

# Jumeau numérique dans l'environnement: Microclimat urbain

Hanna CHETOUANE, Narmimane ZAOUACHE

October 8, 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 ?*

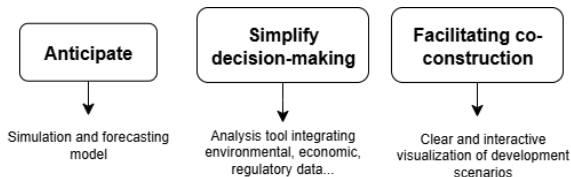
# Plan

- 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**

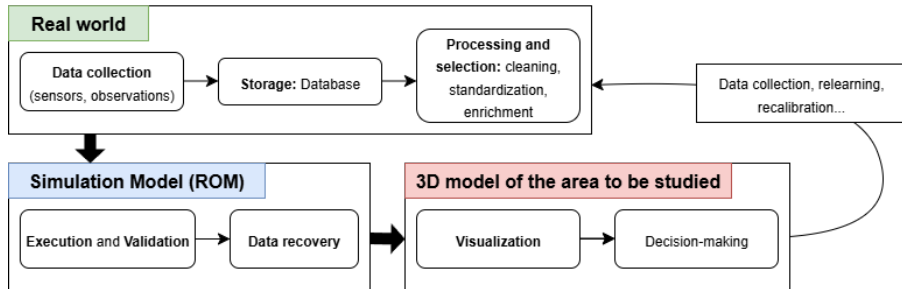
# Qu'est-ce qu'un jumeau numérique ?

- 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

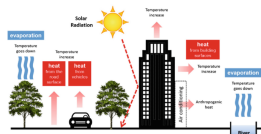


## Numérique:

- 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

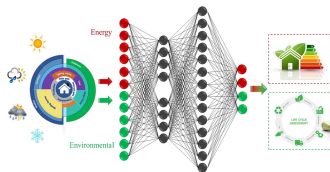
- Réduction de la dimension en capturant l'essentiel du système: Proper Orthogonal Decomposition (POD), Reduced Basis Method (RBM)
- Hyper-réduction: Réduit temps de calcul des termes non-linéaires (DEIM: Discrete Empirical Interpolation Method, gappy POD: gappy Proper Orthogonal Decomposition)

### - **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

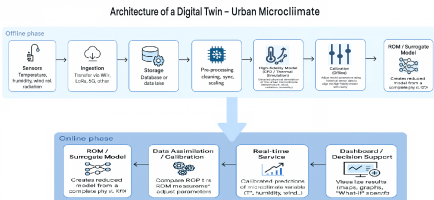




**Data assimilation:** Combinaison des modèles physiques et des données pour corriger les simulations, obtenir un maximum de précision et rendre ces simulations exploitables

- 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.

# Methods – Part 2: Data-driven and Data Assimilation

## 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
<b>1 Verification</b>	Check model implementation and numerical stability.	Compare the Reduced Order Model (ROM) with the full CFD model. Ensure no numerical or stability errors.
<b>2 Validation</b>	Evaluate how well the model matches real-world data.	Compare predictions with sensor measurements ( $T^\circ$ , wind, humidity). Metrics: <b>MAE</b> , <b>RMSE</b> , <b><math>R^2</math></b> .
<b>3 Uncertainty Quantification (UQ)</b>	Estimate the confidence level of model predictions.	Methods: Monte Carlo, sensitivity analysis, Bayesian estimation. Example: $T = 32 \pm 1.5^\circ\text{C}$ .
<b>4 Veto / Alert Mechanism</b>	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](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.