A nighttime aerial view of a modern city. The most prominent feature is a tall, dark skyscraper on the left, illuminated with bright blue lights. The building has a grid-like facade and a vertical strip of lights on its side. Below the skyscraper, there are several smaller, modern buildings with glass facades, some of which are also illuminated. The city extends into the distance, with numerous lights from buildings and streets. In the foreground, there are palm trees and a large, circular plaza or park area with some structures. The overall scene is a vibrant, illuminated urban landscape at night.

Introduction aux jumeaux numériques de ville

Prof. R. Laurini

Jumeau numérique de ville

- Il s'agit de construire un modèle numérique de la ville sur lequel on pourra opérer des analyses et faire des simulations selon certaines hypothèses et en tirer des conclusions pour l'aménagement.
- Il s'agit d'un nouveau concept, bien que l'intuition (précurseurs) existe depuis les années 70
 - Banques de données et bases de données urbaines
 - Modèles de développement
 - Systèmes d'information géographique
 - Maquettes numériques 3D

Table des matières

- 1. Introduction, objectifs
- 2. Technologies
- 3. Conclusions

1. Introduction, objectifs

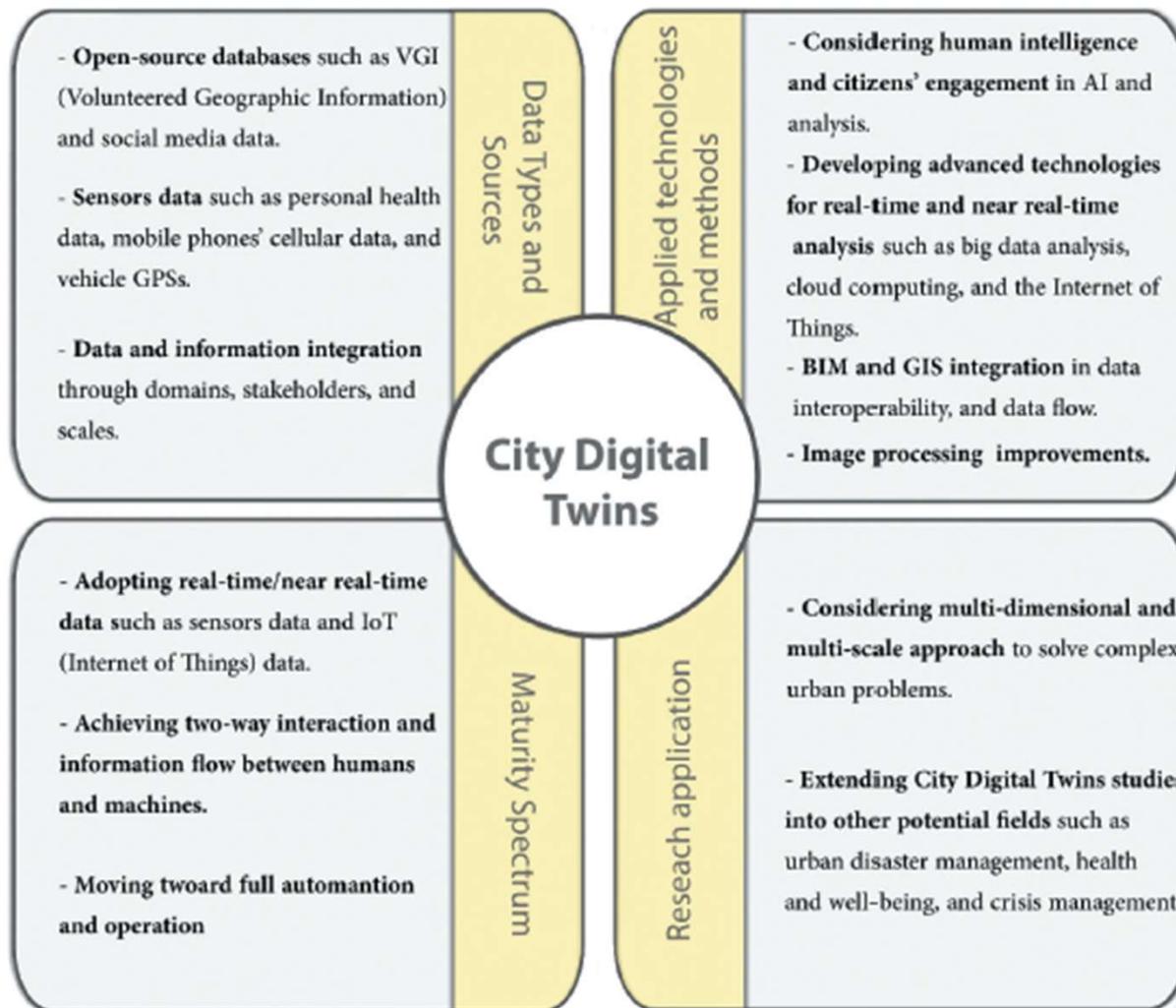
- Il existe de nombreuses définitions des jumeaux numériques de ville
- Finalités communes
 - Avoir une image numérique vivante dans toute sa complexité
 - La piloter en temps réel de manière optimale
 - Permettre de faire scénarii d'évolution et voir leurs conséquences



Figure 2. City digital twin potentials.

Shahat, E.; Hyun, C.T.; Yeom, C. City Digital Twin Potentials: A Review and Research Agenda. Sustainability 2021, 13, 3386.

<https://doi.org/10.3390/su13063386>



Homa Masoumi, Sara Shirowzhan, Paria Eskandarpour & Christopher James Pettit (2023) City Digital Twins: their maturity level and differentiation from 3D city models, Big Earth Data, 7:1, 1-36, DOI: 10.1080/20964471.2022.2160156

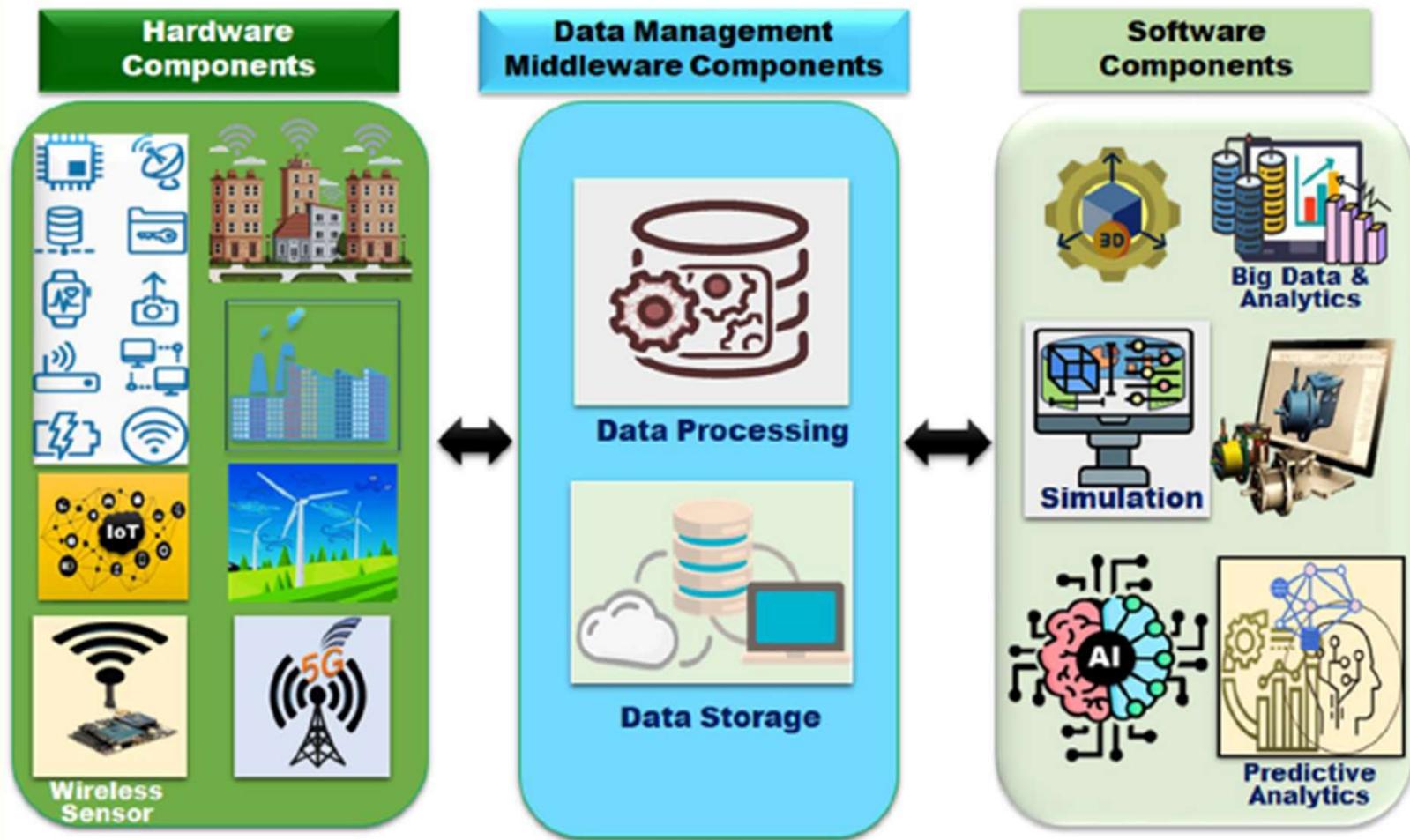
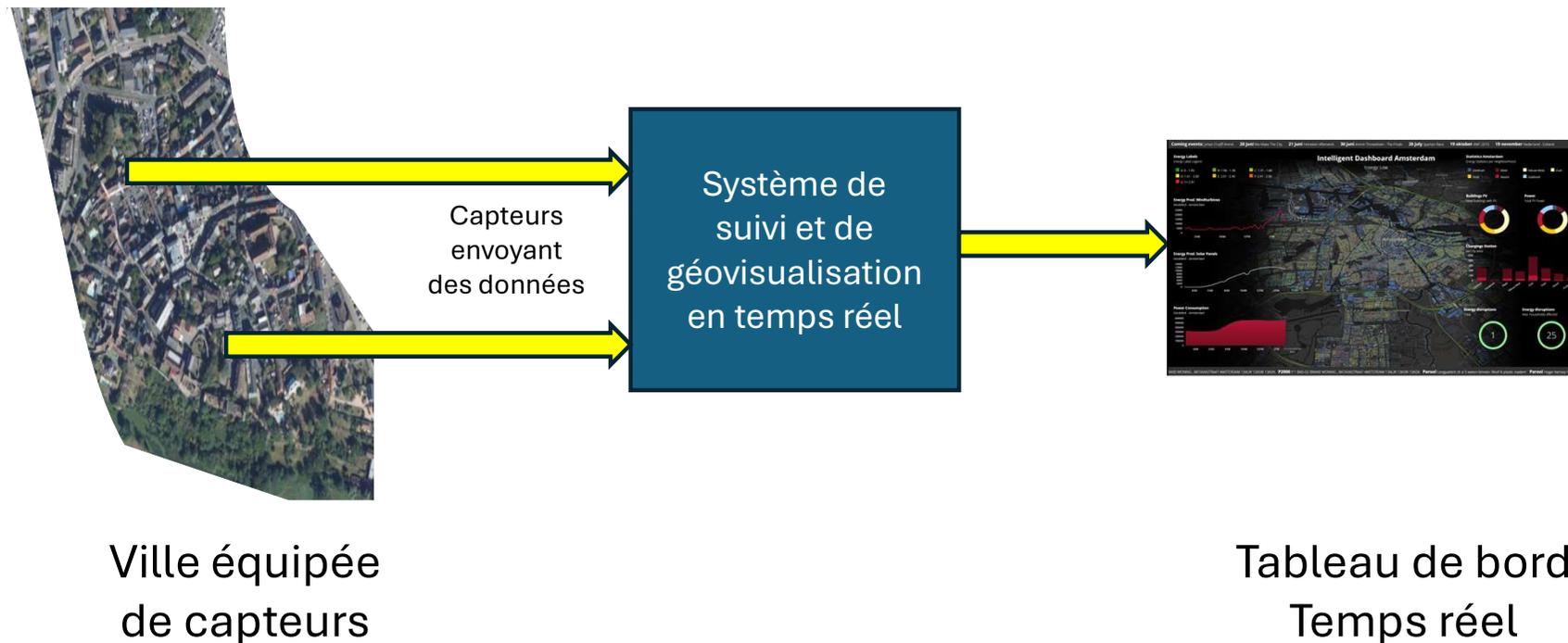


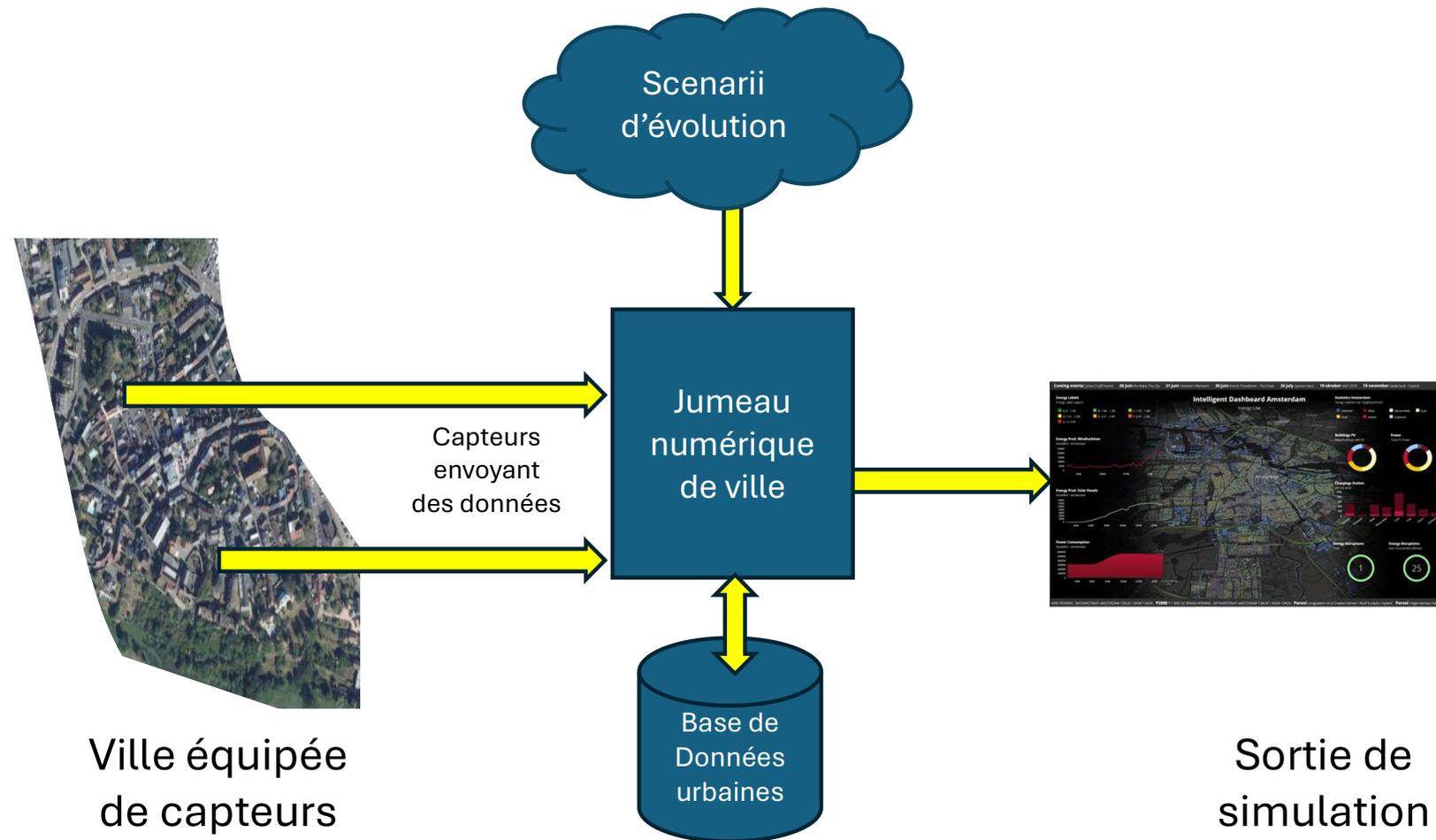
Fig.1 Digital twin system structure. This diagram illustrates the essential components of a Digital Twin system, showcasing hardware with IoT sensors, middleware for data management, and a software analytics engine

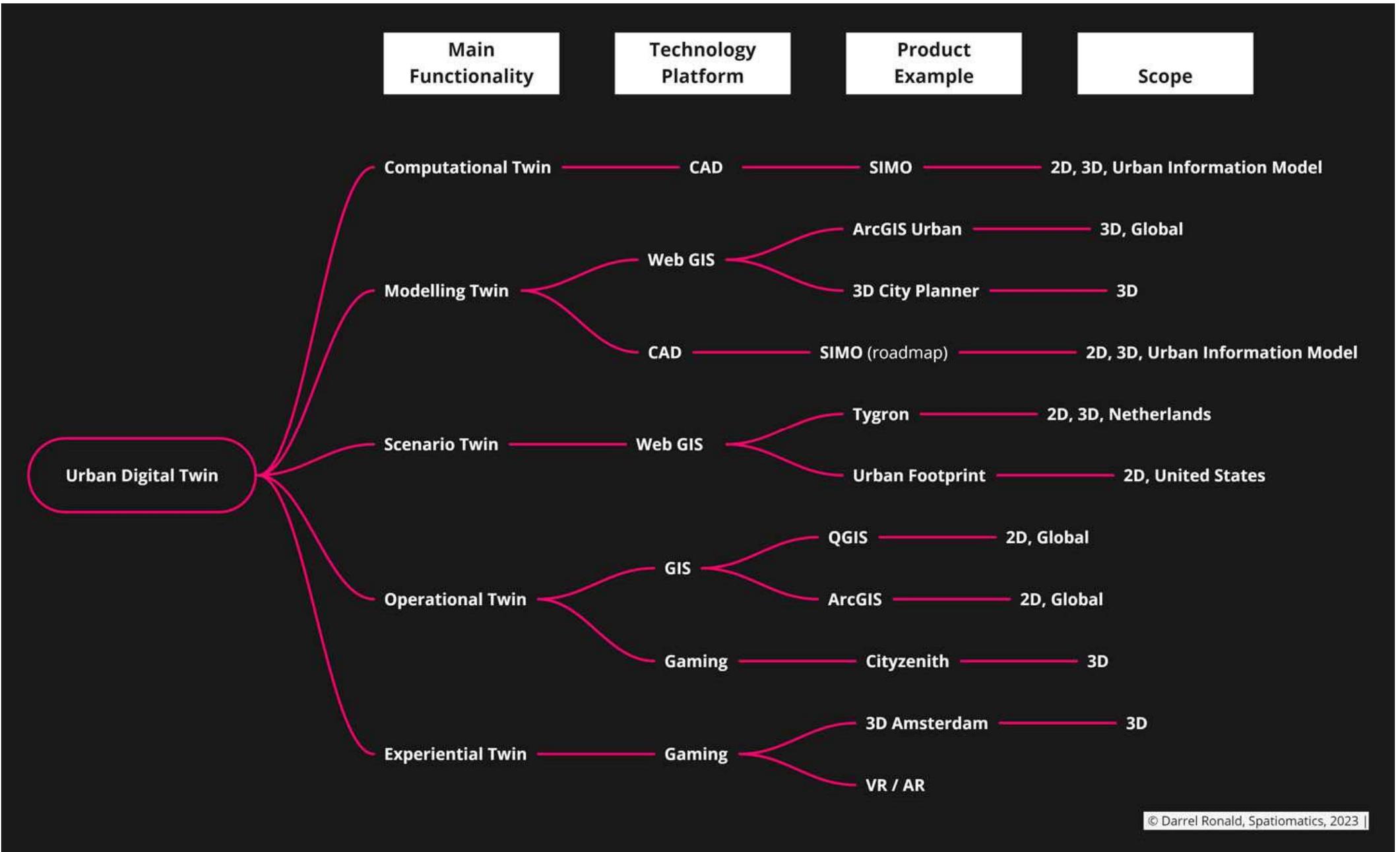
Rasha F. El-Agamy, Hanaa A. Sayed, Arwa M. AL Akhatatneh, Mansourah Aljohani, Mostafa Elhosseini (2024) Comprehensive analysis of digital twins in smart cities: a 4200-paper bibliometric study. Artificial Intelligence Review (2024) 57:154 <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10781-8>

Principe des systèmes de suivi et de géovisualisation en temps réel



Principe des systèmes de jumeau numérique





© Darrel Ronald, Spatiomatics, 2023 |

<https://aecmag.com/digital-twin/five-types-of-urban-digital-twins/>

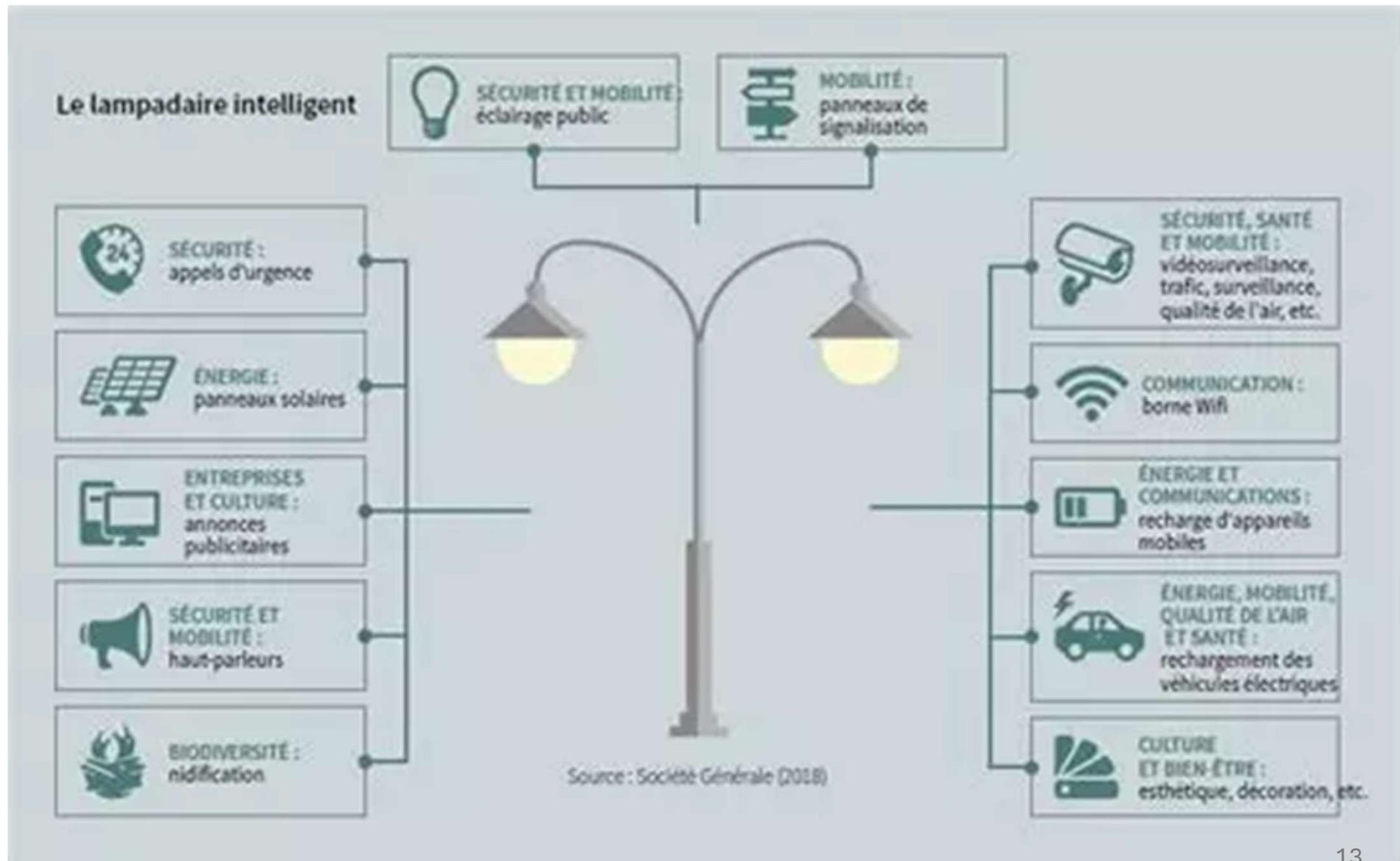
2. Technologies

- 2.1 Capteurs
- 2.2 Modèles de développement urbain
- 2.3 Modèles 3D
- 2.4 Géovisualisation et tableaux de bord
- 2.5 GeoAI

2.1 Capteurs

- Suivant leur fonction, ils envoient des signaux
- Souvent régulièrement
- Certains ont des possibilités de stockage local
- Genre particulier de base de données distribuées
- Souvent liés à l'Internet des Objets

Lampadaire intelligent



Eclairage intelligent des rues

- Principe :
 - les lampadaires le long des rues s'éclairent lorsque passe un véhicule
 - Ils envoient un ordre aux lampadaires suivants pour éclairer
 - ainsi est créée une onde lumineuse permettant au véhicule de circuler rapidement.
 - nécessité de gérer plusieurs véhicules dans les deux sens
- Des capteurs sont installés dans les lampadaires
- Ils détectent la présence de véhicules et leur vitesse
- Ils informent les lampadaires suivants en fonction de la vitesse du véhicule

Eclairage intelligent des rues

HOW A SMART STREETLIGHT WORKS



2.2 Modèles mathématiques de développement urbain

- Très à la mode dans les années 70-80
- Hiver pendant 30 ans
- Retour sur le chemin critique de la recherche
- Deux types
 - **Statique** (pour comprendre et analyser les relations statiques entre composantes urbaines)
 - $\vec{V}(t) = f(a, b, c,)$
 - **Dynamique** (pour comprendre et analyser les évolutions)
 - $\vec{V}(t + 1) = f(\vec{V}(t), e(t), d(t))$

Exemple : trajets domicile-travail

- Trajets domicile-travail T_{ij}
- Modèle de A.G. Wilson
- Ville divisée en n zones
- Connaissant (où C_{ij} est la distance interzone)
 - $\sum_i^n T_{ij} = O_i \quad \sum_j^n T_{ij} = D_j$
 - $\sum_{ij} T_{ij} C_{ij} = C$
- Il suffit de maximiser l'entropie sous contrainte
- $H = - \sum_{ij} T_{ij} \ln T_{ij}$

Exemple statique (suite)

- On écrit le lagrangien

- $$L = - \sum_{ij}^n T_{ij} \ln T_{ij} + \sum_j^n \alpha_j (\sum_i^n T_{ij} - D_j) + \sum_i^n \delta_i (\sum_j^n T_{ij} - O_i) + \beta (\sum_{ij}^n T_{ij} C_{ij} - C)$$

- Pour obtenir l'optimum, on annule la dérivée partielle du lagrangien

- $$\frac{\partial L}{\partial T_{ij}} = 0$$

- Dont la solution est :

- $$T_{ij} = A_i B_j \exp(-\beta c_{ij})$$

Sur les C_{ij}

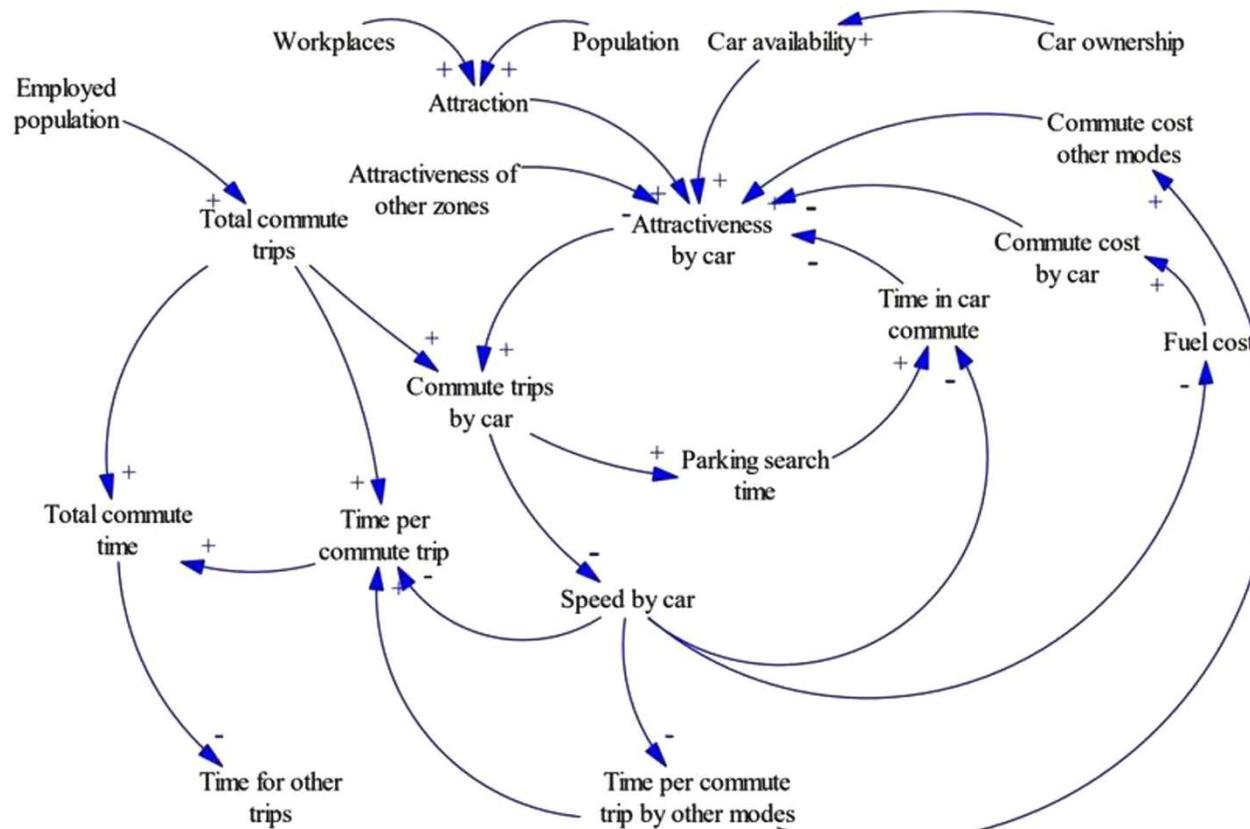
- Distance interzone à vol d'oiseau
- Distance sur le réseau routier
- Distance en tenant compte des capacités des voies

- Si nouvelle voie, changer les C_{ij} concernés
- Et refaire les calculs

Exemple de modèle dynamique

- Croissance de la population dans une zone
- Vecteur $\overrightarrow{P}(t)$ population par âge et sexe
- $$\overrightarrow{P}(t + 1) = A\overrightarrow{P}(t) + \overrightarrow{E}(t) + \overrightarrow{S}(t)$$
- avec
 - $\overrightarrow{E}(t)$ sont les entrées (nouveaux arrivants)
 - $\overrightarrow{S}(t)$ sont les sortants (ceux qui sont partis)

Exemple d'interactions

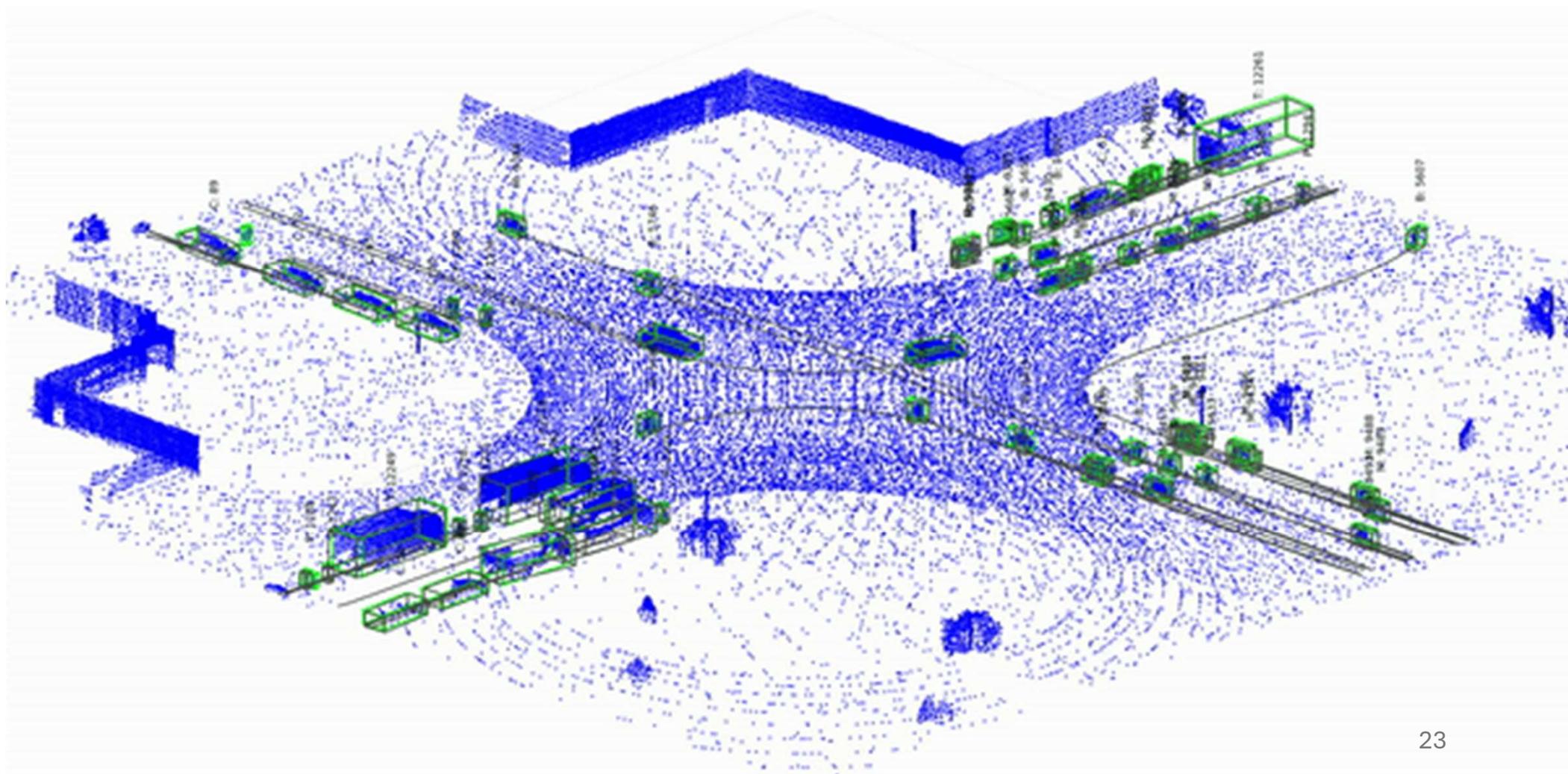


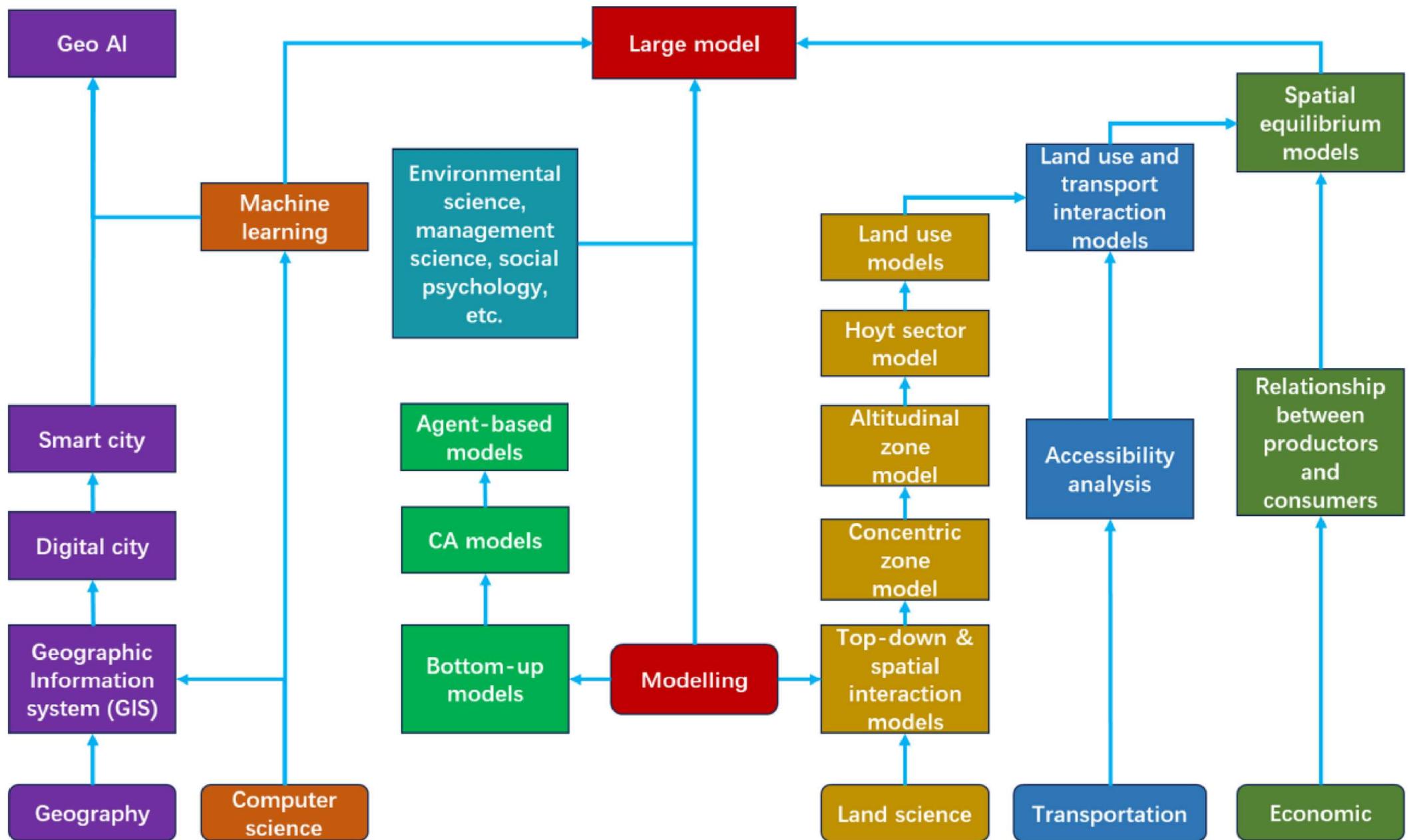
Jing Wang, Gengze Li, Huapu Lu, Zhouhao Wu (2024) Urban models: Progress and perspective Sustainable Futures 7 (2024) <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2024.100181>

What-if models

- Calibration, calage des modèles sur la réalité
- Présentation de scénarii d'évolution
- Confronter les résultats de diverses alternatives

Exemple de simulation





Jing Wang, Gengze Li, Huapu Lu, Zhouhao Wu (2024) Urban models: Progress and perspective Sustainable Futures 7 (2024)
<https://doi.org/10.1016/j.sftr.2024.100181>

2.3 3D

- Pour certains auteurs, la représentation 3D est le cœur des jumeaux numériques
- Usages
 - Vision globale de la ville
 - Visualisation des projets urbains
 - Visualisation des conséquences des risques
 - Intégration des nouveaux bâtiments
 - Simulation des effets du vent
 - Emplacement des panneaux photovoltaïques
 - Emplacement des jardins sur les toits
 - Etc.

Exemple : Amsterdam



<https://aecmag.com/digital-twin/five-types-of-urban-digital-twins/>

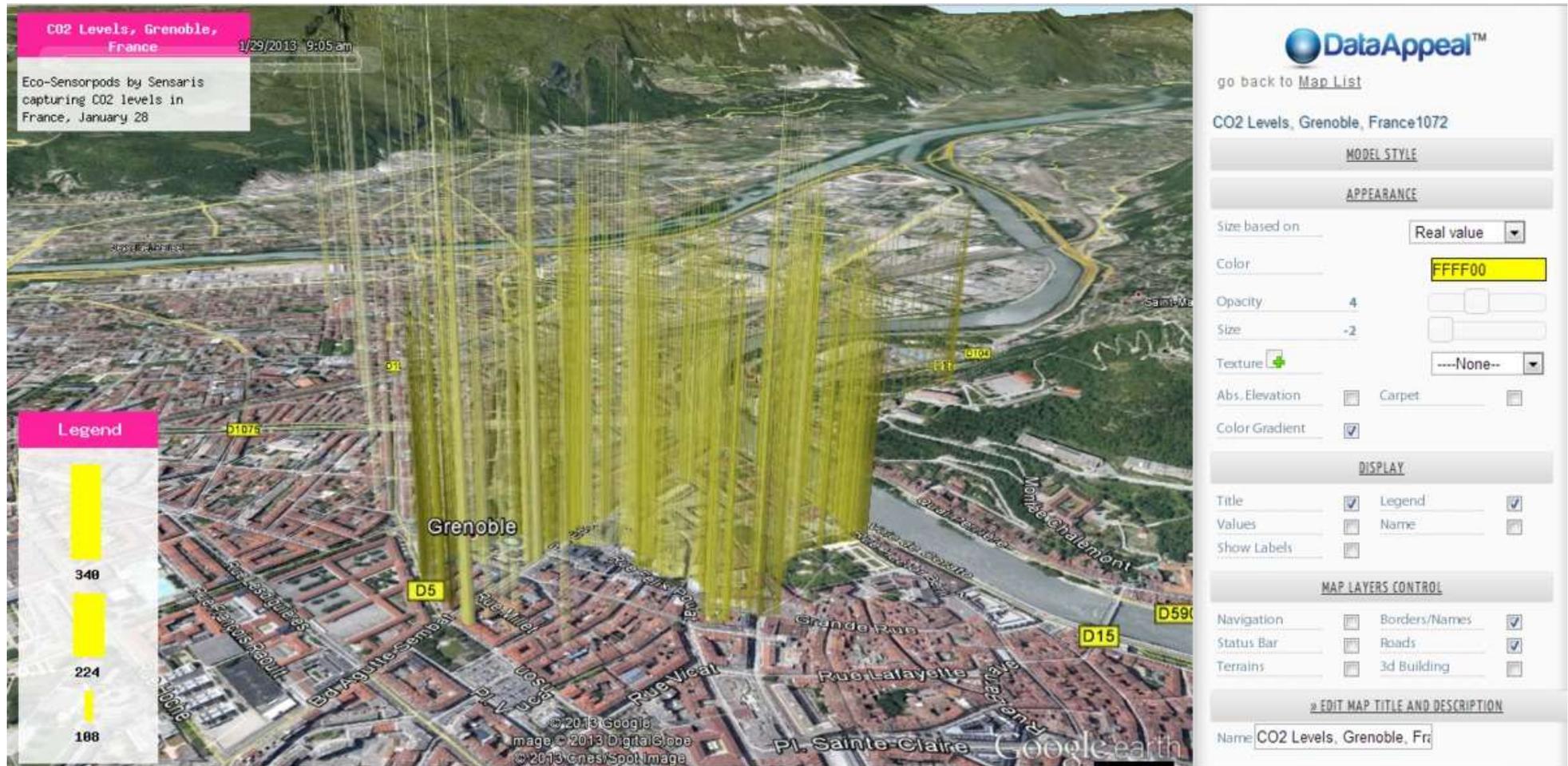
Exemple : Singapour



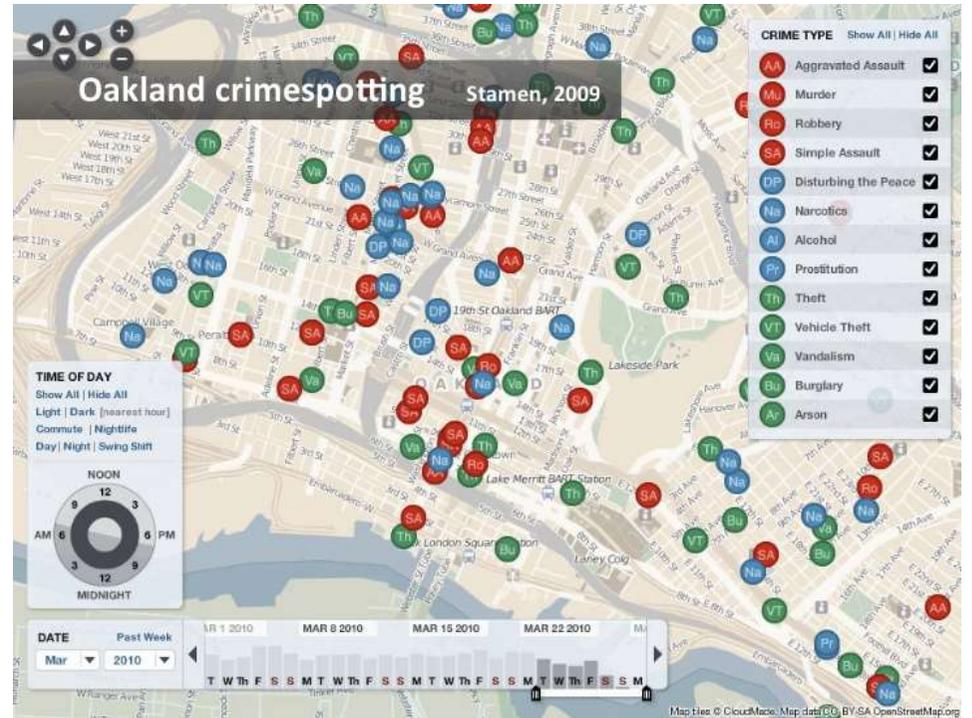
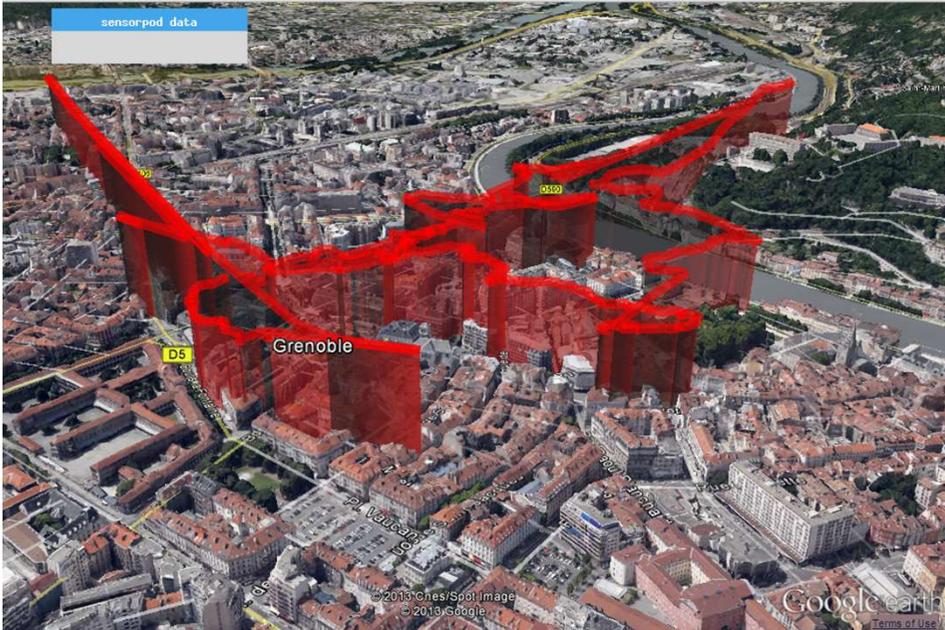
2.4 Géovisualisation et tableaux de bord

- Visualisation globale
- Mantra de Ben Schneiderman
- “*Overview, zoom and filter, details-on-demand*”
- Géovisualisation
 - Chorèmes
 - Paysage de données (datascape de Nadia Amoroso)
- Tableaux de bord
- <https://placesjournal.org/article/mission-control-a-history-of-the-urban-dashboard/?cn-reloaded=1>

Pollution de l'air



<https://www.nadiaamoroso.com/creative-cartography>

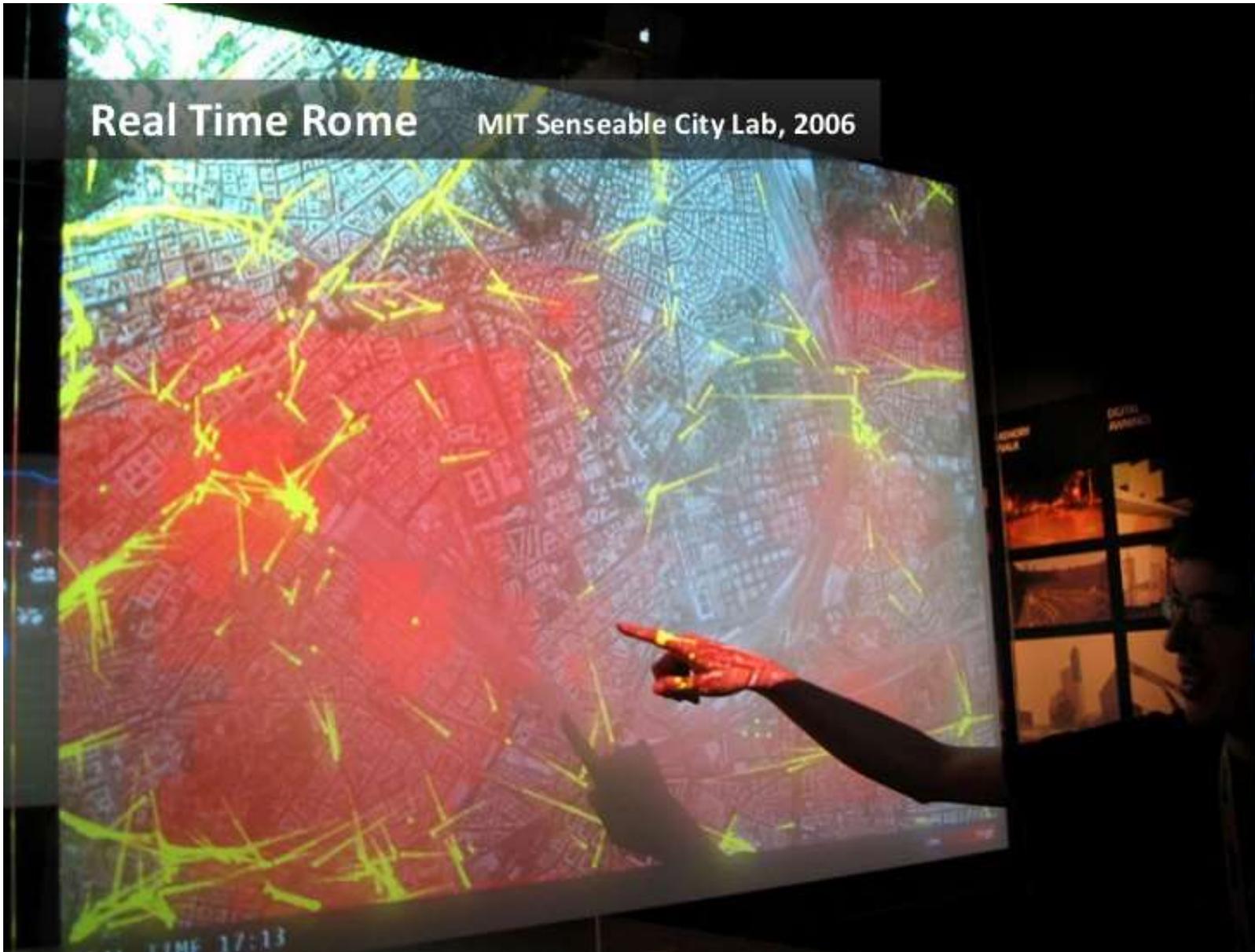




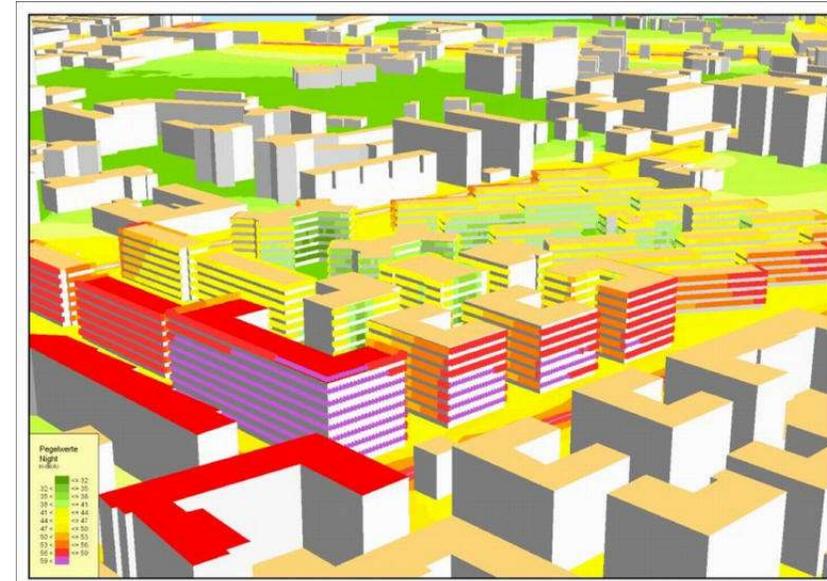
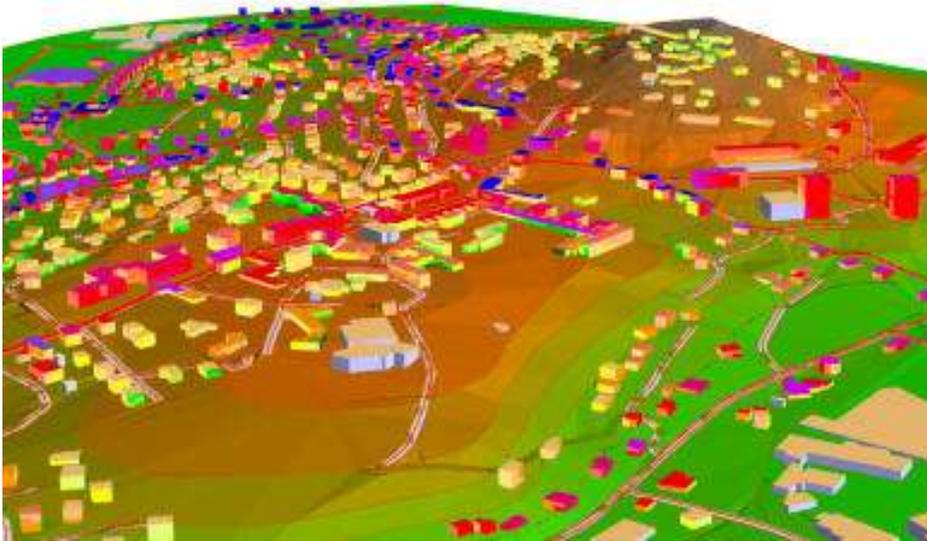
Virtual Singapore. Solar Panel Production.
Source: National Research Foundation,
Prime Minister's Office Singapore.

Real Time Rome

MIT Senseable City Lab, 2006



Exemples de visualisation du bruit



Exemple : Zurich

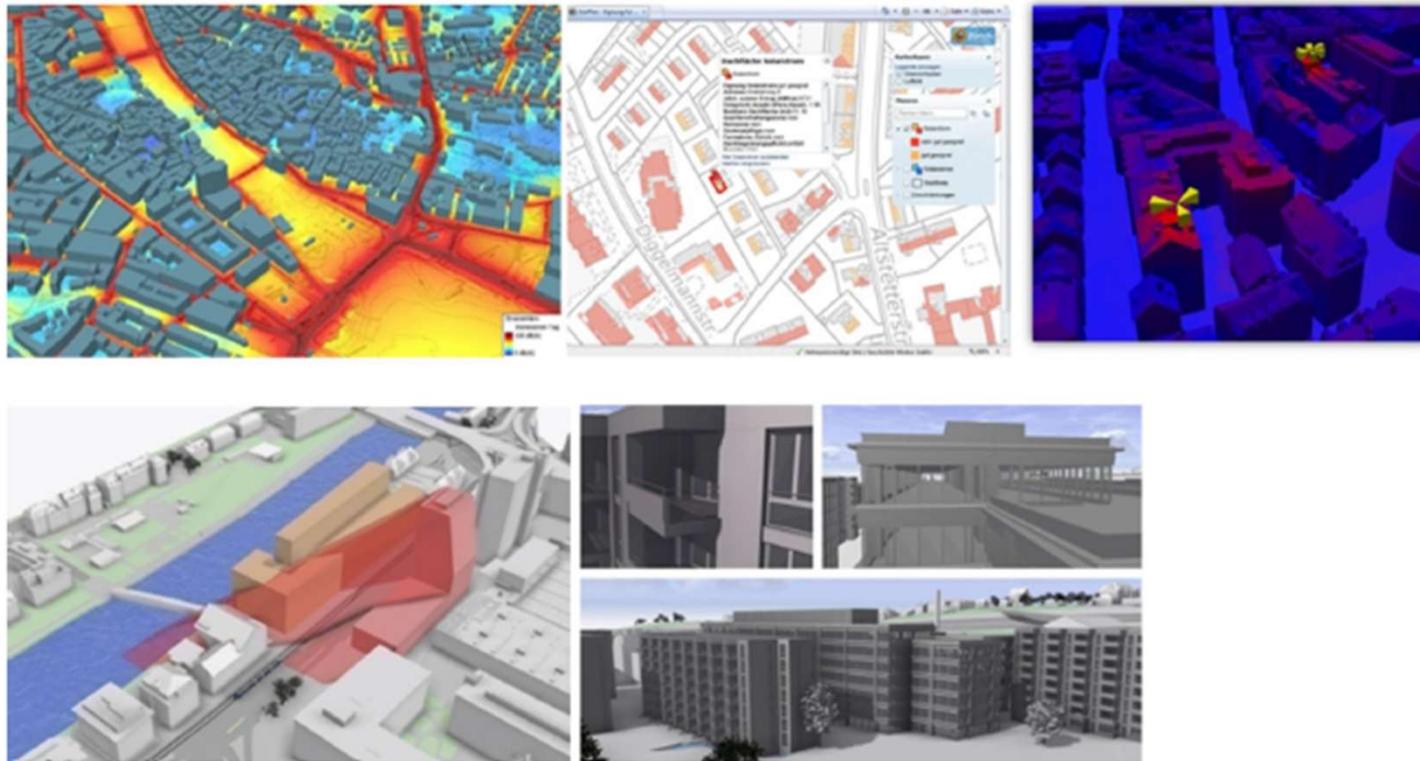


Fig. 7 Established applications: noise (upper left), air pollution (upper centre), mobile phone radiation (upper right), solar potential (lower left), visualization of construction projects (lower right) (source: City of Zurich)

Gerhard Schrotter · Christian Hürzeler (2020) The Digital Twin of the City of Zurich for Urban Planning. PFG (2020) 88:99–112
<https://doi.org/10.1007/s41064-020-00092-2>

DublinDashboard
City Intelligence

Maynooth University
City of Dublin
Councillor Cathrache
Braille Ailín Clavin
Dublin City Council

Homepage About DublinDashboard Share

Dublin Overview How's Dublin Doing? Dublin RealTime

Dublin Mapped Dublin Planning Dublin Near To Me

Home - How's Dublin Doing?

Dublin Data Reports

Dublin Indicators

Home - Dublin Doing

Dublin Indicators

- Industry, Employment & Labour Market
- Demographics

Home - Dublin Overview

Dublin at a Glance

Current Time in Dublin: November 26, 2022, 12:27 PM

The information on this page is automatically updated as the data becomes available.

Transport

Current Green Lane
Air Quality: 12 - Moderate

Current Green Lane
PM10 Levels: 15 micrograms

Electric Bus

Traffic Street

Environmental Indicators

Water level at Liffade
is 31.621

Water level at
Roslindown is 3.821

Sound level at
Dunmore Quay is
55.20db

Sound level at
Dunmore Park
Dublin is 55.40db

Home - Dublin Real Time

Dublin Traffic: All Travel

Data Sources

The inter-urban travel times on the M50 are taken from Traffic Information Systems Ireland.

The travel times on the major roads into Dublin City are taken from Dublin City Council's Travel Time Recording and Integrated Performance System (TRIPS). Further information about this data set can be found [here](#).

The Car Park Data is supplied directly by Dublin City Council of Dublin. The colour gradient is determined by the percentage of available spaces. More information about this data can be found [here](#).

The Traffic Camera Data is supplied directly by Dublin City Council. More information about this data can be found [here](#).

The Dublin Open Data is obtained directly from the Dublin Open API. More information about this data can be found [here](#).

Home - Dublin Doing

Dublin Indicators

- Industry, Employment & Labour Market
- Environment & Transport
- Housing
- Demographics
- Health & Education
- Crisis & Emergency Services

Population Statistics

Count Rate

Population of Dublin

Source: CSO

Year	Population	Male	Female
1847	~100,000	~50,000	~50,000
1851	~105,000	~52,000	~53,000
1855	~110,000	~54,000	~56,000
1861	~115,000	~56,000	~59,000
1871	~125,000	~60,000	~65,000
1881	~135,000	~65,000	~70,000
1891	~145,000	~70,000	~75,000
1901	~155,000	~75,000	~80,000
1911	~165,000	~80,000	~85,000
1921	~175,000	~85,000	~90,000
1931	~185,000	~90,000	~95,000
1941	~195,000	~95,000	~100,000
1951	~205,000	~100,000	~105,000
1961	~215,000	~105,000	~110,000
1971	~225,000	~110,000	~115,000
1981	~235,000	~115,000	~120,000
1991	~245,000	~120,000	~125,000
2001	~255,000	~125,000	~130,000
2011	~265,000	~130,000	~135,000
2019	~275,000	~135,000	~140,000

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1071581920300331#:~:text=City%20dashboards%20use%20a%20suite%20of%20visual%20analytics%20-%20dynamic>

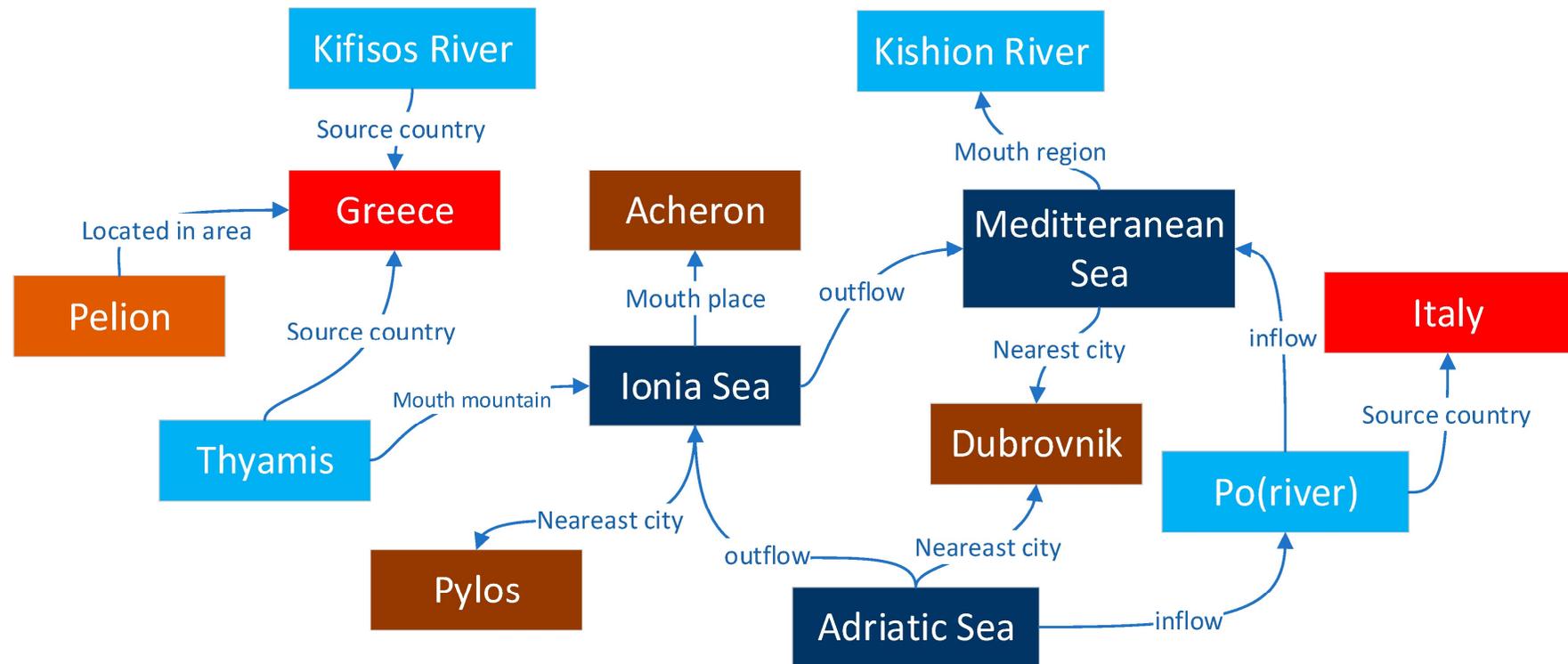
2.5 GeoAI

- Peu de travaux d'IA pour l'aménagement urbain
- Systèmes fondés sur des règles
- Graphes de connaissance géographique (GeoKG)
- Apprentissage profond
- IA générative; Grands modèles de langue
- LLM \leftrightarrow GeoKG ?

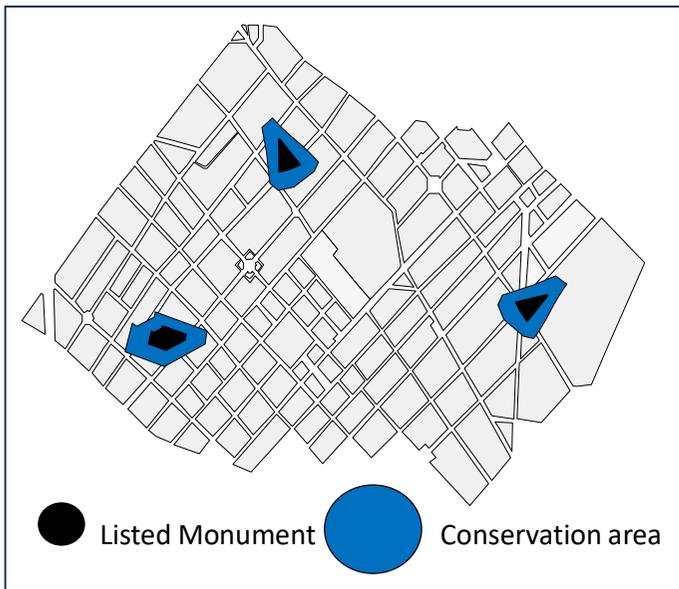
Définition des connaissances géographiques

- Connaissances = information pouvant être utilisée pour résoudre un problème ou faciliter la prise de décisions
- Pour un territoire, les connaissances géographiques correspondent à des informations potentiellement utiles pour :
 - expliquer
 - gérer
 - surveiller
 - simuler l'avenir
 - et planifier

Exemple de réseaux sémantiques



Exemple de règles autour des monuments historiques



$\forall T \in Earth, \forall B \in PROJECT, \exists M \in Geo-Objects,$

$Type(B) = \text{“Building”},$

$Type(M) = \text{“Listed_Monument”},$

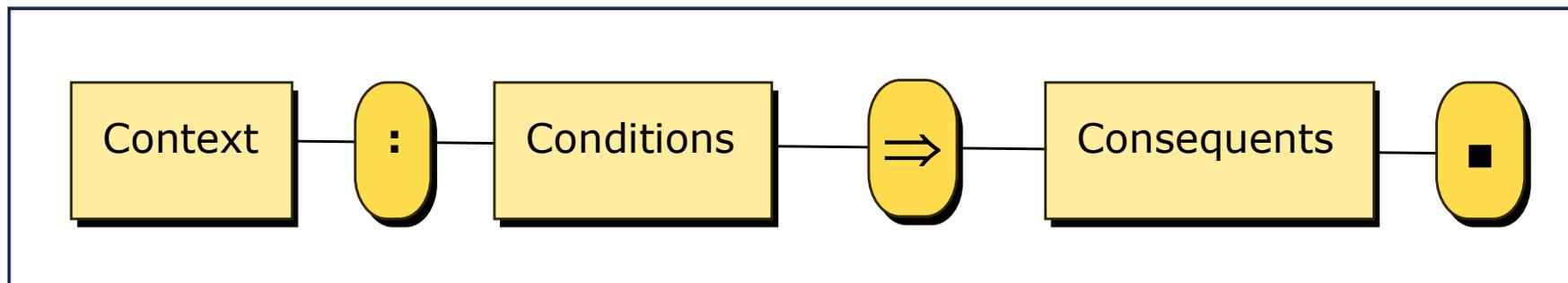
$\models Inside(Geom(B), T), Inside(Geom(M), T)$

:

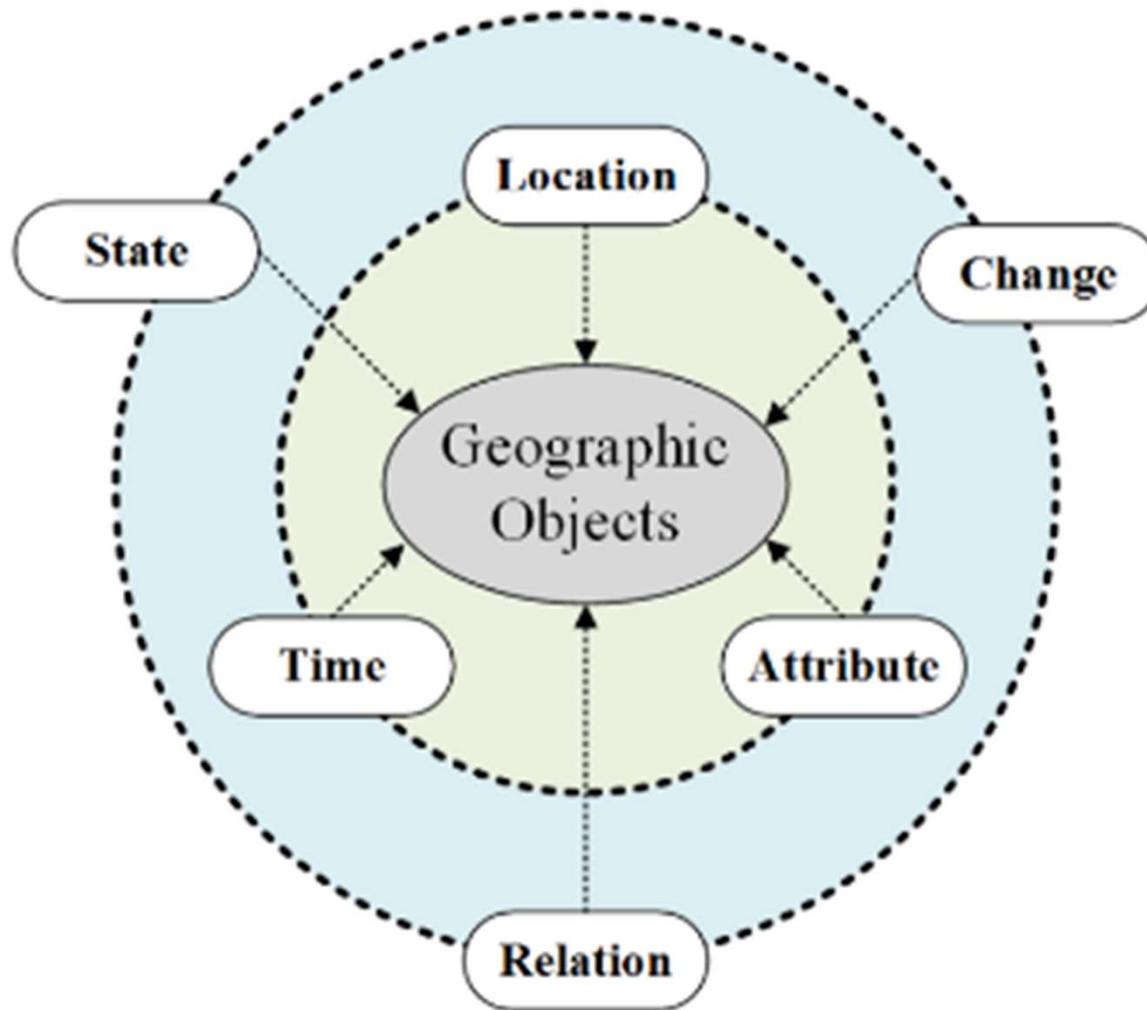
$Disjoint(Geom(B), Union(Buffer(Geom(M), 100)))$

\Rightarrow

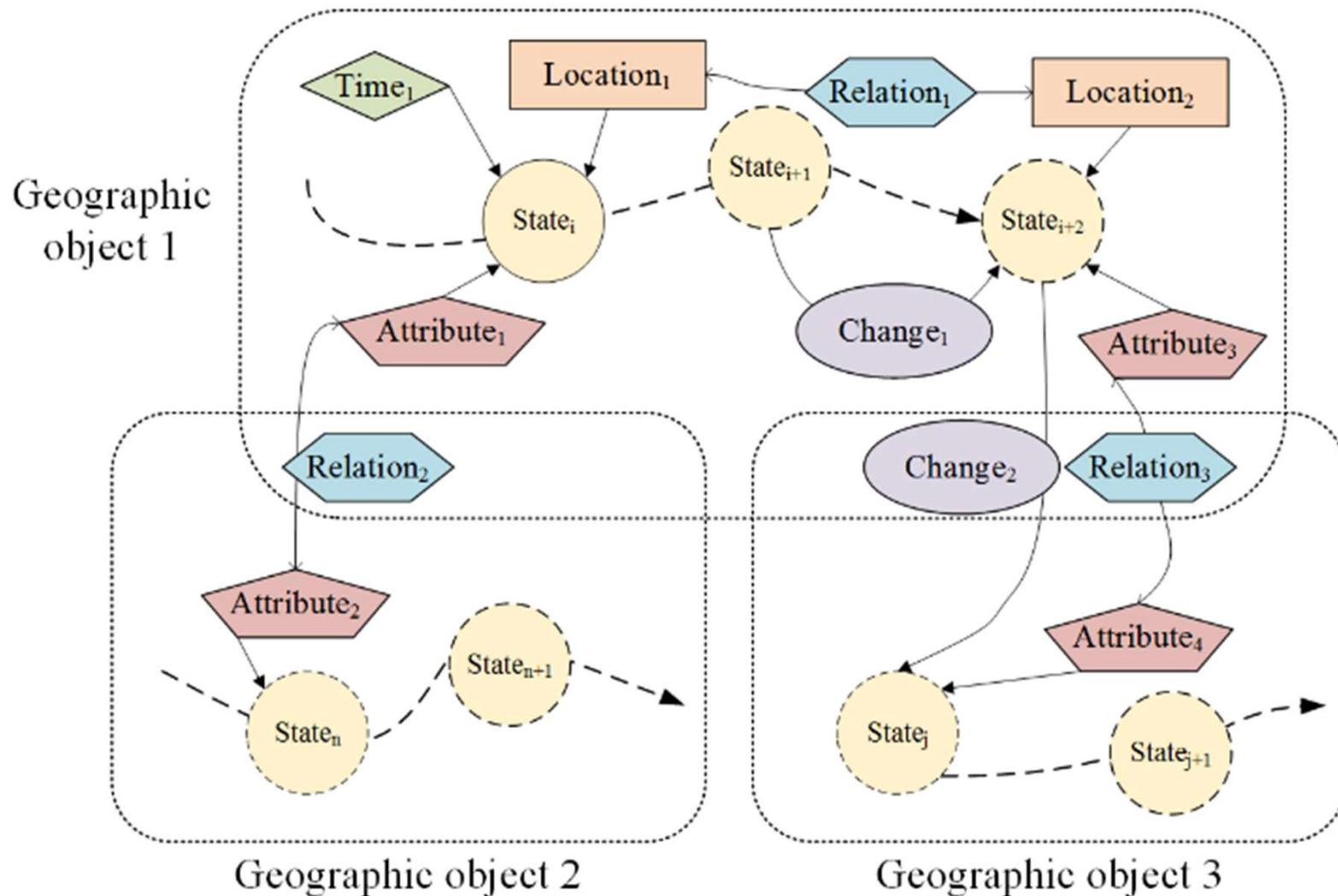
$State(B) = \text{“LM_Approved”}$



Geo-KG (Shu Wang 2019)

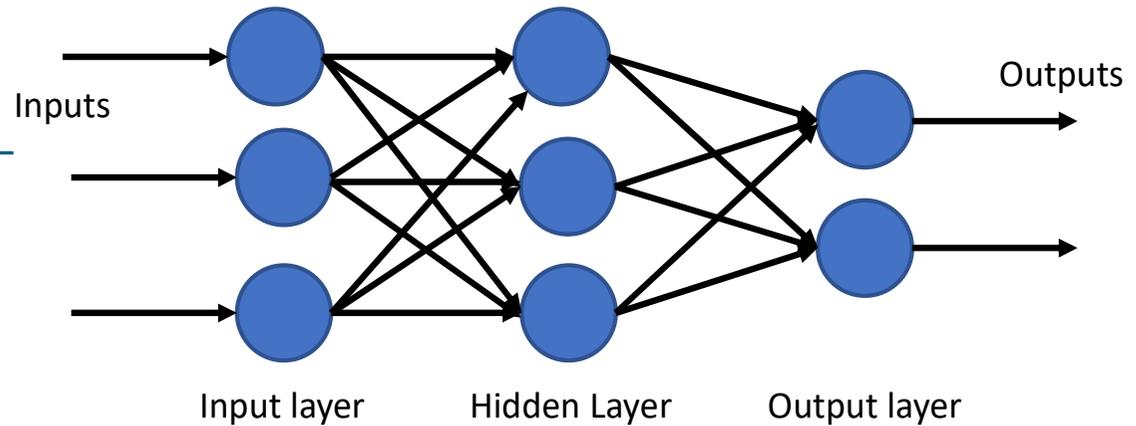
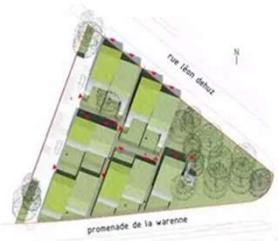


Grandes interactions entre objets urbains Geo-KG (Shu Wang 2019)



Apprentissage

Ex: Plan masse

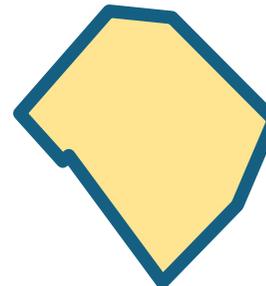


Saisie de requête

Forme du terrain

Nombre de bâtiments

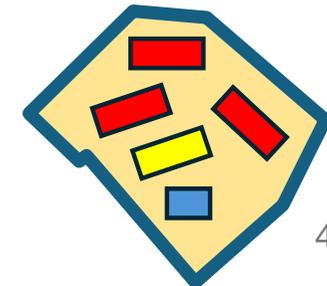
Autres services



Réponse de la requête

Proposition de

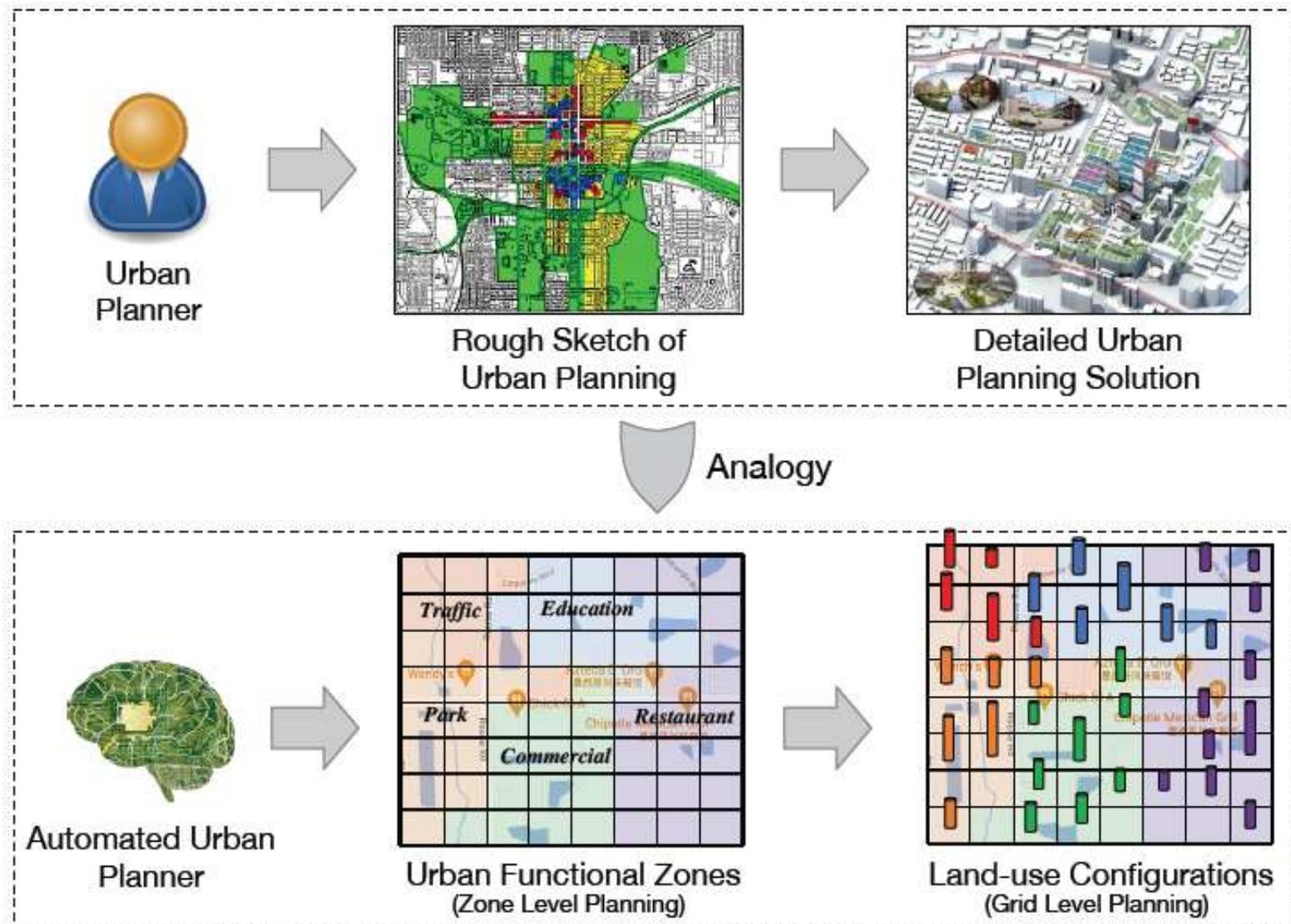
plusieurs plan-masse



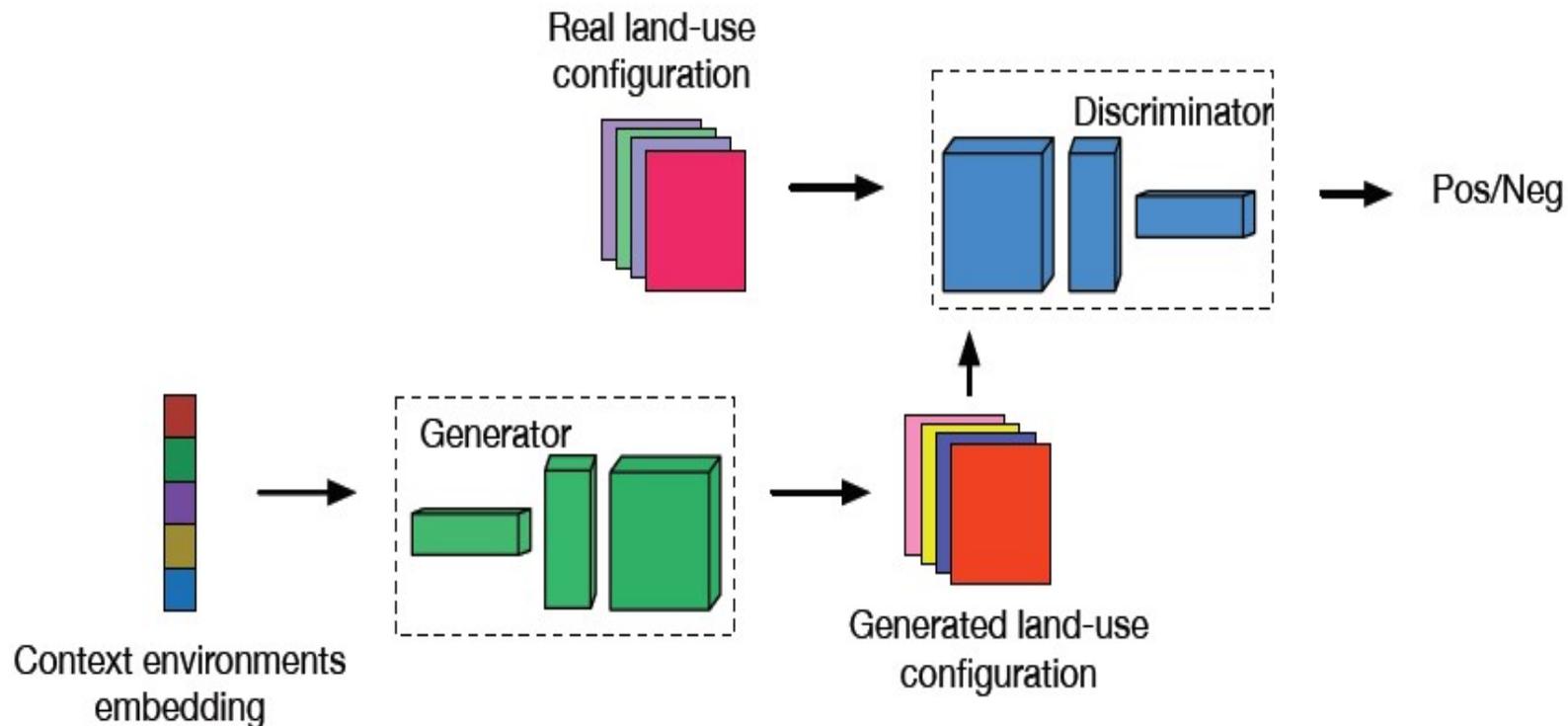
Modèles de fondation

- Chatbots basés sur des modèles de grande taille
 - Grands ensembles de textes de formation
 - Jeton (partie d'un mot) (N -gram)
 - Statistiques entre les jetons
 - Bien adapté pour les textes, images, etc.
- Qu'en est-il de l'espace?
 - photos aériennes,
 - images satellites
 - Terrains
 - Ville 2D
 - Ville 3D

Approach from Dongjie Wang et al. (2023)



Planificateur automatique de la configuration de l'utilisation des sols



- Wang D., Fu Y., Wang P., Huang B., & Lu C.T. (2020). Reimagining City Configuration: Automated Urban Planning via Adversarial Learning. In *28th International Conference on Advances in Geographic Information Systems (SIGSPATIAL '20)*, November 3–6, 2020, Seattle, WA, USA. ACM, New York, NY, USA, 10 pages.

AT THE CURRENT TRAJECTORY, GEN AI WILL HAVE IMPACTS ACROSS THE FULL DEVELOPMENT LIFECYCLE OF FUTURE CITIES



Confidential Internal

After YOUSEF KHALILI, Tonomos

CCO / President Professional Services Unit

Souveraineté numérique

- Le système actuel de l'état nous permet de constater que DS signifie essentiellement trois choses :
- 1) Le pouvoir d'ériger des frontières autour de l'information entrante
- 2) Le protectionnisme commercial dans le secteur numérique
- 3) Renforcement du pouvoir de l'État sur les comptes en ligne, les données et les renseignements personnels des résidents

Et pour une ville ?

- Avoir le contrôle total sur ses propres données
- Lutte efficace contre le piratage

3. Conclusions (1/2)

- Nouveau concept prometteur
- Intuition depuis plusieurs décennies
- Assemblage de technologies
- Manque d'un cadre conceptuel global
- Plusieurs acceptions du concept
- Plusieurs pistes de réalisations
- Pas encore de « success story »

Deux orientations possibles (2/2)

- Dans la filiation du “despotisme éclairé”
 - Techno-autoritarisme
- Dans la filiation démocratique
 - Outils de participation

A nighttime photograph of a modern architectural complex. On the left, a tall, dark building is illuminated with blue lights, featuring the name 'PoliTechnique' vertically. The foreground is dominated by a large, landscaped area with numerous palm trees and a winding path. In the background, a cityscape is visible under a dark sky, with various buildings and streetlights. The overall scene is a mix of modern architecture and natural landscaping.

Merci de votre attention
Prof. R. Laurini