

### OPPORTUNITÉS

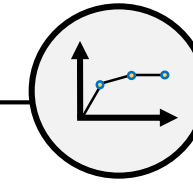
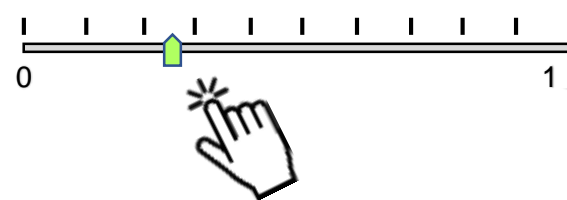
### BESOINS



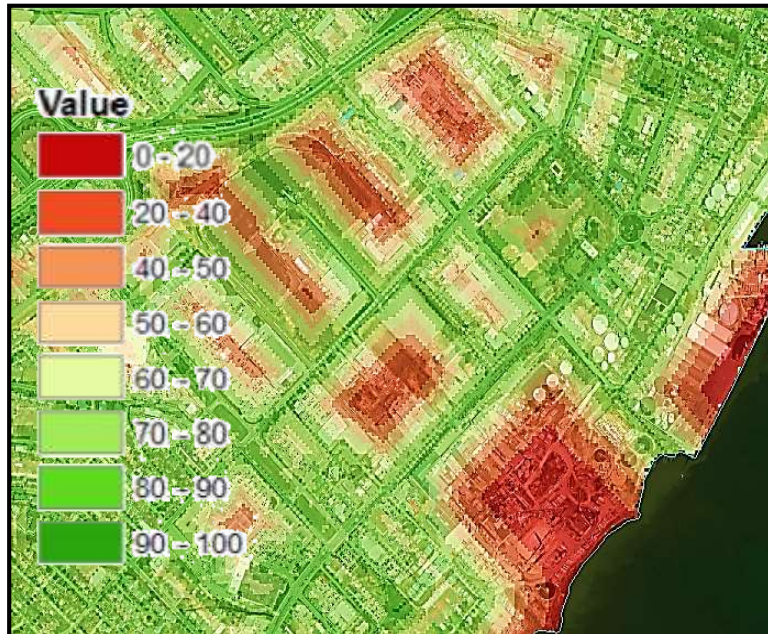
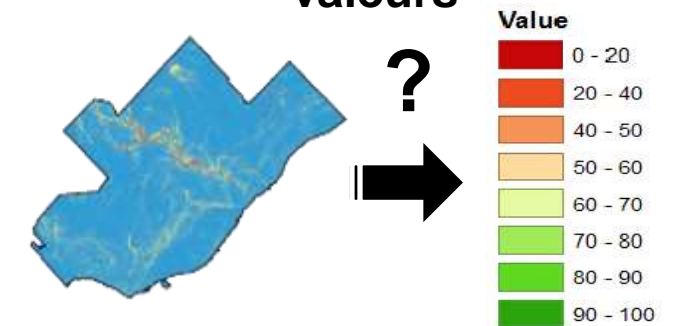
## Compilation d'une base de données géospatiales



## Pondérer les objectifs sur une échelle de 0 à 1



## Définir les échelles de valeurs





# Hiérarchie des objectifs élaborée par Lacroix et al., (2024)



Opportunités		Besoins	
1. Améliorer la performance des IV	1.1 Infiltration de l'eau dans le sol	5. Améliorer la protection des ressources en eau	5.1 Réduire l'imperméabilité
	1.2 Résurgence des eaux souterraines		5.2 Réduire les débordements d'égoûts unitaires
2. Réduire les coûts	2.1 Coût de construction lié à la topographie		6. Améliorer l'équité territoriale
	2.2 Coût du raccordement aux égouts	6.1 Augmenter la visibilité des infrastructures vertes	
3. Facilité d'intégration dans l'urbanisme	3.1 Facilité d'intégration dans le système foncier	7. Améliorer la santé et le bien-être des communautés	6.2 Augmenter le verdissement des zones matériellement et socialement défavorisées
	3.2 Facilité d'intégration dans le réseau routier		7.1 Convivialité des transports actifs et publics
	3.3 Facilité d'intégration dans les travaux planifiés		7.2 Améliorer la qualité de l'air
4. Réduire les conflits avec le bâti	4.1 Conflits avec les fondations des bâtiments	8. Améliorer la biodiversité	7.3 Protection des sources souterraines d'eau potable
	4.2 Conflits avec les infrastructures existantes		8.1 Augmenter le couvert végétal
		9. Améliorer l'adaptation aux changements climatiques	8.2 Accroître la connectivité écologique
			9.1 Exposition aux inondations urbaines
			9.2 Exposition aux îlots de chaleur urbain

# Hierarchie des objectifs élaborée par Lacroix et al., (2024)

Opportunités		Besoins	
1. Améliorer la performance des IV	1.1 Infiltration de l'eau dans le sol	5. Améliorer la protection des ressources en eau	5.1 Réduire l'imperméabilité
	1.2 Résurgence des eaux souterraines		5.2 Réduire les débordements d'égoûts unitaires
2. Réduire les coûts	2.1 Coût de construction lié à la topographie		5.3 Distribution des IV
	2.2 Coût du raccordement aux égouts	6. Améliorer l'équité territoriale	6.1 Augmenter la visibilité des infrastructures vertes
3. Facilité d'intégration dans l'urbanisme	3.1 Facilité d'intégration dans le système foncier		6.2 Augmenter le verdissement des zones matériellement et socialement défavorisées
	3.2 Facilité d'intégration dans le réseau routier	7. Améliorer la santé et le bien-être des communautés	7.1 Convivialité des transports actifs et publics
	3.3 Facilité d'intégration dans les travaux planifiés		7.2 Améliorer la qualité de l'air
4. Réduire les conflits avec le bâti	4.1 Conflits avec les fondations des bâtiments	8. Améliorer la biodiversité	7.3 Protection des sources souterraines d'eau potable
	4.2 Conflits avec les infrastructures existantes		8.1 Augmenter le couvert végétal
		9. Améliorer l'adaptation aux changements climatiques	8.2 Accroître la connectivité écologique
			9.1 Exposition aux inondations urbaines
			9.2 Exposition aux îlots de chaleur urbain

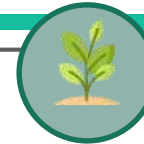
1. De base (aucune IV)
2. Opportunités
3. Besoins
4. Hiérarchie complète



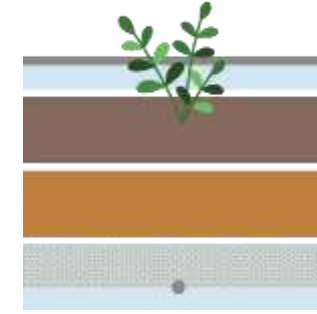
Carte d'adéquation produite par SSANTO



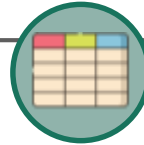
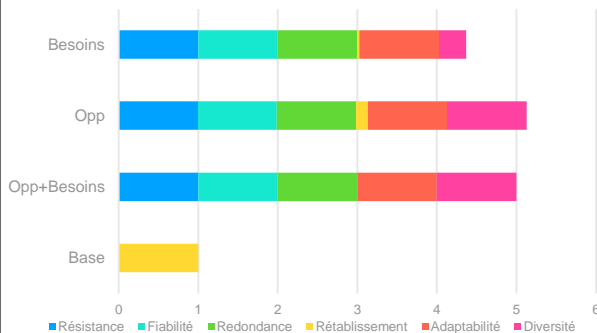
Redécoupage de la carte en fonction des bassins de drainage urbains du modèle SWMM



Ajout des IV (type = biorétention) dans SWMM  
Taux d'implantation = 10%

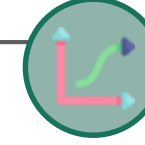


Appliquer le cadre de résilience et comparer les scénarios



Évaluer les indicateurs pour chaque scénario

Concepts	Indicateurs	Base	All	Opp	Need
Résistance	Charge en contaminants	1	0.001	0.004	0.000
Fiabilité	Ruisselement total	1	0.000	0.009	0.002
Redondance	Nombre de surverse	1	0.000	0.000	0.000
Rétablissement	Volume total des noeuds inondés	0	1.000	0.854	0.972
Adaptabilité	Ruisselement max	1	0.000	0.004	0.001
Diversité	Îlots de chaleur	1	0.000	0.000	0.657



Obtention des valeurs des indicateurs avec les outils



# Résultats préliminaires

- Le scénario qui crée la plus grande résilience est celui des opportunités (Opp).
  - Les concepts qui contribuent le plus à la résilience dans ce cas sont : résistance, fiabilité, adaptabilité et diversité.
- Dans tous les cas, la résilience est augmentée par rapport au scénario sans IV.

Score max de la résilience = 6

Concepts	Indicateurs	Base (sans IV)	Opp+ Besoins	Opp	Beoins
Résistance	Charge en contaminants	0	0.999	0.996	1.000
Fiabilité	Ruissellement total	0	1.000	0.991	0.998
Redondance	Nombre de surverse	0	1.000	1.000	1.000
<i>Rétablissement En développement</i>	<i>Volume total des noeuds inondés</i>	<i>1</i>	<i>0.000</i>	<i>0.146</i>	<i>0.028</i>
Adaptabilité	Ruissellement max	0	1.000	0.996	0.999
<i>Diversité En développement</i>	<i>Îlots de chaleur</i>	<i>0</i>	<i>1.000</i>	<i>1.000</i>	<i>0.343</i>
	<b>Somme</b>	<b>1</b>	<b>5</b>	<b>5.13</b>	<b>4.37</b>

Tableau 1: Résultats du cadre d'analyse de la résilience pour le scénario de base et les 3 scénarios avec une implantation de 10%

# Résultats préliminaires

- Le scénario qui crée la plus grande résilience est celui des opportunités (Opp)
  - Les concepts qui contribuent le plus à la résilience dans ce cas sont: Résistance, Fiabilité, Adaptabilité et Diversité
- Dans tous les cas, la résilience est augmentée par rapport au scénario sans IV.

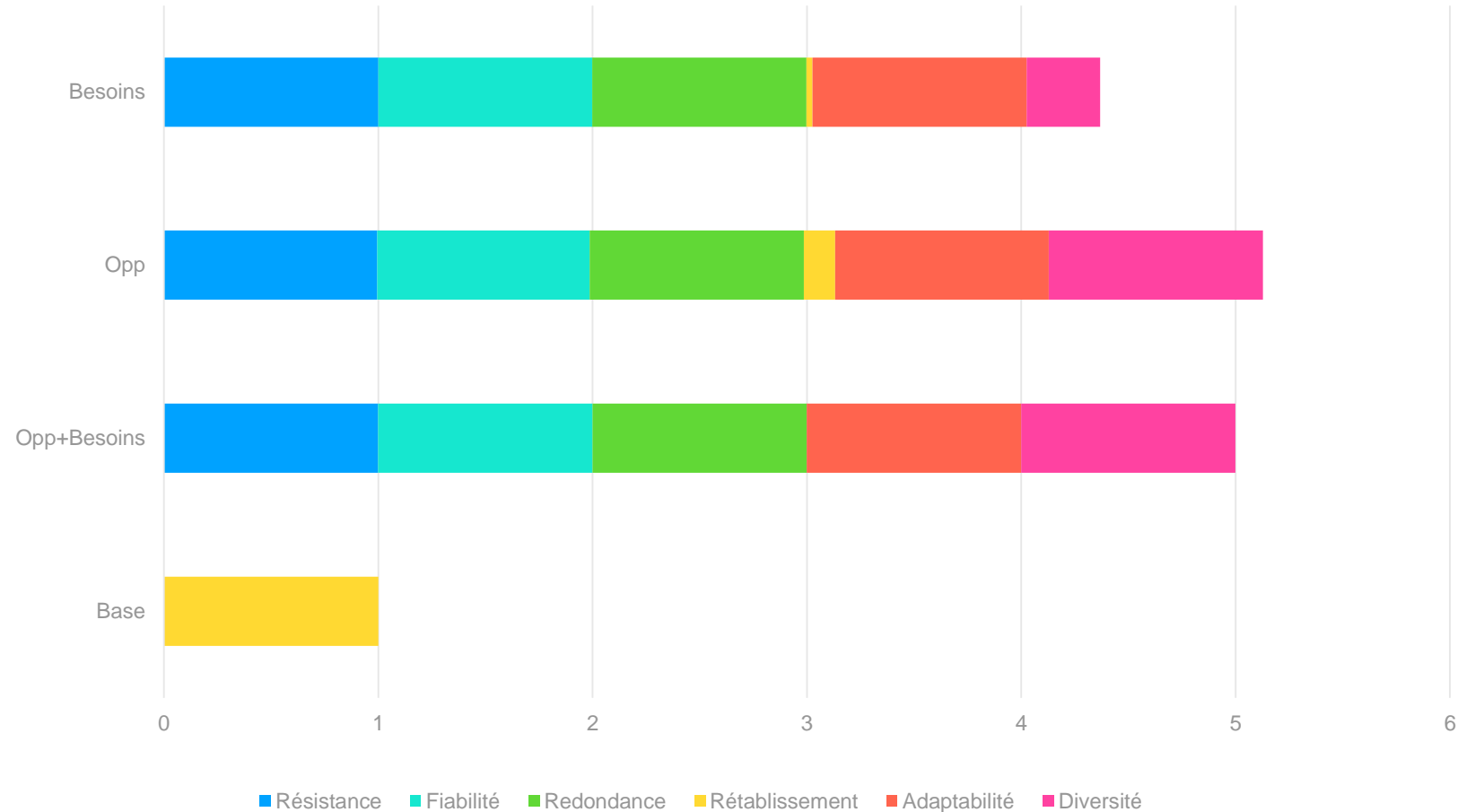


Figure 1: Résultats du cadre d'analyse de la résilience pour le scénario de base et les 3 scénarios avec une implantation de 10%

# Conclusions préliminaires et prochaines étapes

**But** Améliorer la résilience des communautés urbaines



Tous les scénarios permettent d'améliorer la résilience par rapport à la situation sans infrastructures vertes.



Créer un scénario optimiste d'implantation d'infrastructures vertes (25%) et déterminer l'effet sur la résilience



Calculer la résilience pour d'autres portions du territoire (autres ouvrages de surverses)



Créer un scénario d'implantation dans SSANTO qui cible les objectifs de la hiérarchie qui ont un lien avec les indicateurs sélectionnés



Effectuer les simulations sur une période de 6 mois



# Références

- [1] CabinetOffice, "Keeping the Country Running: Natural Hazards and Infrastructure," in "A Guide to improving the resilience of critical infrastructure and essential services," 2011. [Online]. Available: [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/61342/natural-hazards-infrastructure.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/61342/natural-hazards-infrastructure.pdf)
- [2] N. Bautista-Puig, J. Benayas, J. Mañana-Rodríguez, M. Suárez, and E. Sanz-Casado, "The role of urban resilience in research and its contribution to sustainability," *Cities*, vol. 126, p. 103715, 2022/07/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.103715>.
- [3] J. Batica, P. Gourbesville, and F.-Y. Hu, "Methodology for flood resilience index," in *International conference on flood resilience experiences in Asia and Europe–ICFR, Exeter, United Kingdom*, 2013.
- [4] A. Bozza, D. Asprone, and G. Manfredi, "Developing an integrated framework to quantify resilience of urban systems against disasters," *Natural Hazards*, vol. 78, no. 3, pp. 1729-1748, 2015/09/01 2015, doi: 10.1007/s11069-015-1798-3.
- [5] M. Sterk, I. A. van de Leemput, and E. T. H. M. Peeters, "How to conceptualize and operationalize resilience in socio-ecological systems?," *Current Opinion in Environmental Sustainability*, vol. 28, pp. 108-113, 2017/10/01/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2017.09.003>.
- [6] S. Meerow, J. P. Newell, and M. Stults, "Defining urban resilience: A review," *Landscape and Urban Planning*, vol. 147, pp. 38-49, 2016/03/01/ 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.11.011>.
- [7] I. Kotzee and B. Reyers, "Piloting a social-ecological index for measuring flood resilience: A composite index approach," *Ecological Indicators*, vol. 60, pp. 45-53, 2016/01/01/ 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.06.018>.
- [8] M. Cardoso, R. Brito, C. Pereira, L. David, and M. Almeida, "Resilience Assessment Framework–RAF," *Description and implementation. Deliverable*, vol. 6, 2019.
- [9] M. Rodriguez, G. Fu, and D. Butler, "Green infrastructures and their impact on resilience: spatial interactions in centralized sewer systems," presented at the Proceedings of the 3rd ACM SIGSPATIAL International Workshop on Advances in Resilient and Intelligent Cities, Seattle, Washington, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3423455.3430302>.
- [10] M. Rodríguez, E. Lawson, and D. Butler, "A study of the Resilience Analysis Grid method and its applicability to the water sector in England and Wales," *Water and Environment Journal*, vol. 34, no. 4, pp. 623-633, 2020, doi: <https://doi.org/10.1111/wej.12539>.
- [11] ONU-Habitat. "La résilience urbaine." <https://unhabitat.org/fr/node/3774> (accessed 2021).
- [12] M. Suárez, E. Gómez-Baggethun, J. Benayas, and D. Tilbury, "Towards an Urban Resilience Index: A Case Study in 50 Spanish Cities," *Sustainability*, vol. 8, no. 8, p. 774, 2016. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/8/8/774>.
- [13] P. Beceiro, R. S. Brito, and A. Galvão, "Nature-based solutions for water management: insights to assess the contribution to urban resilience," *Blue-Green Systems*, vol. 4, no. 2, pp. 108-134, 2022, doi: 10.2166/bgs.2022.009.
- [14] J. Bush and A. Doyon, "Building urban resilience with nature-based solutions: How can urban planning contribute?," *Cities*, vol. 95, p. 102483, 2019.

# Références

- [15] L. Sturiale and A. Scuderi, "The Role of Green Infrastructures in Urban Planning for Climate Change Adaptation," *Climate*, vol. 7, no. 10, p. 119, 2019. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2225-1154/7/10/119>.
- [16] Y. Depietri, "Planning for urban green infrastructure: addressing tradeoffs and synergies," *Current Opinion in Environmental Sustainability*, vol. 54, p. 101148, 2022/02/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2021.12.001>.
- [17] V. Jennings and O. Bamkole, "The relationship between social cohesion and urban green space: An avenue for health promotion," *International journal of environmental research and public health*, vol. 16, no. 3, p. 452, 2019.
- [18] I. Voskamp and F. Van de Ven, "Planning support system for climate adaptation: Composing effective sets of blue-green measures to reduce urban vulnerability to extreme weather events," *Building and Environment*, vol. 83, pp. 159-167, 01/31 2015, doi: 10.1016/j.buildenv.2014.07.018.
- [19] X. Fu, M. E. Hopton, and X. Wang, "Assessment of green infrastructure performance through an urban resilience lens," *Journal of Cleaner Production*, vol. 289, p. 125146, 2021/03/20/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125146>.
- [20] J. C. Ferreira, D. Costa dos Santos, and L. C. Campos, "Blue-green infrastructure in view of Integrated Urban Water Management: A novel assessment of an effectiveness index," *Water Research*, vol. 257, p. 121658, 2024/06/15/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121658>.
- [21] M. Sapkota, M. Arora, H. Malano, A. Sharma, and M. Moglia, "Integrated Evaluation of Hybrid Water Supply Systems Using a PROMETHEE–GAIA Approach," *Water*, vol. 10, no. 5, p. 610, 2018. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/5/610>.
- [22] J. Langemeyer, D. Wedgwood, T. McPhearson, F. Baró, A. L. Madsen, and D. N. Barton, "Creating urban green infrastructure where it is needed – A spatial ecosystem service-based decision analysis of green roofs in Barcelona," *Science of The Total Environment*, vol. 707, p. 135487, 2020/03/10/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135487>.
- [23] W. Xu, Y. Kong, D. Proverbs, Y. Zhang, Y. Zhang, and J. Xu, "A Water Resilience Evaluation Model for Urban Cities," *Water*, vol. 14, no. 12, p. 1942, 2022. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2073-4441/14/12/1942>.
- [24] T. Wu, H. Song, J. Wang, and E. Friedler, "Framework, procedure, and tools for comprehensive evaluation of sustainable stormwater management: A review," *Water*, vol. 12, no. 5, p. 1231, 2020.
- [25] T. McPhearson, P. Kremer, and Z. A. Hamstead, "Mapping ecosystem services in New York City: Applying a social–ecological approach in urban vacant land," *Ecosystem Services*, vol. 5, pp. 11-26, 2013/09/01/ 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.06.005>.
- [26] J.-C. Chen, N.-B. Chang, C.-Y. Chen, and C.-S. Fen, "Minimizing the Ecological Risk of Combined-Sewer Overflows in an Urban River System by a System-Based Approach," *Journal of Environmental Engineering*, vol. 130, no. 10, pp. 1154-1169, 2004/10/01 2004, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9372(2004)130:10(1154).

# Références

- [27] M. Rodriguez, G. Fu, D. Butler, Z. Yuan, and L. Cook, "The effect of green infrastructure on resilience performance in combined sewer systems under climate change," *Journal of Environmental Management*, vol. 353, p. 120229, 2024/02/27/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120229>.
- [28] M. Rodriguez, G. Fu, D. Butler, Z. Yuan, and L. Cook, "Global resilience analysis of combined sewer systems under continuous hydrologic simulation," *Journal of Environmental Management*, vol. 344, p. 118607, 2023/10/15/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118607>.
- [29] X. Dong, H. Guo, and S. Zeng, "Enhancing future resilience in urban drainage system: Green versus grey infrastructure," *Water Research*, vol. 124, pp. 280-289, 2017/11/01/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.07.038>.
- [30] A. Casal-Campos, S. M. K. Sadr, G. Fu, and D. Butler, "Reliable, Resilient and Sustainable Urban Drainage Systems: An Analysis of Robustness under Deep Uncertainty," *Environmental Science & Technology*, vol. 52, no. 16, pp. 9008-9021, 2018/08/21 2018, doi: 10.1021/acs.est.8b01193.
- [31] M. Rodriguez, G. Fu, D. Butler, Z. Yuan, and K. Sharma, "Exploring the Spatial Impact of Green Infrastructure on Urban Drainage Resilience," *Water*, vol. 13, no. 13, p. 1789, 2021. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/13/1789>.
- [32] A. M. Rabori and R. Ghazavi, "Urban flood estimation and evaluation of the performance of an urban drainage system in a semi-arid urban area using SWMM," *Water Environment Research*, vol. 90, no. 12, pp. 2075-2082, 2018.
- [33] S. N. Mugume, D. E. Gomez, G. Fu, R. Farmani, and D. Butler, "A global analysis approach for investigating structural resilience in urban drainage systems," *Water Research*, vol. 81, pp. 15-26, 2015/09/15/ 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.05.030>.
- [34] J. Leandro, K.-F. Chen, R. R. Wood, and R. Ludwig, "A scalable flood-resilience-index for measuring climate change adaptation: Munich city," *Water Research*, vol. 173, p. 115502, 2020/04/15/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115502>.
- [35] X. Zhang, A. Kang, X. Lei, and H. Wang, "Urban drainage efficiency evaluation and flood simulation using integrated SWMM and terrain structural analysis," *Science of The Total Environment*, vol. 957, p. 177442, 2024/12/20/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177442>.
- [36] S. Meerow and J. P. Newell, "Spatial planning for multifunctional green infrastructure: Growing resilience in Detroit," *Landscape and Urban Planning*, vol. 159, pp. 62-75, 2017/03/01/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.10.005>.
- [37] A. Ferreira, O. Sykes, and P. Batey, "Planning Theory or Planning Theories? The Hydra Model and its Implications for Planning Education," *Journal for Education in the Built Environment*, vol. 4, no. 2, pp. 29-54, 2009/12/01 2009, doi: 10.11120/jebe.2009.04020029.