



1

Précisions initiales

- Différences entre les deux concepts
 - Smart City
 - Concept englobant
 - Vision surtout organisationnelle de la ville et de sa gouvernance
 - Jumeaux numériques de ville
 - Concept surtout orienté informatique visant à répliquer le fonctionnement d’une ville
- Le jumeau numérique peut être à la base des prises de décisions futures de la Smart City
- La plupart des travaux sur les smart cities invoquent les TIC, mais n’utilisent pas l’expression « smart city ».

2

Prof. Robert Laurini



- Professeur émérite en technologie de l’information
- Université de Lyon (INSA), Lyon, France
- Langues parlées : Français, Anglais, Italien, Espagnol
- À l’extérieur de Lyon
 - Université de Cambridge, Royaume-Uni, 1 an
 - Université du Maryland, USA, 1 an
 - IUAV Université de Venise, Italie, 10 ans à temps partiel
- Invitations > 10 fois
 - Tec de Monterrey, Puebla, Mexique
 - Universidad Nacional de La Plata, Argentine
 - Université Hassan II, Maroc
- Membre du comité de pilotage de plusieurs conférences

3

Prof. Robert Laurini

- Fondateur et directeur d’un laboratoire de recherche en informatique (10 ans)
- (co)-direction de 44 doctorats
- Membre de jury de thèses
 - dans 19 pays
- Fondateur d’ « Universitaires Sans frontières »
- Bénévole dans une association d’aide aux étudiants étrangers

4

Table des matières

- 1 – Smart Cities
 - 1.1. Introduction, objectifs
 - 1.2. Enjeux de gouvernance
- 2 – Jumeaux numériques de ville
 - 2.1. Introduction, objectifs
 - 2.2. Technologies
- 3. Conclusions

5

5

1 – Smart cities

- Origines incertaines du concept de « smart cities »
- Difficultés de traduction en français
 - Ville intelligente (traduction paresseuse de l'anglais)
 - Ville connectée
 - Ville numérique → jumeaux numériques
- Au sujet du mots anglais « *intelligence* » =
Information Gathering: In a military or strategic context, intelligence refers to the collection and analysis of information to inform decision-making.

6

6

Désignation

- Ce terme est utilisé pour désigner des villes utilisant les technologies de l'information et de la communication pour sa gouvernance, dans le but :
 - améliorer la qualité de vie des citoyens,
 - optimiser les services publics

7

7

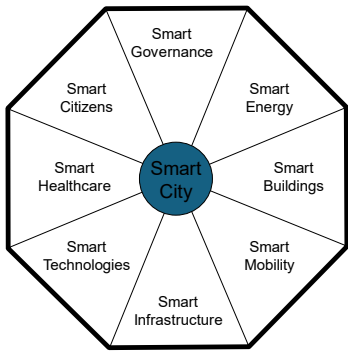
Evolutions

Evolution des besoins humains	Evolution des TIC depuis 2000
• ↗ Environnement	• ↗ Capteurs
• ↗ Réseaux sociaux	• ↗ Télécommunications, smartphones
• ↗ Participation	• ↗ Cloud computing
	• ↗ IA et Gen-AI

8

8

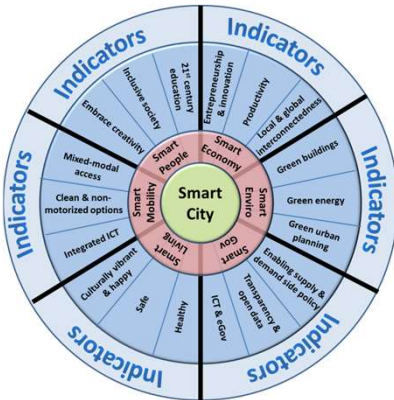
Diamant de Mathew



9

9

Roue de Boyd Cohen



10

10

Domaines d'applications

- Planification urbaine
- Consommation d'énergie
 - Neutralité carbone
 - Bâtiment - chauffage - Climatisation
- Mobilité
 - Mobilité électrique
- Gestion des déchets – pollution
- Santé
- Sécurité intérieure - sécurité de la ville

11

11

Deux points de vue possibles

- Comment l'évolution de la technologie affecte-t-elle le comportement humain ?
- Comment l'évolution des besoins humains influence-t-elle le développement des technologies ?

12

12

Une définition

- Pour les Deutsche Telecoms
- « Une Smart City est un écosystème caractérisé par un ensemble de processus partiellement numérisés et s'efforçant d'atteindre la connaissance de soi et une efficacité accrue efficacité, grâce aux TIC et à un degré plus élevé de participation de ses citoyens, des autorités et des entreprises ».

13

13

1.2. Enjeux de gouvernance

- L'évolution conjointe des villes, des besoins et de l'informatique permet d'affronter plusieurs enjeux dont :
- Enjeux environnementaux
- Participation des citoyens
- Meilleure connaissance du milieu urbain

14

14

Enjeux environnementaux

- Nécessité de réduire les effets du gaz à effet de serre
- Double contrainte ou injonction contradictoire entre
 - Augmentation de la consommation d'énergie des TIC (6 % par an)
 - Environnement urbain durable

15

15

Participation des citoyens

- Entre les NIMBY et l'intérêt général
- Qui est responsable de la définition de l'intérêt général ?
- **Hier** : information au public seulement
- **Demain** : décision en commun
- **Actuellement** : niveau variable de concertation entre les collectivités locales et les citoyens

16

16

Perspectives de participation

- Création de nouvelles organisations
- Comment synthétiser les opinions divergentes entre les parties prenantes et les différentes personnes ?
- ➔ Intelligence territoriale
- Mélange de l'IA et de l'intelligence collective humaine

17

17

Souveraineté numérique

- Le système actuel de l'état nous permet de constater que Souveraineté numérique 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.

18

18

Et pour une ville ?

- Avoir le contrôle total sur ses propres données
- Lutte efficace contre le piratage
- Où stocker les informations ?

19

19

Les sept principes directeurs de Seattle

1. Innovation et durabilité
2. Transparence et responsabilisation
3. Validité et fiabilité
4. Réduction des méfaits et équité
5. Amélioration de la protection des données personnelles
6. Explicabilité et interprétabilité
7. Sécurité et résilience

20

20

2 – 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

21

21

2.1. 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 scenarii d'évolution et voir leurs conséquences

22

22

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>

23

23

City Digital Twins

- Open-source databases such as VGI (Volunteered Geographic Information) and social media data.
- Sensors data such as personal health data, mobile phones' cellular data, and vehicle GPSs.
- Data and information integration through domains, stakeholders, and scales.
- Adopting real-time/near real-time data such as sensors data and IoT (Internet of Things) data.
- Achieving two-way interaction and information flow between humans and machines.
- Moving toward full automation and operation.
- Considering human intelligence and citizens' engagement in AI and analysis.
- Developing advanced technologies for real-time and near real-time analysis such as big data analysis, cloud computing, and the Internet of Things.
- BIM and GIS integration in data interoperability, and data flow.
- Image processing improvements.
- Considering multi-dimensional and multi-scale approach to solve complex urban problems.
- Extending City Digital Twins studies into other potential fields such as urban disaster management, health and well-being, and crisis management.

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

24

24

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>

25

El-Agamy, R.F., Sayed, H.A., AL Akhatatneh, A.M. et al. Comprehensive analysis of digital twins in smart cities: a 4200-paper bibliometric study. Artif Intell Rev 57, 154 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10781-8>

26

Principe des systèmes de suivi et de géovisualisation en temps réel

Ville équipée de capteurs

Capteurs envoyant des données

Système de suivi et de géovisualisation en temps réel

Tableau de bord Temps réel

27

Principe des systèmes de jumeau numérique

Ville équipée de capteurs

Capteurs envoyant des données

Jumeau numérique de ville

Scenarii d'évolution

Base de Données urbaines

Sortie de simulation

28

2.2.1 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

33

33

2.2.2 IoT et mobilier urbain

- Le mobilier urbain inclut divers équipements installés dans les espaces publics pour servir et embellir la vie quotidienne des habitants.
- bancs
- lampadaires
- poubelles
- abris de bus
- décorations sur les places (sculpture, etc.)
- bornes de recharge pour véhicules électriques
- Etc.

34

34

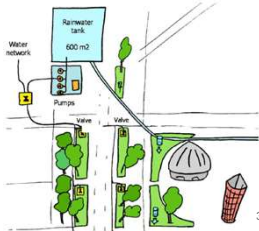
Mobilier urbain connecté



35

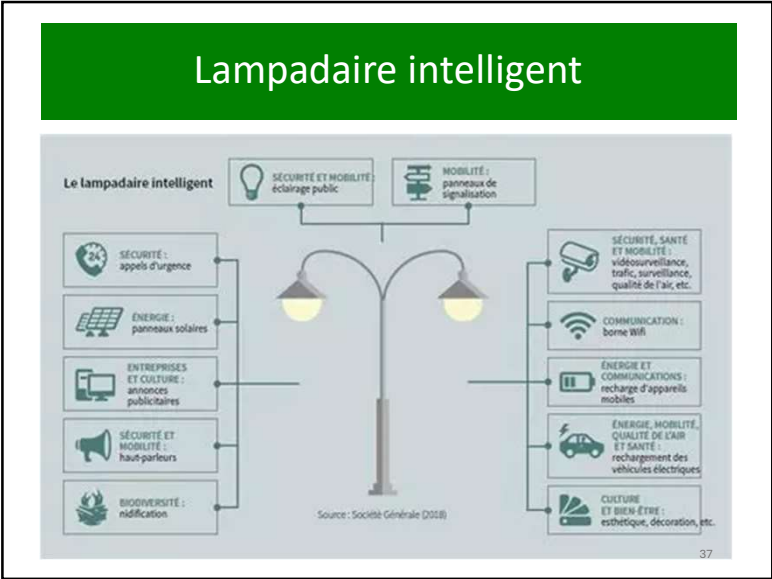
35

Exemples à Lyon



36

36

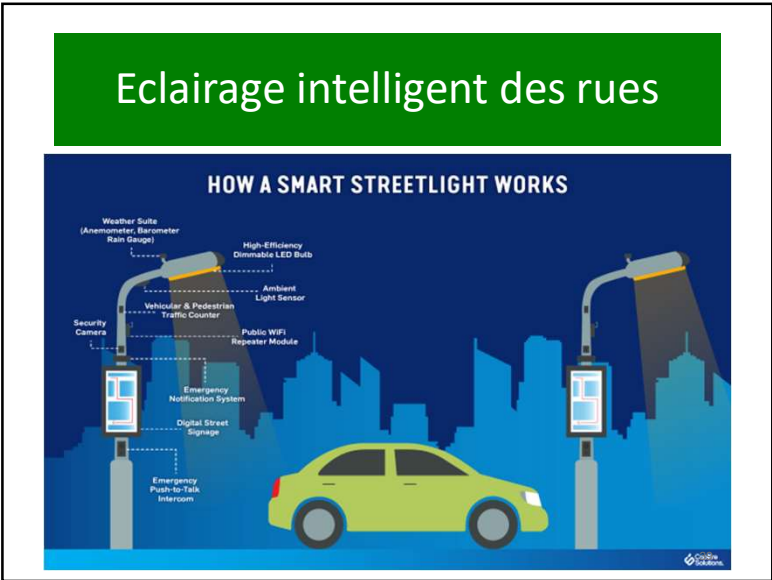


37

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

38



39

2.2.3 Modèles mathématiques de développement urbain

- Deux types
 - **Statique** (pour comprendre, analyser les relations statiques entre composantes urbaines et estimer les valeurs des variables manquantes)
 - $\vec{V}(t) = f(a(t), b(t), c(t), \dots)$
 - **Dynamique** (pour comprendre et analyser les évolutions, éventuellement selon certains scénarii)
 - $\vec{V}(t + 1) = f(\vec{V}(t), e(t), d(t))$

40

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
 - Modèles non seulement basés sur des recensements
 - Modèles alimentés par les capteurs
 - Résultats en temps réel

41

41

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)
 - $\sum_i^n T_{ij} = O_i$ $\sum_j^n T_{ij} = D_j$
 - $\sum_{ij} T_{ij} C_{ij} = C$
- Pour estimer les T_{ij} , il suffit de maximiser l'entropie sous contrainte
- $H = - \sum_{ij} T_{ij} \ln T_{ij}$

42

42

Exemple statique (suite)

- On écrit le lagrangien
- $L = - \sum_{ij} T_{ij} \ln T_{ij} + \sum_j \alpha_j (\sum_i T_{ij} - D_j) + \sum_i \delta_i (\sum_j T_{ij} - O_i) + \beta (\sum_{ij} T_{ij} C_{ij} - C)$
 - Où α_j , δ_i et β sont les variables de Lagrange
- Pour obtenir l'optimum, on annule la dérivée partielle du lagrangien
- $\frac{\partial L}{\partial T_{ij}} = 0$
- Dont la solution est :
- $T_{ij} = A_i B_j \exp(-\beta c_{ij})$

43

43

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

44

44

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)
 - Dans les $\overrightarrow{E(t)}$, on peut intégrer les habitants des logements neufs.

45

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.sfsfr.2024.100181>

46

Real city

What-if scenarios

Digital twin

IoT

People

Data

Networks

Data information

New insights, predictions

Complex systems modeling: focus on interactions/complexity (bottom-up process)

- Interdependent systems
- Networks and graph theory
- Sensor networks (physical object/environment)
- Real-time data collection
- Stochasticity and nonlinearity
- Statistical physics methods
- Multi-level analysis (integrative vision)
- Human-centered systems
- Innovation and co-evolution (pluralistic approach)

- Monitoring, modeling/ three-dimensional visualization
- Management and organization
- Machine learning, techniques: regression, classification, clustering, decision tree, neural networks, ...
- Big data analytics, artificial intelligence, cloud computing
- Optimization, efficiency, predicting outcomes, reduced uncertainty

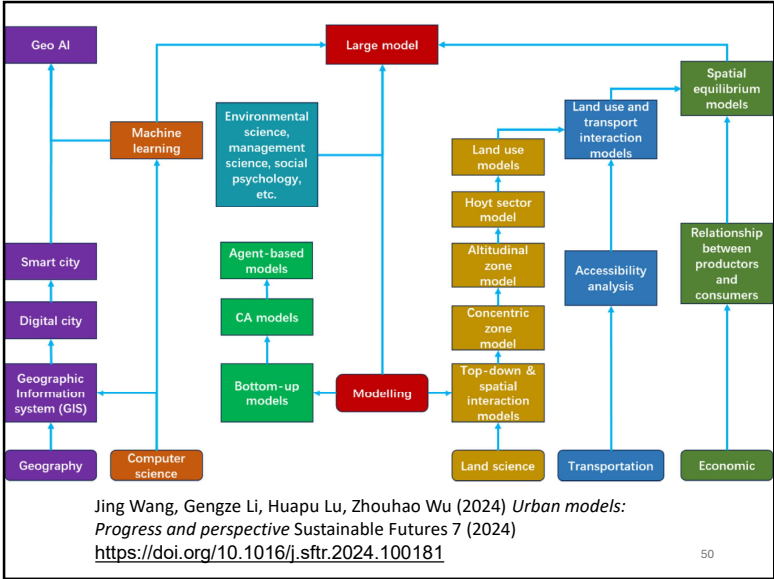
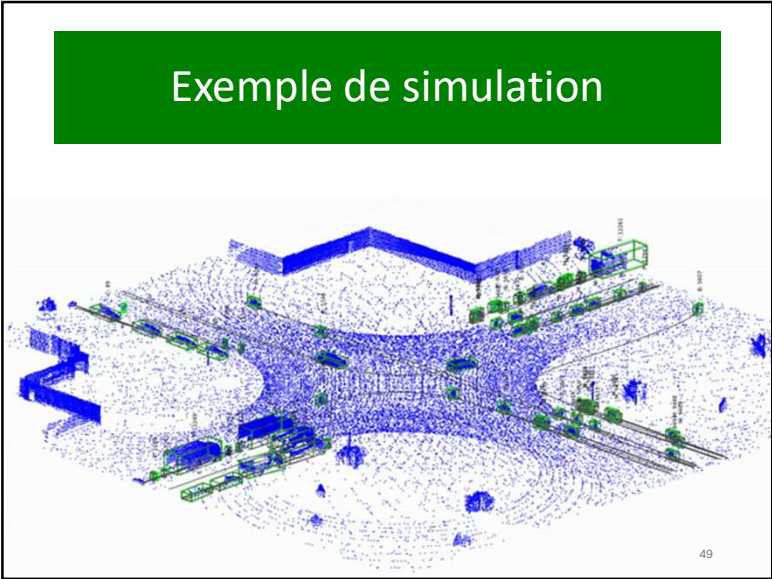
Caldarelli, G., Arcaute, E., Barthelemy, M. et al. *The role of complexity for digital twins of cities*. Nat Comput Sci 3, 374–381 (2023).
<https://doi.org/10.1038/s43588-023-00431-4>

47

What-if models

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

48



2.2.4 Modélisation 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.

51



Exemple : Singapour



<https://eandt.theiet.org/2019/01/17/digital-urban-planning-twins-help-make-sense-smart-cities>

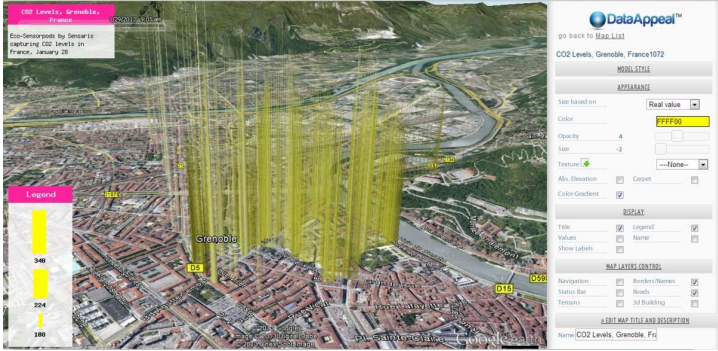
53

2.2.5 Géovisualisation et tableaux de bord

- Visualisation globale
- Mantra de Ben Schneiderman
 - “Overview, zoom and filter, details-on-demand”
- Géovisualisation (plus que la simple cartographie)
 - Chorèmes
 - Paysage de données (datascape de Nadia Amoroso)

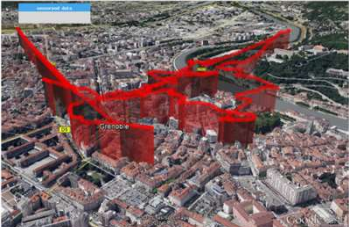
54

Pollution de l’air

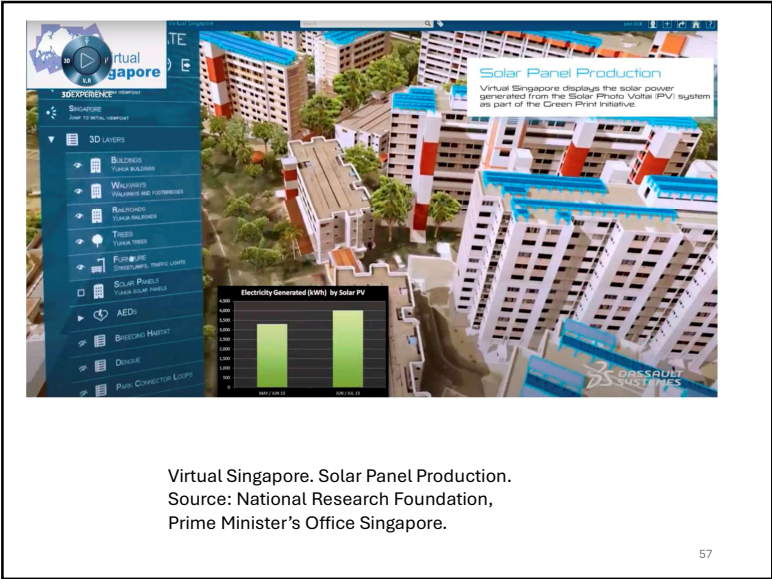


<https://www.nadiaamoroso.com/creative-cartography>

55

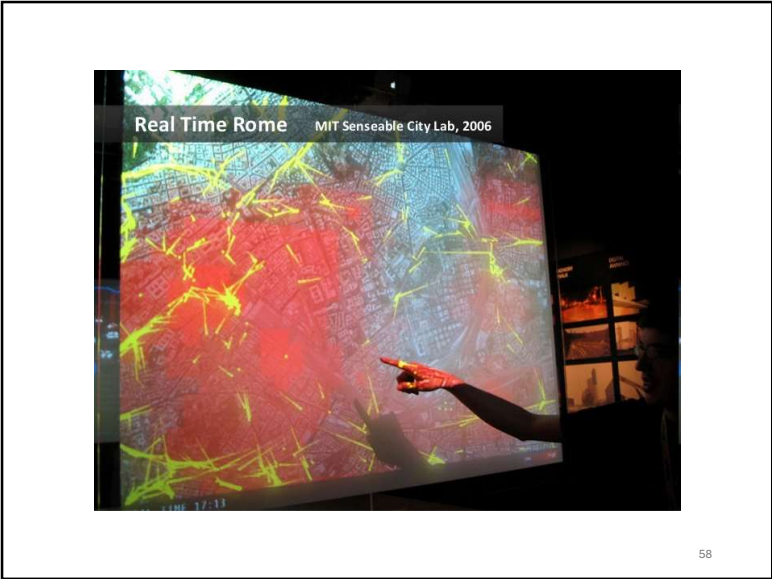


56



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

57



58

Géovisualisation et tableaux de bord

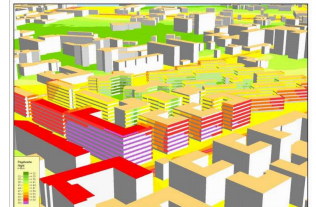
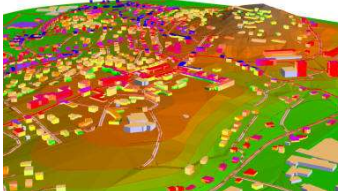
- Les capteurs envoient des données
- Synthèse
- Statistique
- Liens avec les décideurs



- Tableaux de bord
- <https://placesjournal.org/article/mission-control-a-history-of-the-urban-dashboard/?cn-reloaded=1>

59

Exemples de visualisation du bruit



60

Exemple : Zurich

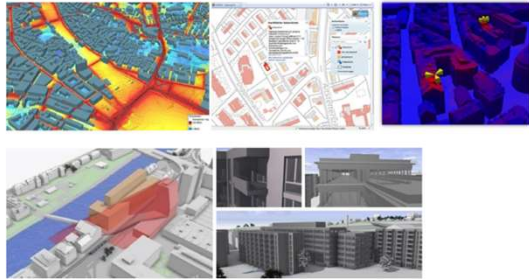


Fig.7 Established applications: noise (upper left), air pollution (upper centre), mobile phone radiation (upper right), solar potential (lower left), visualization of construction projects (lower right) (source: City of Zurich)

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>

61



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

62

2.2.6 GeoAI

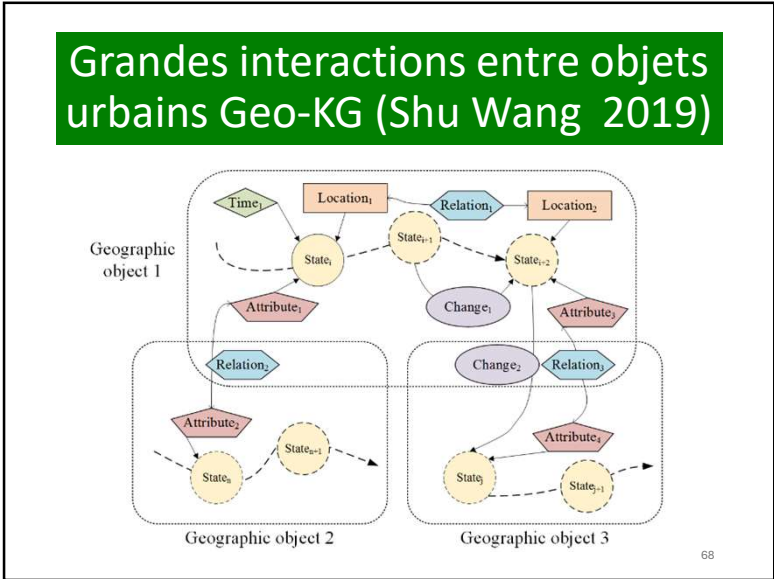
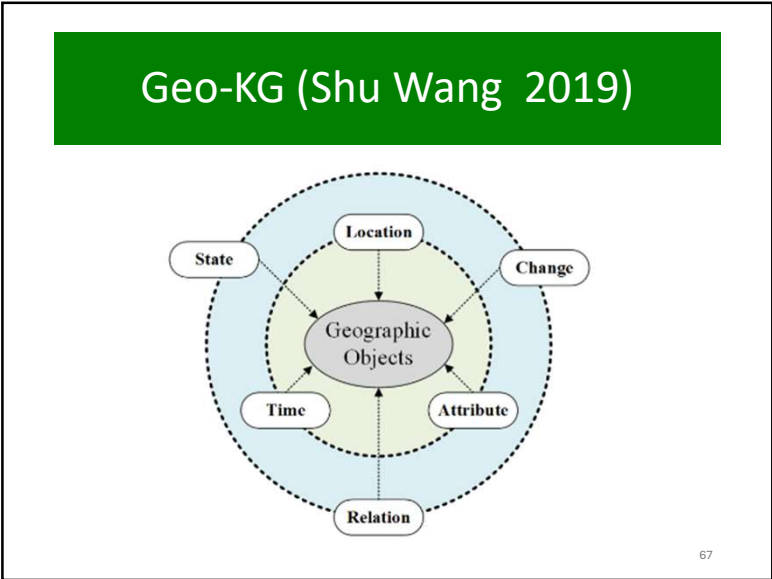
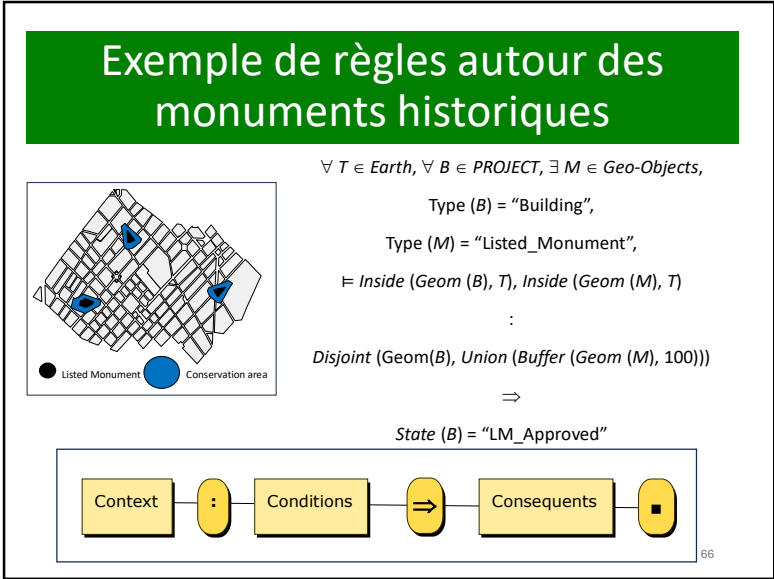
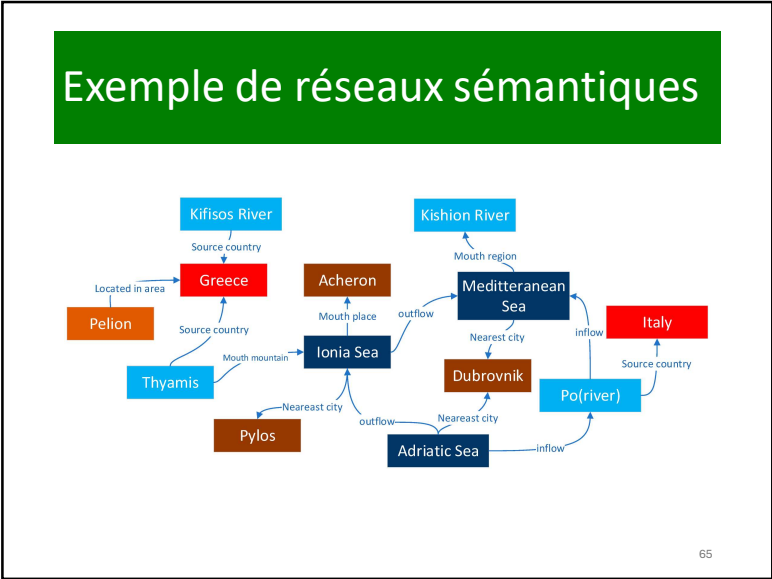
- Peu de travaux d’IA pour l’aménagement urbain
- Systèmes fondés sur des règles
- Graphes de connaissances géographiques (GeoKG)
- Apprentissage profond
- IA générative : Grands modèles de langue
- LLM ↔ GeoKG ?

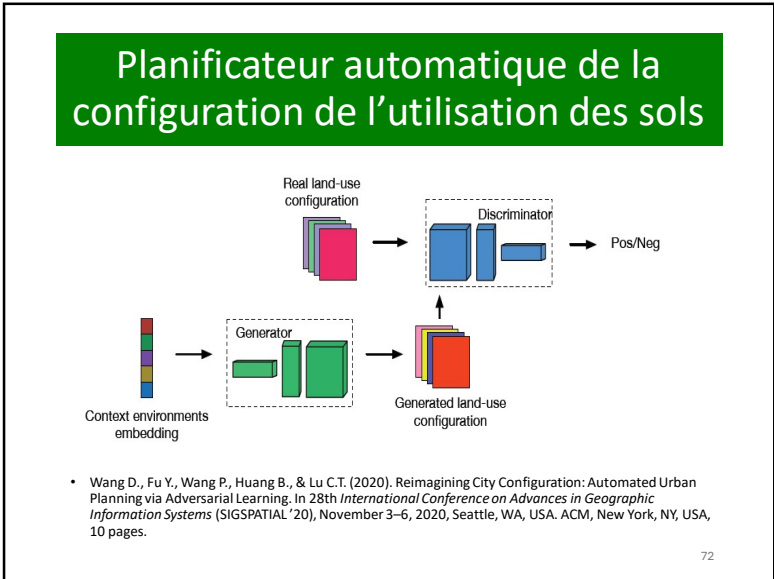
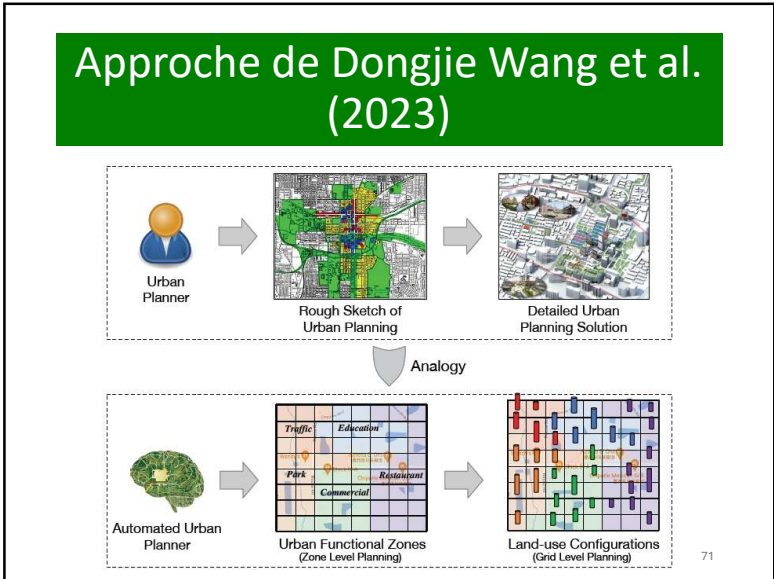
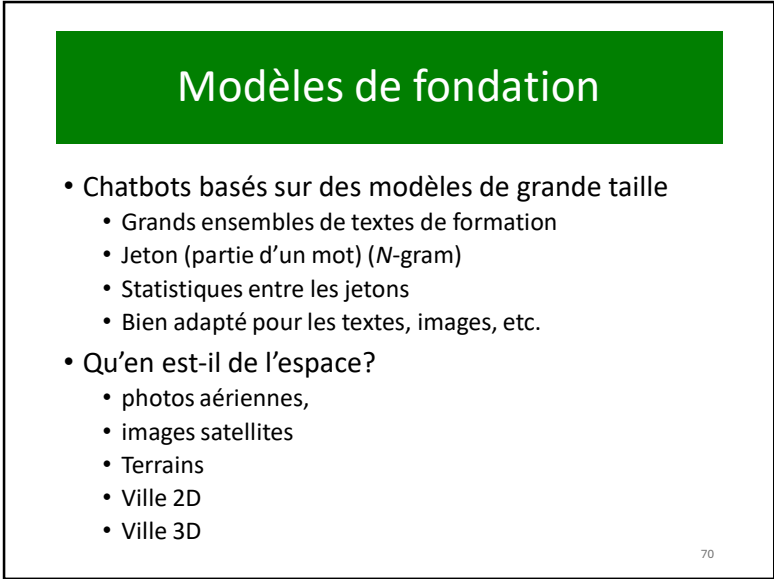
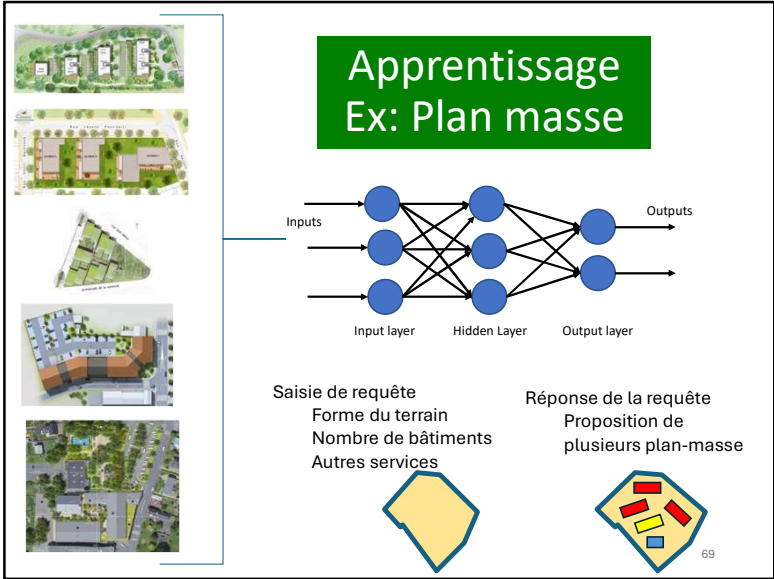
63

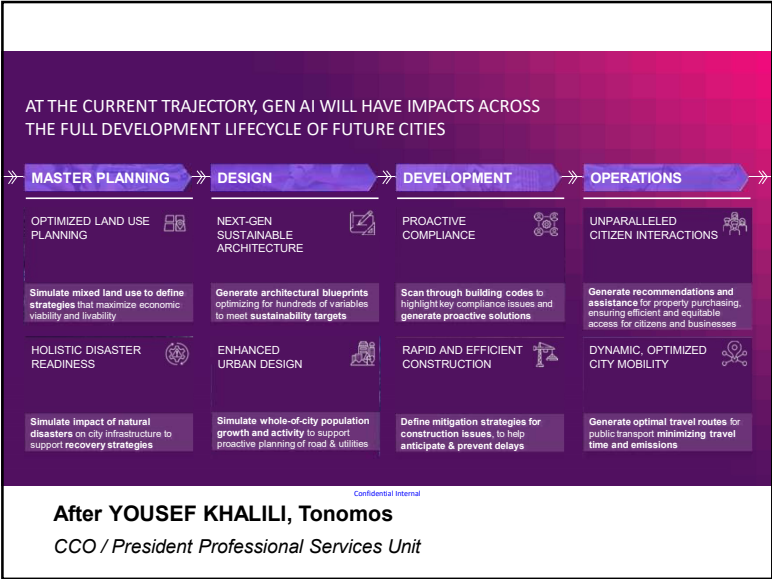
Définition des connaissances géographiques

- 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

64







73

3. Conclusions (1/2)

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

74

Deux orientations possibles (2/2)

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

75

Special issue of the AI Journal RL Guest Editor

AI

an Open Access Journal
by MDPI

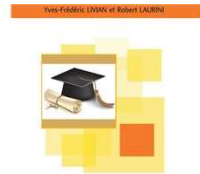
Impact Factor 3.1
CiteScore 7.2

https://www.mdpi.com/journal/ai/special_issues/40JO81A46V

76

Merci pour votre attention !

Robert.Laurini@usf-awb.net



REUSSIR SON MÉMOIRE
DE MASTER OU SA THÈSE
Guide pour les étudiants étrangers
Editions
CAMPUS
OUVERT



A télécharger depuis
www.laurini.net/ftp/fez2.pdf

77