

iSpace : exploration conceptuelle et pratiques d'urbanisme à partir de 246 cas internationaux

WU Zhiqiang, HE Rui, CHEN Zeyin, ZHU Yumo, TENG Yuwei, YANG Xinyu, JIANG Limin

Résumé. Alors que le développement des villes intelligentes passe de la conception stratégique à la mise en œuvre, l'intelligence des espaces urbains devient un levier essentiel de concrétisation de cette vision. À partir de 246 projets iSpace réalisés ou en construction dans le monde au cours de la dernière décennie, cette étude dresse un état des lieux des pratiques. En croisant ces observations avec les travaux théoriques, elle définit iSpace comme une configuration urbaine où des technologies avancées permettent de percevoir les besoins des usagers et les conditions environnementales, d'établir des diagnostics éclairés, d'apporter des réponses adaptatives, puis d'apprendre et de s'optimiser en continu. iSpace se caractérise par deux attributs - l'habilitation technologique et le support spatial - et par quatre composantes de planification : perception globale, diagnostic précis, réponse appropriée et optimisation par apprentissage. L'article propose enfin des voies opérationnelles pour la transformation intelligente des espaces urbains, en fournissant un cadre théorique et des orientations pratiques en vue d'un déploiement élargi.

Mots-clés : iSpace ; ville intelligente ; concept ; Internet des objets ; intelligence artificielle.

Classification bibliographique chinoise : TU984. Code du document : A. DOI : 10.16361/j.upf.202405002. Numéro d'article : 1000-3363 (2024) 05-0012-06.

Les mutations technologiques superposent les dimensions physique et numérique de la ville, faisant émerger de nouveaux imaginaires urbains et transformant les modes d'interaction ainsi que les usages de l'espace. Ces dernières années, la recherche et la pratique relatives aux villes intelligentes se sont principalement concentrées sur les concepts stratégiques et les architectures de plateformes [1-2], ou sur la modernisation intelligente d'infrastructures telles que les transports, la logistique et les galeries techniques [3-5].

Or les rues, les places, les quartiers résidentiels et les autres espaces du quotidien sont les lieux où se déploie la vie urbaine et où les habitants accèdent directement aux services de la ville intelligente. Étendre l'intelligence des stratégies de haut niveau et des infrastructures fondamentales aux espaces de vie urbains constitue donc une priorité majeure pour le développement qualitatif des villes intelligentes. Des projets tels que Sidewalk Toronto au Canada, Woven City au Japon et The Line en Arabie saoudite présentent de nombreuses représentations de modes de vie urbains intelligents. Bien qu'ils demeurent pour l'essentiel au stade de la conception, ils offrent des références et des enseignements importants pour l'évolution future des espaces urbains intelligents.

1 État actuel des pratiques iSpace

Cette étude a procédé à un recensement étendu des projets d'intelligence spatiale urbaine achevés ou en construction dans le monde au cours de la dernière décennie. Les recherches ont porté sur des termes tels que « espace intelligent », « lieu intelligent », « bâtiment intelligent » et « quartier résidentiel intelligent ». Au total, 246 projets ont été identifiés puis organisés dans un cadre d'analyse et une base de cas.

Les projets réalisés couvrent des superficies allant de quelques mètres carrés à plusieurs centaines de milliers de mètres carrés. Les maîtres d'ouvrage comprennent des entreprises privées, des établissements publics et des organismes gouvernementaux ; les équipes de réalisation vont des agences classiques d'architecture et d'urbanisme aux équipes de technologies intelligentes et aux entreprises d'équipements électriques. Pour répondre aux enjeux de sécurité, de consommation énergétique et de confort, ces projets mobilisent de nouveaux matériaux, tels que la fibre de carbone et les biocapteurs, ainsi que des technologies comme l'Internet des objets (IoT) et les jumeaux numériques, afin de créer des espaces urbains moins carbonés, offrant des expériences sensorielles renouvelées et des retours plus personnalisés.

Les cas couvrent une grande diversité de types spatiaux : habitat, culture, enseignement et recherche, santé, commerce et bureaux, industrie, logistique et entreposage, voirie et transports, infrastructures, espaces verts et places publiques (figure 1). Les espaces résidentiels, en particulier, ont connu une diffusion rapide de l'intelligence à l'échelle du logement entier. En reliant les systèmes domestiques de son, d'éclairage et d'électricité, ces applications créent des environnements de vie personnalisés et plus confortables, tout en répondant à des besoins concrets tels que le maintien à domicile des personnes âgées et la garde des jeunes enfants. Une chaîne industrielle relativement complète s'est également constituée autour des normes, des politiques sectorielles, des solutions de conception et des modèles économiques.



Figure 1. Cas de projets représentatifs

Dans les immeubles commerciaux et de bureaux, la transformation intelligente vise en priorité la réduction de la consommation d'énergie. Le chauffage, la ventilation, la climatisation, les ascenseurs et

d'autres systèmes sont commandés automatiquement, tandis que les installations électriques du bâtiment sont gérées par des plateformes intégrées. L'essor récent du travail flexible, associé à la détection de l'occupation des postes, a également fait émerger de nouvelles modalités de conception et d'usage des espaces de bureau. Dans les établissements de santé, d'enseignement et de culture, les plateformes intelligentes sont généralement conçues autour de fonctions spécifiques, telles que les blocs opératoires intelligents, les salles de classe intelligentes et les salles d'exposition multimédias.

Dans les espaces verts urbains, les rues, les places et les autres espaces publics, la conception traditionnelle des formes et des activités est complétée soit par du mobilier urbain intégrant des technologies intelligentes - sièges, auvents ou arrêts de transport -, soit par des dispositifs de 3D sans lunettes, de projection holographique, de réalité augmentée (RA) ou de réalité virtuelle (RV), qui enrichissent l'expérience de l'espace public urbain.

Dans ces projets, le développement des systèmes numériques et la conception-construction de l'espace physique relèvent généralement de secteurs distincts. Les fortes barrières disciplinaires et industrielles entraînent donc une faible intégration et une coordination insuffisante ; les deux systèmes peuvent même entrer en conflit lors de l'exploitation. En outre, l'emploi de nouvelles technologies et de nouveaux matériaux demeure expérimental, tandis que les coûts de recherche, de développement et de construction restent élevés. Certains projets ont ainsi principalement une fonction d'expérimentation ou de démonstration de l'innovation. Cette intelligence orientée vers la technologie et la mise en scène demeure éloignée d'une intelligence fondée sur les difficultés réelles des usagers [6].

2 Concept et caractéristiques

Les recherches actuelles sur l'intelligence des configurations spatiales proviennent surtout de domaines tels que le génie frigorifique et CVC, l'informatique, l'automatisation et l'IoT [7-8]. Elles visent généralement des avancées techniques ciblées ou des expérimentations par simulation dans des domaines comme la consommation d'énergie, la commande automatisée des équipements, l'occupation des espaces et la réalité virtuelle [9-12]. Des travaux ont également émergé récemment dans les disciplines de l'environnement bâti. Ils portent notamment sur la ville envisagée comme intégration des personnes, de la technologie et de l'espace [13], sur des terminaux intelligents de bâtiment associant support architectural et intelligence ambiante [14], ou encore sur de nouveaux modules spatiotemporels d'activité sociale à l'échelle microspatiale [15]. Toutefois, l'articulation entre les visions de la ville intelligente en amont et les produits technologiques en aval demeure insuffisante [16]. En particulier, la notion de « scénario intelligent » varie selon les contextes et n'a encore fait l'objet ni d'une définition claire ni d'une synthèse systématique.

2.1 Définition conceptuelle d'iSpace

À partir de l'analyse de projets internationaux d'espaces intelligents et des recherches académiques existantes, cette étude définit iSpace comme une configuration urbaine dans laquelle des technologies avancées permettent à différents espaces de percevoir les besoins comportementaux des personnes et l'état de l'environnement, d'établir des diagnostics et de prendre des décisions, de modifier les conditions ambiantes afin d'améliorer la sécurité, l'efficacité énergétique et le confort, puis d'apprendre et de s'optimiser en continu.

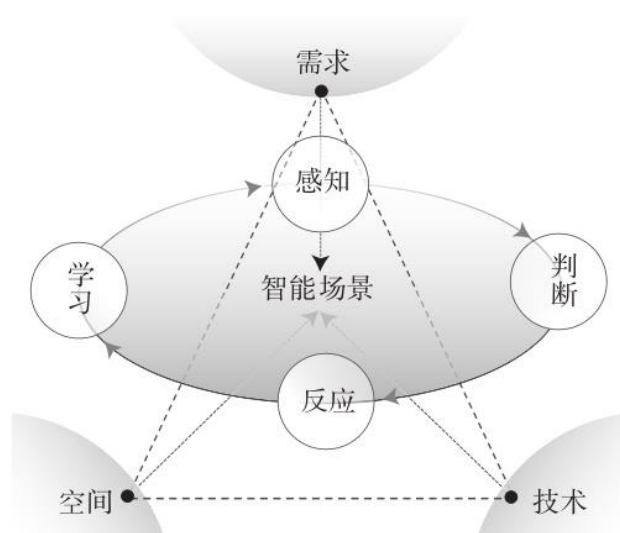


Figure 2. Structure d'iSpace

2.2 Caractéristiques essentielles d'iSpace

iSpace consiste à mobiliser des technologies intelligentes émergentes (i) pour rendre l'espace urbain (space) intelligent. Il s'agit d'une nouvelle forme spatiale destinée aux villes intelligentes de demain, issue de l'intégration profonde des technologies avancées avec l'environnement bâti relevant de l'architecture, de l'urbanisme et du paysage. La technologie intelligente et le support spatial en sont les deux caractéristiques fondamentales.

Caractéristique 1 : application des technologies « i ». La réalisation d'iSpace requiert des avancées issues de l'informatique, de la mécanique, de la psychologie, de l'ergonomie et d'autres domaines. Six grands groupes technologiques - détection intelligente, IoT et communications, gestion intelligente des bâtiments et de l'environnement, analyse de données et IA, commande automatisée, réalité virtuelle ou augmentée - intègrent espaces et équipements, données et réseaux, ainsi qu'environnements physique et informationnel, au sein d'un ensemble interconnecté (tableau 1).

Tableau 1. Technologies mobilisées dans iSpace

Dimension technologique	Technologie	Cible	Dimension technologique	Technologie	Cible
Détection intelligente	Capteurs IA pour les relevés routiers	Usager	Analyse de données et IA	Plateforme d'analyse de données	Usager
	Détection intelligente par drone	Milieu		Algorithmes d'apprentissage profond	Usager

Dimension technologique	Technologie	Cible	Dimension technologique	Technologie	Cible
	Radar à ondes millimétriques	Usager		Algorithmes d'apprentissage fédéré	Usager
	Imagerie thermique	Milieu		Technologies GPT	Usager
	Capteurs de profondeur	Usager		Analyse de données fondée sur l'IA	Usager
IoT et communications	Capteurs IoT	Milieu	Commande automatisée	Système de commande automatisée	Milieu
	Commande intelligente de l'éclairage	Milieu		Plateforme intelligente de supervision	Milieu
	NB-IoT	Milieu		Algorithme SLAM	Milieu
	Système intelligent de végétalisation	Milieu		Algorithme de commande par IA	Milieu
Gestion intelligente des bâtiments et de l'environnement	Système de gestion de l'énergie	Milieu	Réalité virtuelle et augmentée	Technologies structurelles adaptatives	Milieu
	Système intelligent de gestion du bâtiment	Milieu		Technologies de RA, RV et RM	Usager
	Système de suivi environnemental	Milieu		Projection holographique	Usager

Caractéristique 2 : l'espace comme support. L'espace est fondamentalement un système volumique délimité par des surfaces. Les lieux urbains accueillent des activités diverses, constituent les points de livraison des services de la ville intelligente et forment les interfaces par lesquelles les habitants expérimentent directement les applications intelligentes. Ils déterminent ainsi leur sentiment de bénéfice, de bien-être et de sécurité.

Les capteurs, les réseaux, les équipements de calcul et les autres composants nécessaires à l'intelligence doivent être physiquement déployés dans l'espace. Les chaussées [17], les façades de bâtiments [18], les lampadaires [19], les poubelles [20] et d'autres surfaces de mobilier urbain peuvent tous servir de supports spatiaux. D'après la base de cas, les supports mobilisés dans iSpace peuvent être regroupés, selon leur rôle dans le système spatial, en deux catégories et cinq types de surfaces (tableau 2) : surfaces de délimitation et surfaces intermédiaires, comprenant les murs, les sols, les plafonds, les surfaces du mobilier urbain et les canalisations.

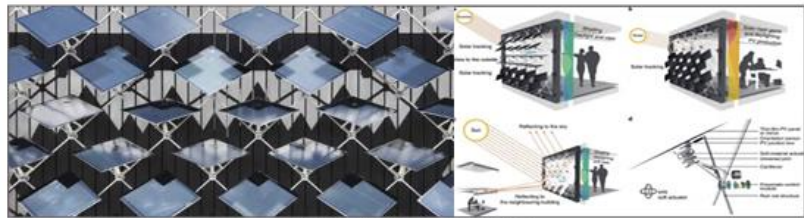
Tableau 2. Types de surfaces spatiales et cas représentatifs

Catégorie	Support	Cas représentatifs
-----------	---------	--------------------

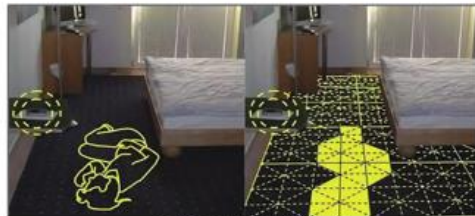
Catégorie	Support	Cas représentatifs
Surfaces de délimitation	Mur	Mur interactif LUMES de l'hôpital Cabrini ¹ ; façade photovoltaïque adaptative de l'ETH Zurich ²
	Sol	Revêtement de sol intelligent SensFloor de l'établissement de soins Fisher ³
	Plafond	Plafond interactif intelligent de l'immeuble Ping An Property & Casualty Insurance, Shenzhen ⁴
Surfaces intermédiaires	Surface de mobilier urbain	Tronçon démonstrateur de lampadaires intelligents sur la rue Huahua, Shenzhen ⁵ ; abri intelligent extérieur pour chats ⁶
	Canalisation	Application de RA pour le réseau technique souterrain de Tongzhou, Beijing ⁷



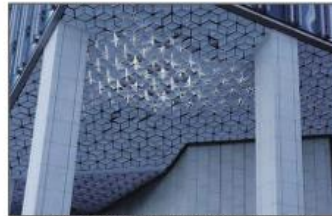
(a) 卡布里尼医院LUMES互动墙



(b) 苏黎世理工：自适应光伏外墙



(c) SensFloor智能地板



(d) 深圳平安财险大厦智能互动天花板



(e) 深圳市花路智能灯杆示范段



(f) 户外智能猫窝



(g) 北京通州地下管网系统AR应用

Figure 3. Cas représentatifs d'iSpace

3 Composantes de planification

Une ville intelligente progresse vers une intelligence durable grâce à un cycle récurrent de perception, de diagnostic, de réponse et d'apprentissage [21]. La planification et la conception des configurations spatiales urbaines suivent la même logique en quatre composantes (figure 4). Six catégories de données de l'environnement bâti font l'objet d'une perception globale ; plusieurs algorithmes d'IA permettent ensuite un diagnostic précis ; des réponses appropriées sont apportées par interaction ou par contrôle ; enfin, l'apprentissage des régularités permet à la configuration de s'optimiser elle-même.

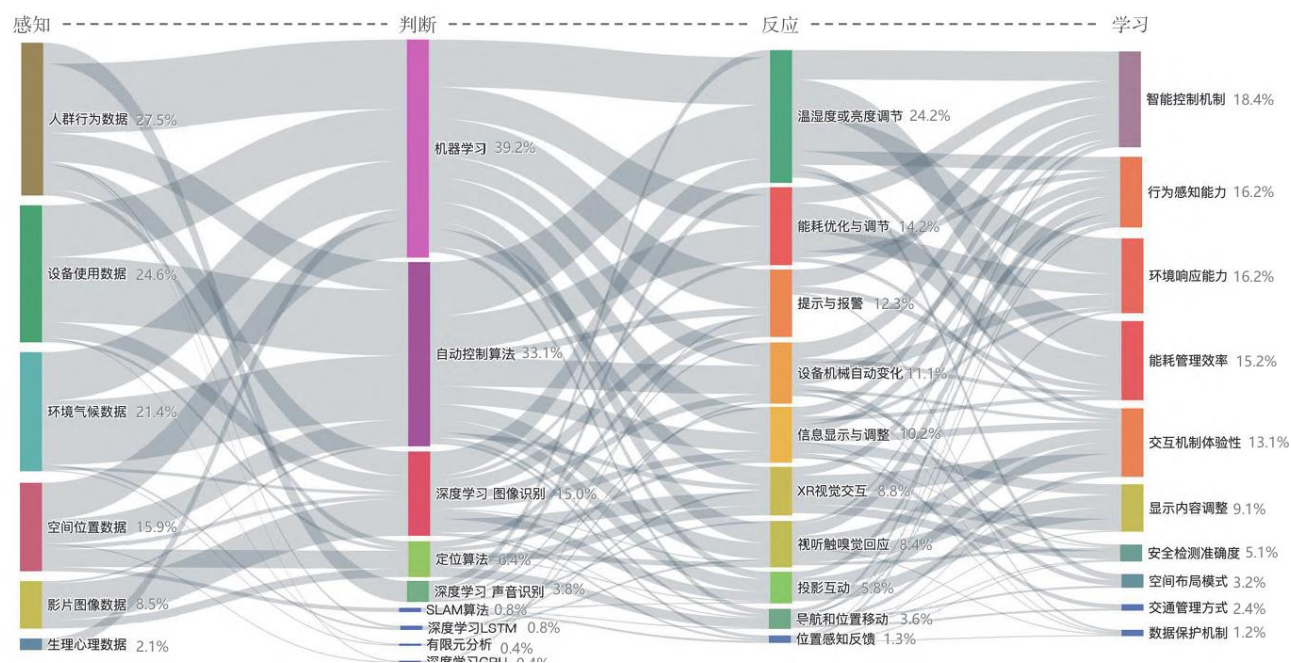


Figure 4. Diagramme de Sankey reliant les quatre composantes d'iSpace

3.1 Perception globale

La perception globale constitue la première étape, à la fois fondamentale et indispensable, de la construction d'iSpace. L'environnement bâti génère des données de nature diverse [22], et les capteurs ainsi que les instruments de surveillance sont largement utilisés pour recueillir des informations spatiales, afin d'assurer l'observation en temps réel et la gestion intégrée de l'environnement et des activités humaines.

Selon leur nature et leur finalité, les informations perceptibles dans l'espace urbain peuvent être regroupées en six catégories : données environnementales et climatiques, données d'utilisation des équipements, données de localisation spatiale, données vidéo et image, données sur les comportements collectifs, et données physiologiques et psychologiques. Le tableau 3 synthétise ces types de données et leurs dispositifs de détection ; il fournit une base pour analyser précisément leurs propriétés et leurs usages, et pour soutenir les étapes ultérieures de l'intelligence spatiale.

Tableau 3. Types de données et dispositifs de détection

Catégorie de données	Type de données	Données détaillées	Dispositifs de détection
Données environnementales et climatiques	Conditions environnementales	Vitesse du vent, éclairement, température, humidité, qualité de l'air, pression atmosphérique et bruit	Stations météorologiques ; capteurs de température et d'humidité ; anémomètres ; sonomètres ; capteurs de qualité de l'air

Catégorie de données	Type de données	Données détaillées	Dispositifs de détection
	Données d'éclairage	Intensité lumineuse intérieure et extérieure, position du soleil et lumière ambiante	Capteurs d'éclairage ; dispositifs de suivi de la position solaire
Données d'utilisation des équipements	Données d'état des équipements	État, fonctionnement et utilisation des équipements	RFID ; NFC ; systèmes de surveillance des équipements ; capteurs d'équipement
	Données de consommation énergétique	Consommation d'énergie et données de charge	Moniteurs énergétiques ; compteurs intelligents
	Données de fonctionnement des équipements	Données de commande utilisateur, réglages des appareils et journaux d'exploitation	Terminaux de commande utilisateur ; enregistreurs de fonctionnement ; systèmes de journalisation
Données de localisation spatiale	Données de localisation des usagers	Position des usagers, coordonnées du personnel et localisation des visiteurs	Radars à ondes millimétriques ; détection infrarouge ; dispositifs de positionnement Wi-Fi
	Données de mobilité	Trajectoires de déplacement, itinéraires et parcours piétons	Dispositifs GPS ; traceurs mobiles ; capteurs de marche
	Données de localisation des véhicules	Position des véhicules, données d'occupation du stationnement et flux de circulation	GPS embarqués ; systèmes de suivi des véhicules ; équipements de surveillance du stationnement
	Données d'usage de l'espace	Occupation, taux d'utilisation des pièces et modes d'usage de l'espace	Caméras de surveillance intérieure ; capteurs d'occupation ; détecteurs infrarouges
Données vidéo et image	Données vidéo	Vidéosurveillance, photographies et images capturées	Caméras de surveillance ; appareils photo numériques ; caméras embarquées
	Données d'imagerie thermique	Images thermiques et infrarouges	Caméras thermiques ; caméras infrarouges
	Données de reconnaissance faciale	Images faciales, identification et caractéristiques individuelles	Caméras de reconnaissance faciale ; caméras haute résolution

Catégorie de données	Type de données	Données détaillées	Dispositifs de détection
	Données de réalité virtuelle	Scènes virtuelles, données de RV et projection holographique	Casques de RV ; caméras panoramiques ; dispositifs de capture de mouvement
Données sur les comportements collectifs	Données sur le comportement des usagers	Déplacements, trajectoires comportementales, voix et toucher	Radars à ondes millimétriques ; microphones ; capteurs de pression
	Données de flux de personnes	Volumes piétons, conditions de déplacement et données sur les piétons	Compteurs de personnes ; caméras thermiques ; sols sensibles à la pression
	Données de retour et d'interaction	Retours des usagers, évaluations et interactions sociales	Collecte de données des réseaux sociaux ; logiciels d'analyse sociale
Données physiologiques et psychologiques	Données émotionnelles des usagers	Reconnaissance des émotions, état psychologique et variations émotionnelles	Caméras d'analyse des expressions faciales ; dispositifs de reconnaissance des émotions vocales
	Données de santé	Électrocardiogrammes, électroencéphalogrammes, électromyogrammes, état de santé et suivi des signes vitaux	Appareils ECG ; dispositifs de suivi de la santé tels que bracelets et montres
	Données de stress	Niveau de stress et charge psychologique	Capteurs de pression ; moniteurs de fréquence cardiaque

3.2 Diagnostic précis

Les dispositifs de détection installés dans les espaces urbains recueillent principalement des données en temps réel, à haute fréquence et en très grand volume. Des algorithmes d'apprentissage automatique et d'apprentissage profond [23] sont nécessaires pour réaliser des analyses descriptives, diagnostiques et prédictives, et ainsi évaluer avec précision l'état de l'environnement et des équipements, les comportements humains et les besoins des usagers (tableau 4).

Les algorithmes d'apprentissage automatique, tels que les machines à vecteurs de support (SVM) et les forêts aléatoires, sont bien adaptés aux données structurées et permettent d'effectuer efficacement des classifications et des régressions. Un modèle de forêt aléatoire peut, par exemple, prévoir l'état des équipements spatiaux et repérer à l'avance d'éventuelles défaillances, tandis qu'une SVM peut classer les données comportementales afin d'identifier les besoins et les préférences de différents usagers.

Les algorithmes d'apprentissage profond, tels que les réseaux de neurones convolutionnels (CNN) et les réseaux de neurones récurrents (RNN), sont particulièrement performants pour traiter des données non

structurées - images, sons ou vidéos -, car ils peuvent extraire automatiquement des caractéristiques et reconnaître des motifs complexes. Les RNN permettent de traiter des données séquentielles afin de prévoir les déplacements humains et les tendances comportementales, tandis que les CNN peuvent soutenir la reconnaissance d'images en détectant et en classant automatiquement les objets présents dans l'environnement spatial (figure 5).

Tableau 4. Algorithmes et données mobilisés pour le diagnostic spatial

Objet du diagnostic spatial	Données	Algorithmes courants
Suivi environnemental	Données de qualité de l'air, de bruit, de température et d'humidité	Classification k-means ; arbres de décision
Gestion de l'énergie	Données de consommation énergétique, d'état des équipements et d'environnement	Régression linéaire ; arbres de gradient boosting (GBT)
Suivi de l'état des équipements	Données de fonctionnement des équipements, de consommation énergétique et journaux de maintenance	Machines à vecteurs de support (SVM) ; forêts aléatoires
Reconnaissance des comportements	Données comportementales, données de capteurs et données vidéo	Réseaux de neurones convolutionnels (CNN) ; modèles de Markov cachés (HMM) ; OpenPose ; détection d'objets YOLO
Reconnaissance vocale	Données vocales et données de commandes utilisateur	Traitement automatique du langage naturel (TALN) ; BERT ; réseaux à mémoire à long et court terme (LSTM)
Reconnaissance faciale	Données vidéo et image ; données d'identité des usagers	Réseaux antagonistes génératifs (GAN) ; réseaux de neurones convolutionnels (CNN)
Détection des risques	Données de vidéosurveillance, d'état des équipements et de détection des intrusions	Réseaux résiduels profonds (ResNet) ; réseaux de neurones convolutionnels (CNN)
Planification d'itinéraires	Informations de localisation spatiale, données d'obstacles et données cartographiques	Localisation et cartographie simultanées (SLAM)

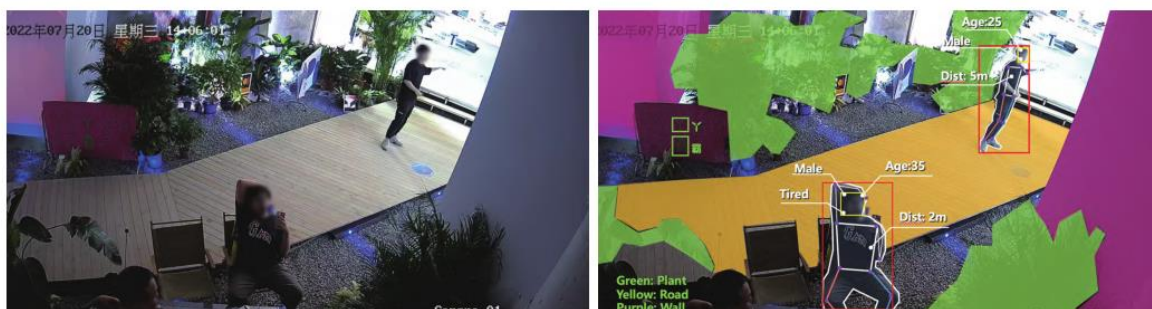


Figure 5. Exemples de diagnostic spatial

3.3 Réponse appropriée

La capacité d'une configuration à produire une réponse appropriée sur la base de son diagnostic constitue un critère décisif de son niveau d'intelligence. Les réponses spatiales peuvent être réparties en deux grandes catégories : l'interaction et le contrôle (tableau 5).

Les réponses interactives sollicitent principalement les usagers par la présentation d'informations visuelles. Elles améliorent l'expérience d'usage tout en permettant un retour et un traitement en temps réel. Un écran LED peut, par exemple, actualiser dynamiquement l'état du trafic ou les publicités grâce à l'analyse de données en temps réel ; les usagers peuvent interagir par gestes avec un contenu projeté et examiner ou manipuler des objets virtuels ; un guide d'exposition peut enfin diffuser automatiquement des informations pertinentes selon la position du visiteur.

Les réponses de contrôle pilotent intelligemment les équipements électroniques et les composants mécaniques ; elles impliquent donc des exigences techniques plus élevées et une ingénierie plus complexe. L'éclairage peut ajuster en temps réel sa luminosité et sa température de couleur en fonction de la lumière ambiante et de l'activité des usagers ; le suivi de la marche peut détecter une chute et déclencher automatiquement une alerte auprès des personnes désignées ; les ascenseurs et les équipements du bâtiment peuvent enfin modifier leur état selon la position de l'utilisateur afin d'assurer une accessibilité verticale sans obstacle.

Tableau 5. Modes de réponse dans iSpace

Type	Mode de réponse	Exemple de réponse
Interaction	Affichage et ajustement de l'information	Mise à jour en temps réel du contenu des écrans LED ; murs rotatifs affichant des motifs interactifs
	Interaction gestuelle avec projection	Interaction par gestes avec des images 3D ; ajustement du contenu projeté selon la position
	Retour contextuel fondé sur la localisation	Suivi de la position de l'utilisateur pour fournir des rappels de santé et de sociabilité ; contenus d'exposition personnalisés
	Interaction holographique	Interaction avec des images holographiques 3D ; affichage rotatif d'images flottantes
Contrôle	Réglage de la température, de l'humidité ou de la luminosité	Réglage automatique de la température et de l'humidité ; commande de l'éclairage et de la climatisation

Type	Mode de réponse	Exemple de réponse
	Optimisation et régulation énergétiques	Suivi en temps réel de la production d'électricité ; optimisation de la consommation d'énergie
	Transformation mécanique automatisée	Réglage de mécanismes pliants ; optimisation de l'angle des panneaux ; commande des rideaux et protections solaires
	Réponse multisensorielle	Détection des chutes et alertes ; vibrations à basse fréquence ; stimulation électrique musculaire

3.4 Apprentissage et optimisation

La plupart des projets iSpace actuels n'ont réalisé des progrès intelligents qu'aux trois étapes de perception, de diagnostic et de réponse. Ils ne sont pas encore entrés dans un cycle auto-optimisant complet de perception, diagnostic, réponse et apprentissage. Cette absence d'itération continue limite leur capacité à fournir des services efficaces sur le long terme dans des environnements urbains complexes et changeants.

L'auto-optimisation d'iSpace repose sur l'analyse de régularités récurrentes. Des informations utiles sont modélisées et extraites de grands volumes de données complexes et hétérogènes afin d'identifier des tendances et d'anticiper leur évolution (figure 7). La configuration peut ainsi s'optimiser et produire des retours intelligents plus efficaces (tableau 6). À mesure que les applications iSpace se déploieront, l'apprentissage collaboratif entre différents espaces deviendra un autre moyen important d'accroître leur intelligence. L'intégration des données perçues et le partage des expériences d'apprentissage permettront à une intelligence spatiale collective de soutenir une gestion urbaine plus efficace et l'optimisation des services.

Tableau 6. Orientations de l'auto-optimisation des configurations spatiales

Orientation d'optimisation	Méthode de mise en œuvre	Explication
Capacité de détection des comportements	Analyse du comportement et de la marche des usagers ; optimisation de la prédiction des chutes ; analyse des données de santé	Analyser la marche, les activités et les données de santé des usagers afin d'affiner les algorithmes de détection des anomalies et d'analyse comportementale, et d'améliorer la réactivité.
Réactivité environnementale	Entraînement de modèles d'apprentissage automatique et ajustement dynamique	Analyser les données environnementales historiques afin d'accélérer la réponse aux changements de l'environnement et d'ajuster dynamiquement la configuration spatiale.
Efficacité de la gestion énergétique	Analyse des données en temps réel et suivi de l'efficacité énergétique	Surveiller en continu la consommation d'énergie à l'aide de capteurs et appliquer l'analyse de données pour optimiser les stratégies énergétiques et réduire les gaspillages.

Orientation d'optimisation	Méthode de mise en œuvre	Explication
Expérience d'affichage interactif	Analyse des données comportementales et optimisation des modes d'interaction	Analyser les données d'interaction entre usagers et espace afin d'optimiser les contenus affichés, d'approfondir l'immersion et d'améliorer l'interactivité ainsi que l'expérience d'usage.
Mécanismes de contrôle intelligent	Analyse des données relatives aux usagers et à l'environnement ; optimisation des algorithmes de contrôle	Exploiter les données des usagers et de l'environnement pour optimiser les algorithmes des systèmes de contrôle, accroître l'intelligence des équipements et renforcer la stabilité du système.
Modes d'organisation spatiale	Analyse des comportements des usagers et optimisation dynamique des contenus	Ajuster les contenus affichés et interactifs à partir de l'analyse des comportements des usagers afin d'améliorer l'adaptabilité dynamique de l'espace.
Mécanismes de protection des données	Technologies de chiffrement et algorithmes de protection de la vie privée	Analyser les exigences des usagers en matière de vie privée, améliorer les algorithmes de chiffrement et renforcer la protection des données ainsi que la sécurité de la vie privée.
Précision de la détection des risques	Optimisation des données d'imagerie thermique et de la détection d'événements	Utiliser les données d'imagerie thermique pour affiner les mécanismes de protection de la vie privée par caméra et les algorithmes de détection d'événements, réduire les fausses alertes et améliorer la précision.



Figure 7. Analyse des données spatiales et optimisation fondée sur l'apprentissage

4 Conclusion et perspectives

Après plus d'une décennie consacrée à l'exploration de stratégies à l'échelle macroscopique et à la conception de haut niveau, le développement des villes intelligentes entre rapidement dans une phase de mise en œuvre plus approfondie et plus systématique. Supports physiques de la vie urbaine et lieux directement expérimentés par les habitants, les espaces urbains intelligents deviendront inévitablement une tendance centrale et un levier essentiel de concrétisation de la vision de la ville intelligente.

L'intégration de l'innovation technologique et du renouvellement urbain - en particulier l'association approfondie des technologies de l'information et de la communication (TIC), de l'intelligence artificielle (IA) et de l'Internet des objets (IoT) avec la transformation spatiale - fait de l'espace urbain un terrain majeur d'application des forces productives de nouvelle qualité. À l'avenir, iSpace, caractérisé par la perception globale, le diagnostic précis, la réponse appropriée et l'optimisation par apprentissage, stimulera non seulement l'innovation technologique et renforcera la sécurité urbaine, mais transformera aussi les modes de vie et les structures fonctionnelles de la ville, favorisant une intégration plus profonde entre développement durable et attention portée à l'humain.

Notes

¹ <https://www.eness.com/permanent/cabrini>

² <https://systems.arch.ethz.ch/research/adaptive-solar-facade>

³ <https://future-shape.com/>

⁴ <https://www.archiposition.com/items/20210118062458>

⁵ <https://mp.weixin.qq.com/s/J871vUp2AzuPxoK1iCby2A>

⁶ <https://www.gooood.cn/outdoor-intelligent-cat-nest-china-by-zaoshi-architecture.htm>

⁷ https://k.sina.cn/article_1893892941_70e2834d02000vnnn.html

Références

- [1] ZHANG Weiwen, JIN Han, LENG Jiaxin. Comment la construction de villes intelligentes peut-elle moderniser la gouvernance sociale ? Le « cerveau urbain » de Hangzhou à l'épreuve de la pandémie de COVID-19 [J]. Revue de l'Université du Zhejiang (sciences humaines et sociales), 2020, 50(4) : 117-129.
- [2] WU Xibo, YANG Zaigao. Le concept de ville intelligente et le développement des villes du futur [J]. Études sur le développement urbain, 2010, 17(11) : 56-60.
- [3] WANG Mengshu, WANG Yonghong, TAN Zhongsheng, et al. Exploration de l'utilisation intégrée de l'espace souterrain dans les villes intelligentes chinoises [J]. Journal de l'Université Jiaotong de Beijing, 2016, 40(4) : 1-8.
- [4] ZHANG Xiaochun, SHAO Yuan, SUN Chao. Conception intégrée des transports intelligents pour les villes du futur [J]. Transports urbains de Chine, 2018, 16(5) : 1-7.
- [5] CHEN Yulan, ZHANG Ling. Étude comparative du développement des industries intelligentes dans le delta du Yangtsé [J]. Revue de l'Université de Nantong (sciences sociales), 2017, 33(6) : 6-11.
- [6] WU Zhiqiang, WANG Jian, LI Deren, et al. Réflexions « à froid » au cœur de l'engouement pour les villes intelligentes : forum académique [J]. Forum d'urbanisme, 2022(2) : 1-11.
- [7] NIZETIC S, SOLIC P, LOPEZ-DE-IPINA D, et al. Internet des objets (IoT) : possibilités, enjeux et défis pour un avenir intelligent et durable [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 274 : 122877.

- [8] JAVED A R, SHAHZAD F, REHMAN S U, et al. Exigences des villes intelligentes de demain, technologies émergentes, applications, défis et perspectives [J]. Cities, 2022, 129 : 103794.
- [9] ZHU C, FONG L H N, GAN M. Repenser les conséquences de l'authenticité postmoderne : le cas d'un site du patrimoine culturel mondial en réalité augmentée [J]. Current Issues in Tourism, 2023, 26(4) : 617-631.
- [10] COPIACO A, HIMEUR Y, AMIRA A, et al. Détection profonde innovante des anomalies de consommation énergétique des bâtiments à partir d'images de séries temporelles énergétiques [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 119 : 105775.
- [11] PENG Y, RYSANEK A, NAGY Z, et al. Utilisation de techniques d'apprentissage automatique pour la commande du refroidissement des immeubles de bureaux fondée sur la prévision de l'occupation [J]. Applied Energy, 2018, 211 : 1343-1358.
- [12] JEON Y, CHO C, SEO J, et al. Système de détection d'occupation fondé sur l'IoT dans les environnements résidentiels intérieurs [J]. Building and Environment, 2018, 132 : 181-204.
- [13] ZHEN Feng, KONG Yu. Cadre de planification d'une ville intelligente intégrant personnes, technologie et espace [J]. Forum d'urbanisme, 2021(6) : 45-52.
- [14] ZHOU Ying, XU Yayin, DING Lieyun. Terminaux intelligents de bâtiment fondés sur l'intelligence ambiante [J]. Journal de l'Université des sciences et technologies de Huazhong (édition des sciences naturelles), 2022, 50(8) : 1-10.
- [15] LIU Quan, SHI Yiting, LAI Yani. Interprétation conceptuelle et caractérisation des scénarios de ville intelligente [J]. Urbanisme international, 2023.
- [16] LIU Quan, CHEN Yaoyao, HUANG Dingfang, et al. Méthode de conception modulaire de scénarios de rue intelligente à intégration ternaire : conception prospective de la rue du futur à Huaqiangbei [J]. Forum d'urbanisme, 2023(2) : 110-118.
- [17] HIJJI M, IQBAL R, PANDEY A K, et al. Cadre de véhicules connectés en 6G pour soutenir la maintenance intelligente des routes par fusion de données et apprentissage profond [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(7) : 7726-7735.
- [18] LIU Xiaoqing, HE Rui. Planification de nouvelles infrastructures urbaines d'information : pratiques et explorations à Xiong'an [J]. Forum d'urbanisme, 2022(5) : 112-118.
- [19] DE PAZ J F, BAJO J, RODRIGUEZ S, et al. Système intelligent de commande de l'éclairage dans les villes intelligentes [J]. Information Sciences, 2016, 372 : 241-255.
- [20] ABUGA D, RAGHAVA N S. Mécanisme de poubelle intelligente en temps réel pour la gestion des déchets solides dans les villes intelligentes [J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 75 : 103347.
- [21] WU Zhiqiang, PAN Yunhe, YE Qiming, et al. Système d'indicateurs d'évaluation des villes intelligentes : développement et application [J]. Engineering, 2016, 2(2) : 105-137.
- [22] PERERA C, ZASLAVSKY A, CHRISTEN P, et al. La détection en tant que service pour les villes intelligentes, soutenue par l'Internet des objets [J]. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2014, 25(1) : 81-93.
- [23] ZHANG J, TAO D. Doter les objets d'intelligence : état des avancées, défis et possibilités de l'intelligence artificielle des objets [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(10) : 7789-7817.

Révisé : août 2024

Traduction assistée par IA