

Jumeau numérique dans l'environnement: Microclimat urbain

Hanna CHETOUANE, Narmimane ZAOUACHE

October 7, 2025

UFR of Mathematics and Informatics - University of Strasbourg

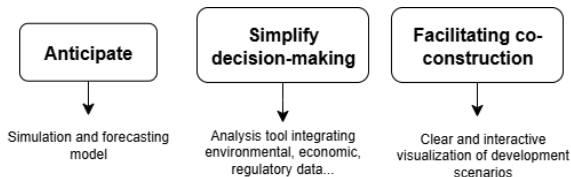
Comment les jumeaux numériques aident-ils à comprendre les effets des aménagements urbains sur le micro-climat ?

- L'écologie et le climat sont devenus des enjeux majeurs, surtout dans les villes où se développent des îlots de chaleur
- Solutions: Végétalisation, choix de matériaux adaptés et aménagements urbains repensés
- Les collectivités locales doivent ainsi prendre des décisions sur les stratégies d'aménagement à adopter et en évaluer l'impact environnemental et sanitaire

→ Simuler et prédire ces effets de ces choix sur le microclimat urbain et la santé publique ⇒ **Jumeau numérique**

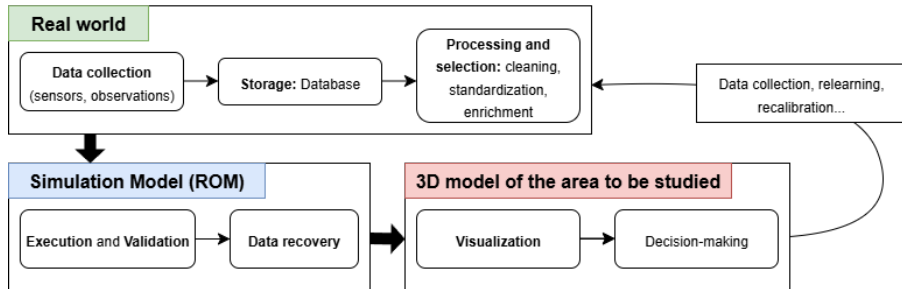
Qu'est-ce qu'un jumeau numérique ?

- Réplique virtuelle et dynamique d'un système réel, qui, couplé à des outils de simulation, permet d'analyser et prédire son comportement dans différentes conditions
- S'appuie sur des données réelles (météorologiques et urbaines) issues de capteurs, d'observations ou de modèles physiques



Défi actuel en France: projet JNFT porté par l'IGN, le Cerema et l'Inria, qui vise à créer un jumeau numérique multithématique couvrant le territoire français

Fonctionnement d'un jumeau numérique



Physique:

- Données (météo, propriétés des matériaux, composition de l'air)
- Micro-climat

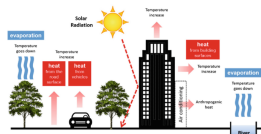


Numérique:

- Paramètres
- Maquette 3D maillée

Modèles physiques:

- Phénomènes physiques continus: PDEs (Navier-Stokes, chaleur, transport, diffusion)
- Interaction entre bâtiments, vent, végétation: Fluid-Structure Interaction (NS + Elasticity)
- Écoulement d'air et échanges thermiques: Computational Fluid Dynamics (NS + Heat; Transport; transfert radiatif)



Utilisation ROM: Réduction de l'ordre des modèles physiques pour accélérer les simulations

- **Offline:** Préparation du modèle

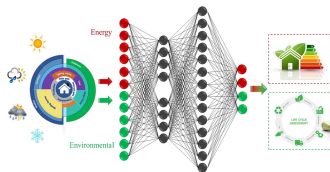
- Réduction de la dimension en capturant l'essentiel du système: Proper Orthogonal Decomposition (POD), Reduced Basis Method (RBM)
- Hyper-réduction: Réduit temps de calcul des termes non-linéaires (DEIM: Discrete Empirical Interpolation Method, gappy POD: gappy Proper Orthogonal Decomposition)

- **Online:** Simulation du modèle réduit pour tester différents scénarios rapidement



Data-Driven Models: basé sur les données, prédiction rapide

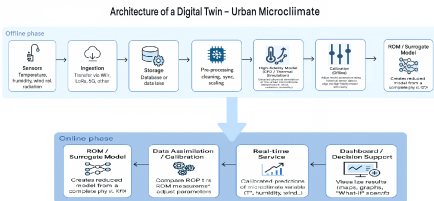
- Régression: prédit des phénomènes (température, qualité de l'air, vent) à partir de variables (matériaux, végétation...)
- Gaussian Process: prédit et donne l'incertitude pour des zones avec peu de données
- Réseaux de Neurones: capture les relations complexes et non-linéaires entre les variables
- Modèles d'ensembles: amélioration de la précision et de la robustesse des prédictions, en combinant plusieurs modèles



Data assimilation: Combinaison des modèles physiques et des données pour corriger les simulations, obtenir un maximum de précision et rendre ces simulations exploitables

- VAR: ajuste le modèle physique pour que les simulations collent aux observations (sur un ou plusieurs pas de temps)
- Filtre de Kalman: Mise à jour des prédictions en temps réel pour un suivi dynamique
- PBDW, GEIM: reconstruction du système avec peu de données, pour une vue d'ensemble
- Capteurs virtuels: estimation de variables où il n'y a pas de mesures, voir l'effet de nouveaux aménagements

Architecture and Pipeline



The digital twin architecture is divided into two main phases:

Offline: model construction, calibration, and reduction.

Online: real-time assimilation and decision support.

This structure ensures continuous synchronization between the physical and virtual environments.

Methods – Part 1: Physical and Reduced Models

1. Physical and Numerical Modeling

- Based on fundamental equations (CFD, thermal transfer, radiation).
- Represents airflow, heat diffusion, and the effect of urban materials.
- Provides detailed simulations but is computationally expensive.

2. Reduced Order Model (ROM / Surrogate Model)

- Built from the results of the high-fidelity physical model.
- Techniques: POD (Proper Orthogonal Decomposition), Reduced Basis Method (RBM), Hyper-reduction (DEIM).
- Enables calculations 100 to 1000 times faster while preserving accuracy.

3. Data-driven Approaches (Machine Learning)

- Use sensor data to complement or correct physical models.
- Methods: regression models, neural networks (Neural-ODE), Gaussian Processes.
- Useful in areas with limited or missing physical data.

4. Data Assimilation

- Continuously adjusts the model parameters using real-time measurements.
- Common methods: EnKF (Ensemble Kalman Filter), 4D-VAR, PBDW/GEIM.
- Keeps the digital twin consistent with the real environment in real time.

Data & Instrumentation — Data Budget (Urban Microclimate)

Goal: quantify sensor data rates and daily volumes to size network & storage for real-time operation.

| Sensor | # | Freq (Hz) | sample | Throughput (kB/s) | Vol/day (GB) | Comments |
|---------------------|----|-----------|---------|-------------------|--------------|-------------------------------|
| Air thermometer (T) | 20 | 1.00 | 8 | 0.16 | 0.014 | Ambient temperature |
| Hygrometer (RH) | 10 | 1.00 | 8 | 0.08 | 0.007 | Relative humidity |
| Anemometer (3-axis) | 5 | 1.00 | 12 | 0.06 | 0.005 | Wind speed & direction |
| Pyranometer (solar) | 5 | 0.20 | 16 | 0.016 | 0.0014 | Global irradiance |
| Thermal camera* | 2 | 0.033 | 500,000 | 33.0 | 2.85 | H.264, store temperature maps |

Formulas:

Throughput (kB/s) & Volume/day (GB)

$$\text{Throughput(kB/s)} : = \frac{\# \times \text{sample} \times \text{Freq}}{1000}$$

$$\text{Volume/day(GB)} : = \frac{\text{Throughput (kB/s)} \times 86\,400}{10^6}$$

Protocols/latency (summary): LoRaWAN for low-rate sensors (2–5 s latency);
Wi-Fi/4G for cameras (< 0.5 s).

Privacy: camera streams anonymized on edge; only thermal maps stored.

V&V & UQ — Verification, Validation & Uncertainty Quantification

Goal

Goal: ensure accuracy, reliability, and safety of decisions in the urban microclimate digital twin.

| Step | Purpose | Methods / Indicators |
|--|---|--|
| 1 Verification | Check model implementation and numerical stability. | Compare the Reduced Order Model (ROM) with the full CFD model. Ensure no numerical or stability errors. |
| 2 Validation | Evaluate how well the model matches real-world data. | Compare predictions with sensor measurements (T° , wind, humidity). Metrics: MAE , RMSE , R² . |
| 3 Uncertainty Quantification (UQ) | Estimate the confidence level of model predictions. | Methods: Monte Carlo, sensitivity analysis, Bayesian estimation. Example: $T = 32 \pm 1.5^\circ\text{C}$. |
| 4 Veto / Alert Mechanism | Prevent wrong or unsafe decisions when uncertainty is too high. | If variance or RMSE > threshold \rightarrow trigger alert or model recalibration. |

Outcome: a validated, uncertainty-aware model ensuring trustworthy real-time decisions.

Transfer & Deployment — CI/CD, Edge vs Cloud, Observability, Risks

Goal

ensure a smooth transition from R&D to real-time operation of the urban microclimate digital twin.

| Aspect | Description | Tools / Key Points |
|---|---|---|
| CI/CD (Continuous Integration & Deployment) | Automate the update cycle for models and data. | GitHub Actions, Docker, unit tests for ROM/data, dashboard updates. |
| Containers & Orchestration | Ensure portability and scalability of digital twin services. | Docker / Kubernetes: deployment of ROM model, APIs, dashboards. |
| Edge vs Cloud Computing | Balance local computing (edge) and centralized storage (cloud). | Edge: low latency (cameras, sensors). Cloud: heavy computations (assimilation, ROM training). |
| Observability & Monitoring | Track performance, errors, and model drifts. | Logs, metrics, and alerts through Grafana / Prometheus. |
| Costs & Risks (CAPEX/OPEX) | Optimize hardware resources and minimize downtime. | CAPEX: servers / sensors. OPEX: maintenance, energy, network. Risk: failure, model drift. |

Outcome: a reliable, automated, and maintainable digital twin for long-term operation.

Perspectives & Limitations — Toward a Sustainable Digital Twin

- **Scalability:** adapt the model to larger urban areas (optimized ROM, cloud computation).
- **Robustness:** handle sensor failures or noisy data (redundancy, adaptive models).
- **Bias:** avoid overfitting to one district (multi-scenario validation).
- **Privacy:** ensure GDPR compliance and anonymization of visual data.
- **Ethics:** promote transparency, explainable AI, and citizen involvement.

Thank you for your attention!

Any questions?

University of Strasbourg – 2025

Références I



Roberta Belanova.

Modélisation du microclimat : ce que c'est et pourquoi c'est important, 2025.

Accessed: 2025-10-05.



Roland Billen and Imane Jeddoub.

Les jumeaux numériques urbains : Un nouvel outil pour l'urbanisme et l'aménagement ?, 2024.

Accessed: 2025-10-05.



CNIG, Pôle Territoires.

Présentation : Jumeau numérique de la France - pilotage de la transition écologique.

https://cnig.gouv.fr/IMG/pdf/2025.01_20_jnft_presentation_cnig_pole_territoires.pdf, 2025.

Consulté le 5 octobre 2025.



Amaury et Christine.

Impact des villes sur le climat urbain : analyse des microclimats, 2025.

Accessed: 2025-10-05.



IGN.

Un jumeau numérique de la France pour piloter la transition écologique.

[https://www.ign.fr/institut/un-jumeau-numerique-de-la-france-pour-piloter-la-trans](https://www.ign.fr/institut/un-jumeau-numerique-de-la-france-pour-piloter-la-transition-ecologique)
2025.

Consulté le 5 octobre 2025.

Références III



IGN, Cerema, and Inria.

Fondateurs de la démarche : Jumeau numérique de la France, 2025.

Présentation institutionnelle du projet national de jumeau numérique.



OpenAI.

ChatGPT (GPT-5) — assistance à la rédaction et à la structuration du rapport sur le jumeau numérique du microclimat urbain.

<https://chat.openai.com>, 2025.

Modèle de langage développé par OpenAI, utilisé pour la reformulation, la traduction et la génération de contenu technique.



Siradel.

Le jumeau numérique pour atténuer les îlots de chaleur urbains (icu), 2025.

Accessed: 2025-10-05.



Université Paris-Saclay.

Mieux comprendre les microclimats urbains : un défi pour faire face au changement climatique dans les villes, 2025.

Accessed: 2025-10-05.



Author Unknown.

Digital twins for sustainable urban planning.

Journal of Cleaner Production, 2025.

Consulté le 5 octobre 2025.