

Conception urbaine face à l'intelligence artificielle de nouvelle génération : transformation paradigmatique et capacitation par l'intelligence numérique

LIU Yibo, WU Zirong, SUN Cheng

Résumé : La conception urbaine, domaine d'intersection entre l'urbanisme et l'architecture, n'en est encore, dans le contexte du développement de l'intelligence artificielle de nouvelle génération, qu'aux premiers stades de la construction théorique et de l'exploration technique. Dans le processus de conception, elle se heurte principalement à deux difficultés : celle de la rationalité des valeurs et celle de la rationalité instrumentale. À cet égard, la conception urbaine doit renforcer respectivement sa profondeur cognitive et l'étendue de son exécution par une transformation de paradigme et par une capacitation numérique intelligente. Face à la difficulté de la rationalité des valeurs, elle doit passer des paradigmes d'intégralité et de valeur à un paradigme d'interaction, processus qui implique trois moments : la reconstruction des mécanismes, la recomposition des valeurs et la réorganisation spatiale. Face à la difficulté de la rationalité instrumentale, elle doit évoluer d'un modèle de capacitation numérique fondé sur les données vers un modèle porté par l'intelligence artificielle, en explorant des voies d'intégration de technologies transdisciplinaires telles que les formes de vie artificielle, la blockchain et les modèles de génération d'images et de vidéos par IA, afin de fournir un moteur technique à cette transformation paradigmatique. En outre, la conception urbaine tournée vers l'avenir doit revenir à l'intention première de la technologie et préciser que l'IA joue un rôle d'assistance plutôt que de substitution, en vue de réaliser une gestion du cadre de vie sur l'ensemble de son cycle de vie.

Mots-clés : intelligence artificielle de nouvelle génération ; conception urbaine ; transformation paradigmatique ; capacitation par l'intelligence numérique

No de classification de la Bibliothèque chinoise : TU984 ; Code du document : A

DOI : 10.16361/j.upf.202501009 ; No d'article : 1000-3363(2025)01-0064-07

Biographie des auteurs : LIU Yibo, maître de conférences et directeur de master, École d'architecture et de design, Harbin Institute of Technology, et Laboratoire clé de planification spatiale territoriale des régions froides, de protection et de restauration écologiques, ministère des Ressources naturelles. Email : lyb@hit.edu.cn ; WU Zirong, étudiante en master, École d'architecture et de design, Harbin Institute of Technology, et Laboratoire clé de planification spatiale territoriale des régions froides, de protection et de restauration écologiques, ministère des Ressources naturelles ; SUN Cheng, professeur et directeur de doctorat, École d'architecture et de design, Harbin Institute of Technology, et Laboratoire clé des sciences et technologies de l'habitat urbain et rural des régions froides, ministère de l'Industrie et des Technologies de l'information ; auteur correspondant. Email : suncheng@hit.edu.cn.

Financement : Projet Jeunes de la Fondation nationale des sciences naturelles de Chine, « Mécanismes d'influence de l'analyse quantitative des caractéristiques morphologiques sur la performance de santé spatiale des îlots urbains des régions froides et méthodes d'optimisation de la conception » (no 52308018) ; Fonds chinois d'innovation université-industrie-recherche, « Recherche appliquée sur la programmation spatiale et la génération de design assistées par intelligence artificielle pour les quartiers piétonniers urbains » (no 2024SE031) ; Fonds de recherche fondamentale des universités

Conception urbaine face à l'intelligence artificielle de nouvelle génération : transformation paradigmatique et capacitation par l'intelligence numérique centrales, « Étude comparative des conceptions esthétiques chinoises et occidentales dans le design morphologique des îlots urbains » (no HIT.HSS.202312).

L'intelligence artificielle (IA) pénètre progressivement la vie sociale et la reconfigure en profondeur. Avec les percées de ses technologies clés et l'accélération de la mise en œuvre de nouveaux scénarios d'application, l'autonomisation par la science et la technologie est devenue un marqueur majeur du développement de haute qualité. L'IA est désormais une force motrice importante de la modernisation chinoise et transforme en profondeur les systèmes d'éléments et les mécanismes de fonctionnement de l'architecture et de l'urbanisme^[1].

Depuis l'entrée de l'IA dans le champ de la conception urbaine à la fin du XXe siècle, la numérisation et l'informatisation sont devenues progressivement des appuis essentiels à son développement. Les technologies d'IA représentées par la réalité virtuelle^[2] et la vision par ordinateur^[3] fournissent à l'analyse urbaine des données de grande précision et de grande quantité. Sur cette base, des fonctions telles que l'interprétation des éléments^[4-7], la simulation des évolutions^[8-12], la génération de décisions^[13-14] et l'évaluation de la mise en œuvre^[4,15-17] soutiennent la prévision et l'exécution des objectifs de développement urbain durable^[18], tout en favorisant la protection écologique, la croissance économique et la justice sociale^[19-22]. Les travaux existants^[23-24] ont utilement exploré l'usage de l'IA pour extraire et simuler les lois d'évolution de la population et de l'espace urbain, ainsi que pour évaluer les effets de la localisation des équipements. Ils ont généralement permis une extraction plus précise des régularités et une construction plus scientifique des systèmes, répondant en partie aux besoins clés de l'urbanisme et de la conception urbaine en matière d'analyse de données urbaines, de simulation du développement, d'optimisation des structures spatiales et d'allocation fonctionnelle. Aujourd'hui, l'effet d'entraînement de l'IA de nouvelle génération sur la conception urbaine commence à apparaître, mais les recherches demeurent à un stade initial de construction théorique et d'exploration technique. Dans une perspective prospective et systématique, analyser les difficultés actuelles de la conception urbaine et les dépasser par les nouvelles technologies de l'IA constitue une tendance inévitable de son développement innovant.

1 Difficultés : paradoxes réels dans le développement de la conception urbaine

En tant que domaine interdisciplinaire reliant l'urbanisme et l'architecture, la conception urbaine se caractérise par une dynamique créative, l'unité de l'intelligence et de l'émotion, une orientation humaniste et une concrétude spatiale^[25-26]. Cette section analyse le processus de développement de la conception urbaine sous l'influence de l'IA et ses caractéristiques correspondantes, puis synthétise les paradoxes qui apparaissent dans ses différentes étapes sous l'impulsion de l'IA de nouvelle génération, afin d'en dégager deux difficultés réelles : la rationalité des valeurs et la rationalité instrumentale.

1.1 Développement de la conception urbaine sous l'influence de l'IA

Dès le milieu du XXe siècle, l'IA avait déjà mis en usage, dans la biologie et la fabrication industrielle, des méthodes de recherche telles que les algorithmes génétiques de modèles fermés^[27] et la conception d'optimisation intégrée des micro-ondes^[28]. Elle n'est toutefois entrée dans le champ des études urbaines qu'à la fin du XXe siècle et au début du XXIe siècle, avec une fonction encore floue ; son introduction dans la conception urbaine a donc accusé un retard théorique et technique. Sous l'influence de l'IA, la conception urbaine a successivement traversé une phase de conception assistée par ordinateur (computer-aided design, CAD), où l'IA primitive servait principalement d'outil de dessin ; une phase de conception paramétrique (parametric design, PD), où l'IA fondée sur le développement informatique servait d'outil de modélisation dynamique urbaine ; et une phase de conception assistée

Conception urbaine face à l'intelligence artificielle de nouvelle génération : transformation paradigmatique et capacitation par l'intelligence numérique

par algorithmes (algorithms-aided design, AAD), où l'IA automatisée appuyait l'analyse et le jugement. Comme le montrent la Fig.1 et le Tab.1, un système théorique, méthodologique et technique d'IA auxiliaire à la conception urbaine s'est d'abord constitué^[33-35], tandis que son caractère intégratif, pratique, innovant et scientifique s'accroît avec l'avancement des recherches et des pratiques connexes.

Ces dernières années, la complexité et l'incertitude croissantes des formes de développement des écosystèmes urbains et des contextes politiques ont rendu les tâches de conception urbaine de plus en plus complexes. Pourtant, la recherche urbaine reste confrontée à des problèmes de discontinuité entre les étapes de conception, d'intensité intellectuelle élevée et de coûts importants^[32]. L'innovation du côté des productions de la planification et de la conception, ainsi que l'articulation et la rétroaction entre planification-conception et gouvernance spatiale, sont devenues des exigences urgentes. Bien que l'IA de nouvelle génération, représentée par les grands modèles de langage tels que ChatGPT et les modèles de génération d'images tels que Stable Diffusion, en soit encore à un stade initial de développement technique, sa capacité d'intégration de données massives, multidimensionnelles et multisources, son potentiel d'auto-entraînement et d'adaptation, ainsi que sa scientificité et son explicabilité, annoncent les perspectives de l'AI-generated design (AIGD)^[36]. Conduire les études urbaines par l'IA répond à la nouvelle vague technologique et cible les besoins de transformation innovante de l'architecture et de l'urbanisme.

Actuellement, l'IA est largement reconnue comme une technologie clé d'appui au développement de la conception urbaine. Toutefois, les effets de sa nouvelle génération sur l'espace urbain et le système de fonctionnement de ses éléments, ainsi que sur les recherches et les pratiques de l'urbanisme, notamment de la conception urbaine, soulèvent encore des questions concrètes non résolues.

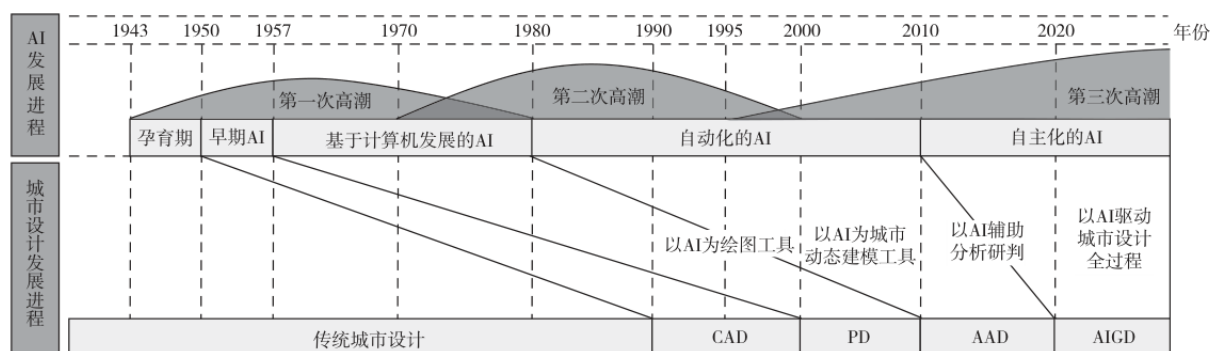


Fig.1 Relation entre l'IA et la conception urbaine

Tab.1 Développement de la conception urbaine sous l'influence de l'IA

城市设计进程	发展时间	AI 工具	城市设计发展优势	城市设计发展问题
CAD	20 世纪末 21 世纪初	早期 AI	借助以 CAD 等计算机绘图软件为代表的 AI 传达设计方案 ^[29] , 主要使用勘测调研、问卷调查等田野调查法获取城市空间数据	设计数据精度较低, 设计要素单一, 设计空间大多仅停留在人视角下建筑和场地空间的功能和美学层面, 设计工作单向传导, 繁重低效, 且存在与城市规划、城市治理逻辑分离
PD	2000 年至 2010 年	基于计算机发展的 AI	通过 AI 提供的描述城市情境的参数化工具和可将参数化工具与城市社会经济数据进行空间融合的设计平台, 构建城市多元性能的量化指标体系, 建立短期时间演变下的城市立体模型, 使构想经济效益达成最优解的空间方案成为可能	由于计算、存储能力限制, 基于计算机发展的 AI 离识别与获取高精度、高产量、高质量数据尚有一段距离, 此外城市动态模型建设成本极高, 在城市设计中的普及性和实施性不强, 相当一部分城市设计仍以质性研究为决策依据 ^[30]
AAD	2010 年至 2020 年	自动化的 AI	利用自动化 AI, 突破 CAD 等绘图软件和 BIM 等 3D 建模软件的局限性, 学习城市系统要素特征的能力, 结合专家决策预测城市系统发展、提出风险防控决策和监督系统运转 ^[31]	由于 AI 尚未形成基于城市规划建设理论研究和实践经验的城市空间认知, 其设计决策输出质量不高, 且设计师需在该过程中投入大量时间成本, 因此城市多方利益主体对其智能决策模型的实施性仍保持观望态度 ^[32]
AIGD	2020 年 至今	新一代自主化的 AI	具备海量高维度多源数据集成能力、自训练和自适应潜力、科学性和可解释性	

1.2 Difficultés réelles de la conception urbaine

Le processus typique de la conception urbaine peut être résumé en plusieurs étapes : formulation du problème de conception, développement du projet, évaluation du projet, décision sur le projet et résolution du problème^[25]. La diversification des sources de données et l'intelligence croissante des plateformes intégrées homme-machine sous l'impulsion de l'IA compensent les insuffisances des outils existants dans la décision et la création en conception urbaine. À chaque étape, les technologies concernées peuvent traiter, analyser, simuler et présenter des modèles de données de conception urbaine, accroître l'efficacité, résoudre des problèmes de conception et améliorer la qualité des projets. L'idée que l'IA de nouvelle génération transformera l'ensemble du processus de conception urbaine fait désormais consensus^[15,23,26,37-38]. Les difficultés actuelles de la conception urbaine sont principalement les suivantes (Fig.2).

(1) Dans les étapes de formulation du problème de conception et de développement du projet, il existe un paradoxe entre l'incomplétude du système cognitif des modèles d'IA et le développement multidimensionnel et pluriperspectif de l'espace urbain. Les limites du système cognitif de l'IA se manifestent principalement à deux niveaux. Premièrement, les modèles de conception actuels privilégient l'optimisation de la compétitivité économique de l'espace urbain et accordent peu d'attention aux informations spatiales immatérielles, telles que les contextes historiques ou l'esthétique du design, que les capteurs de données ne peuvent saisir. Certaines recherches ont élaboré des méthodes mêlant indicateurs quantitatifs et qualitatifs, mais elles en sont encore à leurs débuts, ne s'appliquent qu'à la conception d'éléments isolés et n'ont pas encore été mobilisées dans des scènes urbaines complexes ; les études relatives à la conception tridimensionnelle multi-échelle restent limitées. Deuxièmement, le renouvellement technique de l'IA est transdisciplinaire, tandis que la conception urbaine implique de multiples parties prenantes, ce qui impose des exigences plus élevées aux graphes de connaissances et aux modèles intégrés d'AIGD. Définir la relation homme-machine et le positionnement disciplinaire, construire des plateformes d'assistance par IA à plusieurs niveaux, fondées sur des données hétérogènes multisources, intégrer des connaissances professionnelles composites et établir des mécanismes AIGD combinant différents algorithmes et mécanismes génératifs deviennent donc des enjeux majeurs.

(2) Dans les étapes d'évaluation et de décision du projet, un paradoxe apparaît entre la logique binaire de la décision par IA et la complexité plurielle du contenu de la conception urbaine. La plupart des méthodes de recherche liées à l'IA restent au stade conceptuel ou expérimental et se concentrent sur l'amélioration de l'intelligence des modèles et plateformes de conception ; or le niveau d'intelligence ne se confond pas avec la capacité de décision en conception. Le premier se manifeste surtout par la vitesse de calcul et de décision et par la capacité de traitement multithread des problèmes, tandis que la multidimensionnalité, l'ingénierie et la dimension sociale de la ville exigent une évaluation multi-objectifs de scènes de conception complexes, une meilleure articulation entre recherche scientifique en IA et création de design, ainsi qu'une généralisation plus forte des technologies d'IA. En outre, la logique de fonctionnement des systèmes décisionnels actuels d'IA diffère de celle des parties prenantes urbaines ; leurs résultats d'interprétation spatiale peuvent diverger de la ville réelle, et leurs décisions, souvent binaires, risquent de manquer de considération éthique, de produire des injustices spatiales^[39] ou de se détacher de la réalité.

Dans l'ensemble, à partir des caractéristiques du développement des technologies d'IA, des systèmes urbains et de la logique de la conception urbaine, la conception urbaine face à l'IA de nouvelle génération doit résoudre deux difficultés essentielles :

Conception urbaine face à l'intelligence artificielle de nouvelle génération : transformation paradigmatique et capacitation par l'intelligence numérique

(1) La difficulté de la rationalité des valeurs. L'IA se développe fortement, mais s'accorde difficilement avec les mécanismes de la conception urbaine ; les limites cognitives et décisionnelles de cette dernière tiennent, en substance, à l'absence de clarification des droits et responsabilités des multiples acteurs dans le fonctionnement de l'IA. Ce problème déterminera l'écologie de développement de l'AIGD, c'est-à-dire le degré d'intégration de la technologie IA avec le travail des concepteurs, les outils de conception urbaine et la gouvernance urbaine, et se traduira in fine par l'efficacité des décisions de conception et leur force d'exécution. Au niveau de la rationalité des valeurs, la conception urbaine doit y répondre en dégagant, à partir des caractéristiques d'application de l'IA de nouvelle génération, les nouvelles caractéristiques et exigences de transformation du paradigme de conception urbaine.

(2) La difficulté de la rationalité instrumentale. La tendance transdisciplinaire du développement de l'IA, le contenu social de la ville et les différences territoriales imposent des exigences techniques à la conception spatiale personnalisée. À ce stade, l'IA peine encore à construire un modèle numérique intelligent couvrant l'ensemble de la ville, et la valeur pratique des projets générés reste limitée. Cela freine la participation du marché et du public à l'AIGD, limite l'ampleur de ses applications industrielles et affecte finalement sa dynamique de développement et la réalisation de sa rationalité. Au niveau de la rationalité instrumentale, la conception urbaine doit y répondre en clarifiant la logique de capacitation numérique intelligente qui conduit d'un modèle fondé sur les données à un modèle porté par l'IA.

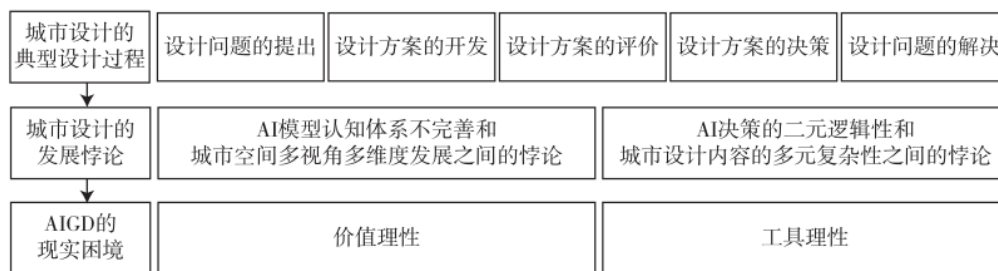


Fig.2 Difficulté réelle de la conception urbaine

2 Transformation paradigmatique : de la conception unique à la conception hybride

Pour réaliser une conception urbaine conforme à la rationalité des valeurs dans le contexte de l'IA de nouvelle génération, il faut d'abord interpréter l'orientation de sa transformation paradigmatique. Selon les caractéristiques de la relation homme-machine, l'évolution des paradigmes de la conception urbaine peut être résumée en trois étapes : paradigme d'intégralité, paradigme de valeur et paradigme d'interaction. Elle va d'un paradigme subjectif de conception urbaine, sans influence de l'IA et reposant uniquement sur le cerveau humain, à un paradigme objectif actuel où modèles paramétriques et algorithmes assistent la décision informatique, puis à un futur paradigme hybride d'interaction homme-machine. Cette transformation implique une reconstruction des mécanismes, une recomposition des valeurs et une réorganisation de l'espace.

2.1 Reconstruction du mécanisme de transmission

Aux périodes PD et AAD, les puissantes capacités de stockage et de calcul de l'ordinateur ont attiré l'attention du secteur. La conception urbaine présentait alors un fort caractère appuyé par les données et son mécanisme de transmission se manifestait comme une structure unidirectionnelle « ordinateur-espace-humain ». Les concepteurs recevaient passivement les modèles d'analyse, de supervision et de prévision urbaines fournis par l'IA, puis les complétaient. D'un côté, cela a accéléré la conversion de la cognition spatiale urbaine, d'une expression qualitative vers une information quantitative intégrant

Conception urbaine face à l'intelligence artificielle de nouvelle génération : transformation paradigmatique et capacitation par l'intelligence numérique

l'évolution historique, multi-échelle et dynamiquement actualisable ; de l'autre, cela a conduit les résultats de conception à réduire les intérêts urbains pluriels à une compétitivité économique, à considérer l'espace urbain comme un espace physique entièrement quantifié et dépourvu de sollicitude humaniste, et à assimiler la planification-conception à la maintenance de défaillances du système de données urbaines.

Avec l'innovation des technologies d'IA, la conception urbaine, afin d'en assurer la contrôlabilité, accordera progressivement davantage d'attention à la logique sémantique du fonctionnement des systèmes d'IA, aux ancrages spatiaux concrets et à la collaboration avec les concepteurs pour la mise en œuvre. À partir des avantages et des limites des mécanismes antérieurs, elle propose un mécanisme ternaire de rétroaction « humain-IA-espace » (Fig.3).

Du point de vue de leurs fonctions, les concepteurs passeront du rôle de dessinateurs et de programmeurs à celui d'experts de l'expérience et de la logique de conception, ainsi que de créateurs de projets. Ils devront fournir à l'IA une expérience de conception, et vérifier puis optimiser en temps utile sa cognition du design, le fonctionnement de ses modèles et la mise en œuvre des solutions. Les autorités compétentes définiront principalement les normes, règles et orientations de valeur de l'AIGD, et organiseront périodiquement la supervision et l'évaluation des modèles et résultats de conception urbaine. Le public, quant à lui, transmettra et fera remonter par le modèle d'IA le renouvellement de sa compréhension de l'IA et des résultats de conception qu'elle produit, l'expression de ses besoins et ses suggestions de contrôle. L'IA de nouvelle génération interprétera le cadre logique et les projets de conception urbaine acquis au moyen de paramètres spécifiques et générera des modèles d'effets urbains idéaux comme retour préliminaire de conception. L'espace urbain, en tant que référence réelle pour l'auto-entraînement et l'adaptation des modèles d'IA, permettra au système de cognition spatiale de s'actualiser dans une double direction verticale et horizontale, subjective et objective, et au système de conception spatiale de s'approfondir en associant sens du design et scientificité, fonctionnalité et humanité.

Cette structure ternaire rompt l'impasse de la conception passive actuelle et montre que l'IA est, dans son essence, façonnée par la ville et par l'homme, ce qui confère à l'AIGD une forte corrélation interne et un potentiel de développement. En tant que complexe qui façonne les dynamiques sociales, la ville n'accepte pas passivement l'AIGD ; elle reconfigure l'espace matériel par les comportements environnementaux propres à la conception urbaine. Ses éléments spatiaux et ses données fournissent à l'IA des matières premières et de l'énergie, tout en influençant sa nature même^[40].

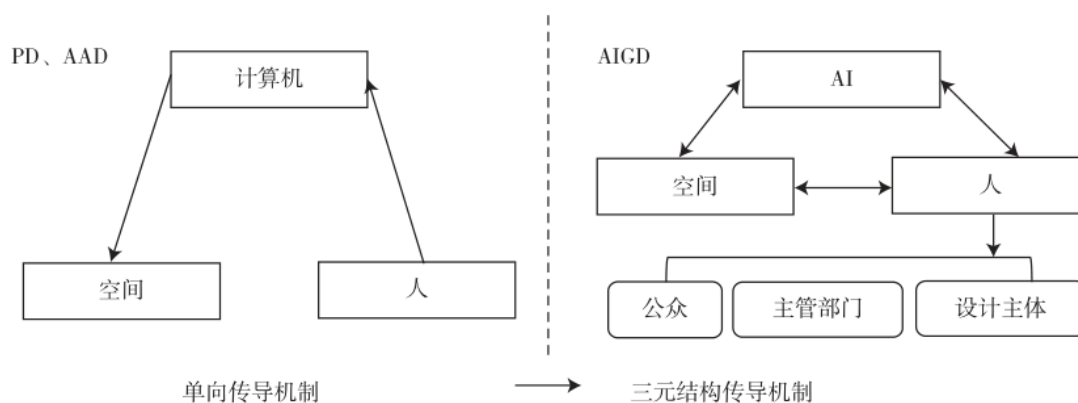


Fig.3 Logique de reconstruction du mécanisme de transmission de l'AIGD

2.2 Recomposition des valeurs humanistes

Conception urbaine face à l'intelligence artificielle de nouvelle génération : transformation paradigmatique et capacitation par l'intelligence numérique

L'homme est à la fois l'élément structurel central et le moteur de la ville et de l'IA, ainsi que le point de départ de la définition des problèmes de conception urbaine et le sujet qui perçoit les résultats de la conception. La conception, la construction et la supervision assistées par l'IA doivent être accomplies par des personnes, et la résolution des problèmes de conception affecte directement ou indirectement les groupes humains. La PD mettait l'accent sur la quantification de l'intérêt public et considérait les multiples parties prenantes comme des acteurs économiques idéaux ; l'AAD a davantage intégré l'idée humaniste et a positionné l'homme comme personne naturelle. Face à l'IA de nouvelle génération, la conception urbaine doit, à partir des caractéristiques de travail du cerveau humain et de l'ordinateur, ainsi que des besoins de développement social et individuel, clarifier davantage la relation homme-machine et recomposer les valeurs du design.

Du point de vue des capacités décisionnelles en conception, le cerveau humain associe une puissance de calcul limitée à l'unité de l'intelligence et de l'émotion. L'IA dispose, grâce à ses capacités relativement fortes de calcul et de stockage, de certains avantages en matière de perception urbaine, d'efficacité d'apprentissage et de mise en relation des connaissances, mais elle manque d'une base cognitive de conception urbaine et d'une capacité créative authentique^[41]. L'IA de nouvelle génération peut capter des données spatiales urbaines et des informations de perception humaine de haute précision et multidimensionnelles ; elle constitue ainsi une extension matérielle par laquelle l'homme explore en profondeur les lois de fonctionnement de la ville et les besoins de conception, et l'une des forces productives de la conception urbaine conduite par l'homme. Dans le milieu naturel, l'homme est envisagé à travers l'articulation spatiale de ses attributs sociaux et naturels ; dans le milieu social, les droits, responsabilités et mécanismes de supervision des acteurs de la division du travail en conception urbaine sont plus clairement définis. L'IA de nouvelle génération favorise ainsi l'intégration de l'homme écologique et de l'homme naturel dans la conception urbaine (Fig.4).

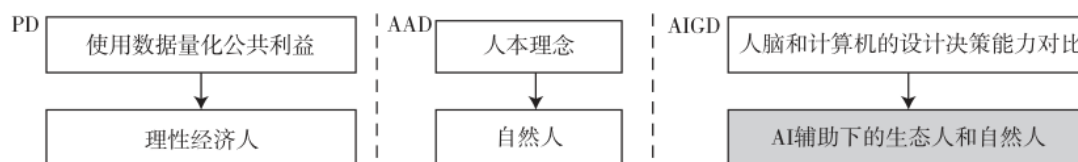


Fig.4 Logique de recomposition des valeurs humanistes de l'AIGD

2.3 Réorganisation de l'espace de conception

La conception urbaine étant une création de l'ordre spatial, le paradigme capacitant de l'IA de nouvelle génération se manifestera finalement par une réorganisation de l'espace de conception. Ce processus se déploie aux niveaux macro, méso et micro (Fig.5).

2.3.1 Macro : système de développement de la conception urbaine associant dimensions matérielles et immatérielles

Au niveau macro, l'AIGD peut réaliser un modèle de développement spatial articulant les dimensions dure et souple, c'est-à-dire combinant la construction matérielle de l'espace et la construction humaniste. Le design urbain « dur » vise principalement la mise à jour des fonctions spatiales et le fonctionnement normal des systèmes d'infrastructures, afin de maintenir les activités fondamentales de production et de vie et de renforcer la résilience spatiale. Le design « souple » met l'accent sur la continuité et la mise en valeur des ressources naturelles, de l'histoire et de la culture, ainsi que des caractéristiques morphologiques de la ville, afin que l'espace urbain conserve les traces

Conception urbaine face à l'intelligence artificielle de nouvelle génération : transformation paradigmatique et capacitation par l'intelligence numérique de sa croissance, exprime la participation du public à l'histoire urbaine et accroisse sa valeur humaniste et son sentiment d'appartenance.

2.3.2 Méso : système intelligent d'organisation des clusters organiques urbains

Au niveau méso, l'espace de conception urbaine autonomisé par l'IA de nouvelle génération présentera une logique intelligente de clusters organiques complexes. Les applications antérieures de l'IA ont favorisé le développement rationnel de la conception urbaine et facilité l'exploitation et la gestion urbaines, mais elles ont aussi comprimé le potentiel spatial de divers clusters fonctionnels^[42-43]. L'IA de nouvelle génération peut construire un espace urbain virtuel à l'échelle du réel, calculer les combinaisons organiques possibles de multiples éléments urbains selon les activités urbaines, simuler les modes d'organisation des clusters, synthétiser les exigences de conception spatiale issues de l'auto-organisation des activités urbaines et surveiller leur mise en œuvre. Les clusters deviennent ainsi des unités permettant de créer vitalité spatiale et résilience fonctionnelle, et de promouvoir un développement urbain plus intelligent et plus organique.

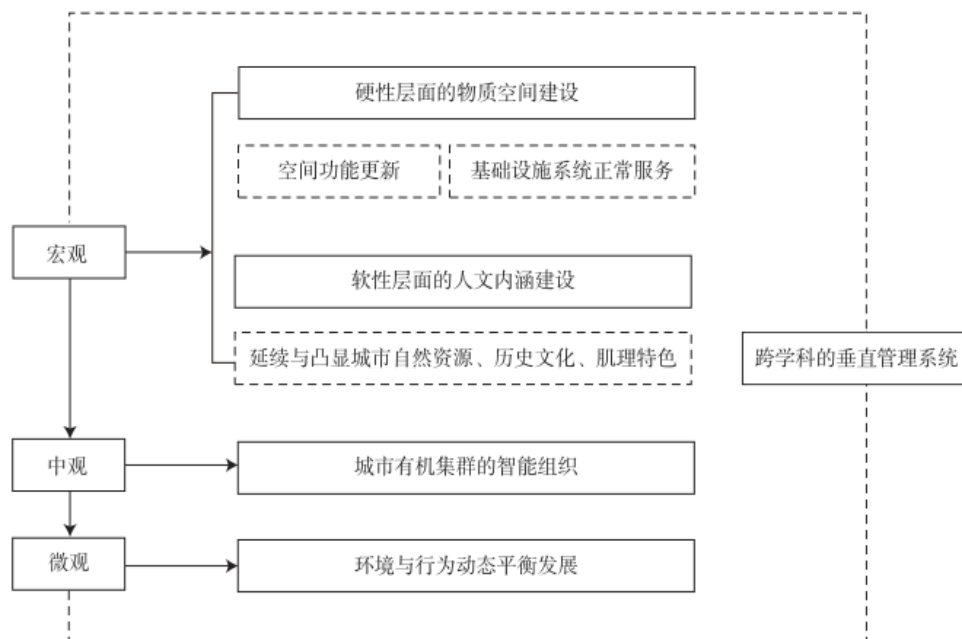


Fig.5 Logique de réorganisation de l'espace de conception de l'AIGD

2.3.3 Micro : médiation spatiale de l'équilibre dynamique entre environnement et comportement

Au niveau micro, la conception urbaine assistée par l'IA de nouvelle génération se concentrera sur les modes de fonctionnement concrets des clusters organiques urbains, c'est-à-dire sur la logique des lieux et des comportements et leurs influences réciproques, afin de réaliser un équilibre dynamique entre l'environnement et le comportement. D'un côté, des caractéristiques spatiales telles qu'un faible taux de végétalisation, une forte densité de population et de bâti, un tissu urbain monotone ou une discordance entre l'échelle urbaine et les activités spatio-temporelles peuvent susciter des émotions négatives et réduire l'efficacité des activités urbaines ; de l'autre, l'augmentation des comportements négatifs des populations peut en retour diminuer l'efficacité d'usage de l'espace urbain et entraver l'efficacité productive de la ville, le partage des équipements et l'ouverture des espaces publics. L'IA de nouvelle génération peut extraire les régularités spatio-temporelles spécifiques entre comportements humains et environnement urbain, et aider les concepteurs à réaliser des conceptions spatiales fines conformes aux principes humanistes.

Conception urbaine face à l'intelligence artificielle de nouvelle génération : transformation paradigmatique et capacitation par l'intelligence numérique

En outre, le système de gestion verticale de la conception urbaine peut maintenir l'ordre organique de l'espace de conception du niveau macro au niveau micro, quantifier dynamiquement l'action de chaque niveau et en surveiller la mise en œuvre. Dans l'ensemble, l'IA de nouvelle génération, grâce à son stockage massif de données et à sa forte capacité d'interprétation intégrée, favorise la fusion et le prolongement des niveaux macro, méso et micro, ainsi que leur présentation visuelle, intégrée et réaliste, renforçant ainsi en profondeur et en largeur la cognition et l'exécution de la conception urbaine.

3 Capacitation numérique intelligente : du modèle fondé sur les données au modèle porté par l'IA

Le passage de CAD et PD à AAD et AIGD a toujours été porté par la technique. Les premières phases se manifestaient surtout par un renforcement, sous l'impulsion des données, des capacités d'analyse spatiale urbaine et de suivi dynamique. Avec l'émergence continue de plateformes intégrées homme-machine plus intelligentes, la conception urbaine commence également à explorer des technologies portées par l'IA, principalement selon trois directions.

Premièrement, autour de la cartographie des entités, l'exploration du développement des modèles urbains intelligents offre de nouvelles possibilités de représentation des caractéristiques urbaines. Le « jumeau urbain », centré sur des technologies clés telles que la réalité virtuelle et l'apprentissage automatique, peut obtenir des données spatiales réelles par le suivi et l'identification de données dynamiques, et établir des liens en temps réel et des rétroactions dynamiques entre ville physique et ville numérique.

Deuxièmement, autour de la simulation et de la prévision, l'exploration des technologies d'inférence intelligente fournit des voies d'analyse pour les jeux d'interprétation et l'optimisation dynamique des informations urbaines multidimensionnelles. À mesure que l'IA renforce les capacités de simulation et de prévision des modèles urbains intelligents, de nombreuses recherches se sont intéressées à la prévision de la taille de la population, de la croissance foncière, des flux de trafic et d'autres phénomènes^[19,21-22,44].

Troisièmement, autour de la conception précise, la conception générative appuyée par divers algorithmes d'apprentissage profond et d'apprentissage automatique offre un soutien technique à la mise en œuvre dans des environnements bâtis complexes. Des recherches ont successivement mobilisé l'IA pour l'interaction spatiale et la décision de conception, en construisant des plateformes interactives par la génération et la conception de modèles de visualisation spatiale, afin de promouvoir une conception de précision.

À l'heure actuelle, le domaine du design demeure principalement porté par les données et les algorithmes. Mais la médecine, la biologie et les mathématiques explorent déjà l'IA de nouvelle génération^[45] et proposent des voies d'intégration entre technologies transdisciplinaires et IA. Elles fournissent ainsi certaines références techniques pour que la conception urbaine réalise véritablement une conduite par l'IA et dépasse la difficulté de la rationalité instrumentale. Trois grandes voies peuvent être dégagées.

3.1 IA + formes de vie artificielle

Les technologies actuelles d'IA restent limitées à des opérations intelligentes dans des domaines isolés, tels que la reconnaissance d'images, la reconnaissance vocale ou la réponse dialogique^[46-47]. En réponse, l'IA de nouvelle génération vise la coopération de fonctions cérébrales globales telles que l'auto-compréhension, l'auto-contrôle, la conscience de soi et l'auto-motivation. Elle développe des modèles d'apprentissage de l'intelligence cérébrale (brain intelligence, BI) à partir de la vie artificielle

Conception urbaine face à l'intelligence artificielle de nouvelle génération : transformation paradigmatique et capacitation par l'intelligence numérique (artificial life, AL) et des technologies d'IA, en utilisant non seulement des structures de réseaux neuronaux et des mécanismes d'optimisation des paramètres^[48], mais aussi des modèles génétiques tels que les réseaux de régulation génique (gene regulatory network, GRN) et les réseaux de réactions évolutives (evolutionary reaction network, ERN)^[49]. Ces modèles complètent les insuffisances de l'apprentissage profond, notamment l'incapacité des modèles d'auto-entraînement à effectuer simultanément plusieurs tâches et l'incapacité d'adapter les acquis d'apprentissage entre disciplines et domaines, permettant à l'IA de fonctionner de manière autonome et efficace même dans un environnement non supervisé. En outre, l'intelligence cérébrale peut établir des relations entre des éléments peu manifestement liés, à l'image du cerveau humain^[50]. Les recherches sur les modèles d'apprentissage de l'intelligence cérébrale restent pour l'heure au niveau théorique en médecine et en biologie, mais leur cadre logique offre une référence pour réaliser, en conception urbaine, une rétroaction d'information entre l'IA et les concepteurs.

3.2 IA + blockchain

La technologie IA fournit certes à la conception urbaine des données urbaines diverses et de grande précision, mais elle n'a pas encore acquis, sur la base de l'expérience de construction urbaine, des capacités de nettoyage, de filtrage, d'interprétation fine et de protection des actifs de données^[51]. Cela augmente d'une part les coûts d'analyse des données et de mise en œuvre des projets pour les concepteurs, et représente d'autre part une menace potentielle pour le développement urbain, l'espace territorial et même la sécurité nationale. Afin de construire des modes de gestion sûrs des données non structurées, les domaines de la santé publique et des communications proposent de combiner blockchain et IA. Les fonctions de stockage et de chiffrement de données à haute précision et décentralisées de la blockchain peuvent améliorer la reproductibilité, la capacité d'association et le haut niveau de sécurité du stockage des données par l'IA, ainsi que la capacité à générer de manière autonome le nettoyage et l'usage des données selon leurs caractéristiques^[52-54]. Elles permettent ainsi une acquisition de haute qualité et un contrôle des actifs de données dans plusieurs espaces urbains, voire à l'échelle régionale. Bien que cette technologie ne soit aujourd'hui appliquée qu'au stockage et aux statistiques de données médicales et financières, elle possède un potentiel certain pour accroître l'efficacité de l'extraction, de l'appel et de la protection des données spatiales urbaines.

3.3 IA + modèles de génération d'images et de vidéos

Pour l'expression des concepts et des projets de conception urbaine, les modèles texte-image tels que DALL-E^[55-56] et les modèles texte-vidéo tels que Sora^[57] résolvent le problème de défaillance fréquente des modèles d'entraînement fondés sur les algorithmes GAN^[58]. Par un entraînement et une adaptation multimodaux du texte et de l'image, ils soutiennent la construction d'images de conception urbaine, la reproduction du monde physique réel et la simulation des projets. Ces modèles de génération d'images et de vidéos réorganisent, dans leur essence, des structures de connaissances spatiales multimodales et fragmentées, simulent et étendent les règles matérielles de fonctionnement de l'espace physique, enrichissant la pensée et le champ de vision humains. D'un côté, ils offrent au domaine de la conception urbaine des interprétations diversifiées de contextes complexes et font passer le concepteur du rôle de récepteur passif de données à celui de producteur actif de projets ; de l'autre, ils font évoluer l'objet de conception de l'image spatiale vers des espaces régionaux et urbains constituant des environnements scéniques complexes, optimisant ainsi l'ordre organique des activités de production et de vie à l'échelle régionale.

4 Conclusion et perspectives : la conception urbaine tournée vers l'avenir

Conception urbaine face à l'intelligence artificielle de nouvelle génération : transformation paradigmatique et capacitation par l'intelligence numérique

Face aux difficultés réelles de la rationalité des valeurs et de la rationalité instrumentale sous l'impulsion de l'IA, la conception urbaine dispose d'opportunités et d'une nécessité de transformation paradigmatique et de capacitation numérique intelligente. Dans l'ensemble, la sortie des impasses de la conception urbaine conduite par l'IA de nouvelle génération doit revenir à l'intention première de la technologie, préciser, du point de vue de l'éthique et de la sécurité de l'IA, son rôle d'assistance plutôt que de substitution, et réaliser ainsi la gestion du cadre de vie sur l'ensemble de son cycle de vie.

4.1 Essence : revenir à l'intention première de la technologie

Quel que soit le saut accompli par les technologies d'IA, leur application à la conception urbaine doit toujours être guidée par l'intention première de celle-ci. L'AIGD peut souligner la symbiose mutuellement bénéfique entre l'homme et l'espace urbain par les mesures suivantes : ① construire une logique de valeurs et un cadre technique de l'IA visant à renforcer à la fois sa capacité d'auto-entraînement multimodal et l'autonomie des concepteurs urbains ; ② extraire les données spatiales urbaines et préciser les objectifs de conception à partir de l'expérience de la conception urbaine, des problèmes actuels de l'espace urbain et des besoins de développement de la ville et des populations ; ③ anticiper les risques spatiaux et les points d'optimisation par la simulation des projets de conception urbaine personnalisés par les concepteurs ; ④ optimiser les projets et les pratiques de conception urbaine en associant la perception spatiale exprimée par la participation publique et l'expérience de construction des concepteurs urbains.

4.2 Éthique : assistance plutôt que substitution

Le principe de développement de l'IA consiste à accroître l'adaptabilité multi-scénarios des modèles d'auto-entraînement, à augmenter les capacités de stockage et de calcul et à renforcer l'auto-contrôle et l'auto-supervision des modèles ; il ne peut ni ne doit remplacer le rôle du concepteur. Les projets de conception urbaine se renouvellent avec le développement de l'homme et s'approfondissent à travers la relation entre l'environnement urbain et les comportements humains. Or, l'IA n'étant pas une partie prenante de l'espace urbain, elle ne peut percevoir directement les effets spatiaux de la conception urbaine ni mettre à jour de manière autonome sa cognition spatiale et ses techniques ; elle ne peut qu'aider les concepteurs à élargir puis à resserrer leur pensée de conception. Même soutenus par l'IA et par des données de grande capacité, les concepteurs ne doivent pas dépendre excessivement de l'analyse des données et du design génératif ; ils doivent s'appuyer sur des outils intelligents pour extraire plus efficacement l'expérience de conception urbaine, créer des idées prospectives et réaliser l'articulation entre l'autonomisation du peuple et l'autonomisation technologique au niveau de la conception urbaine.

4.3 Contribution : gestion du cadre de vie sur l'ensemble du cycle de vie

L'IA de nouvelle génération peut simplifier le cadre opérationnel de la conception urbaine et améliorer la prévisibilité et la contrôlabilité des éléments spatiaux. Par exemple, les modèles de jumeaux numériques capables de simuler des traversées spatio-temporelles permettent de filtrer et de comparer des phénomènes spécifiques du cadre de vie ; les projets de conception urbaine personnalisés par l'IA améliorent la scientificité et la pluralité de la décision de design ; les techniques d'apprentissage automatique permettent de construire des cadres d'auto-apprentissage diversifiés de l'espace urbain, renforçant la généralisation de l'IA et la faisabilité des projets ; les techniques de gouvernance par intelligence collective peuvent, selon l'idée de symbiose entre plusieurs formes de vie, superviser dynamiquement la mise en œuvre des projets de conception urbaine. Avec l'IA de nouvelle génération comme plateforme, les mécanismes de fonctionnement de la conception urbaine

Conception urbaine face à l'intelligence artificielle de nouvelle génération : transformation paradigmatique et capacitation par l'intelligence numérique et les modèles de données spatiales achèveront la jonction informationnelle et l'intégration du développement, réalisant finalement une gestion fine du cadre de vie sur l'ensemble de son cycle de vie.

Références

- [1] CAI Yuezhou. Gouvernance de l'innovation scientifique et technologique sous la direction du Parti communiste chinois et transformation numérique : perspective de construction et d'amélioration d'un nouveau système national fondé sur les données [J]. *Management World*, 2021, 37(8): 30-46. (en chinois)
- [2] DUAN Xuejun. Ville virtuelle : solutions techniques et applications [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2001(12): 1-3. (en chinois)
- [3] YE Yu, DAI Xiaoling. Possibilités d'application de la perception spatiale et du design dans les conditions des nouvelles technologies et des nouvelles données [J]. *Time + Architecture*, 2017(5): 6-13. (en chinois)
- [4] LONG Ying, SHEN Yao. Design augmenté par les données : réponses et transformations de la planification et du design dans un nouvel environnement de données [J]. *Shanghai Urban Planning Review*, 2015(2): 81-87. (en chinois)
- [5] WANG De, WANG Can, XIE Dongcan, et al. Comparaison des zones d'influence de centres commerciaux de différents niveaux à Shanghai à partir de données de signalisation mobile : cas de Nanjing East Road, Wujiaochang et Anshan Road [J]. *Urban Planning Forum*, 2015(3): 50-60. (en chinois)
- [6] JIANG Haobo, LU Shan, XIAO Yang. Méthode d'évaluation des couleurs urbaines des quartiers historiques et culturels de Shanghai fondée sur la technologie Street View [J]. *Urban Planning Forum*, 2022(3): 111-118. (en chinois)
- [7] TIAN Baojiang, NIU Xinyi. Pratique du design urbain appuyée par le big data : planification du réseau d'espaces d'activités publiques du quartier historique et culturel Hengshan Road-Fuxing Road [J]. *Urban Planning Forum*, 2017(2): 78-86. (en chinois)
- [8] LI Xia, YE Jiaan. Automates cellulaires fondés sur les réseaux neuronaux et simulation de systèmes complexes d'occupation des sols [J]. *Geographical Research*, 2005(1): 19-27. (en chinois)
- [9] WADDELL P, BORNING A, NOTH M, et al. Microsimulation of urban development and location choices: design and implementation of UrbanSim [J]. *Networks and Spatial Economics*, 2003, 3(1): 43-67.
- [10] GAN Wei. Théorie et modèle de planification par IA du point de vue de la vie urbaine [J]. *Planners*, 2018, 34(11): 13-19. (en chinois)
- [11] WU Zhiqiang, GAN Wei. Pratique des technologies intelligentes de planification urbaine en période de transition [J]. *Urbanism and Architecture*, 2018(3): 28-31. (en chinois)
- [12] WU Zhiqiang. Planification urbaine assistée par IA [J]. *Time + Architecture*, 2018(1): 6-11. (en chinois)
- [13] ZHENG H, YUAN P F. A generative architectural and urban design method through artificial neural networks [J]. *Building and Environment*, 2021, 205(6): 108178.
- [14] YANG Junyan, ZHU Xiao. Exploration d'un mode de conception interactive progressive à l'échelle de l'îlot pour le design urbain par intelligence artificielle [J]. *Urban Planning International*, 2021, 36(2): 7-15. (en chinois)

- [15] WANG Jianguo. Conception urbaine numérique fondée sur l'interaction homme-machine : réflexions sur la quatrième génération de paradigme de conception urbaine [J]. Urban Planning International, 2018, 33(1): 1-6. (en chinois)
- [16] SUN Cheng, HAN Yunsong, WANG Jiabiao. Recherche et pratique sur la conception computationnelle de la morphologie des enveloppes architecturales adaptatives [J]. Architectural Journal, 2022(2): 1-8. (en chinois)
- [17] BATTY M, SHEN Yao. L'IA dans l'urbanisme et la conception urbaine [J]. Time + Architecture, 2018(1): 24-31. (en chinois)
- [18] PAN Y, TIAN Y, LIU X, et al. Urban big data and the development of city intelligence [J]. Engineering, 2016, 2(2): 171-178.
- [19] JIANG F, MA J, WEBSTER C J, et al. Generative urban design: a systematic review on problem formulation, design generation, and decision-making [J]. Progress in Planning, 2023, 180(1-35): 100795.
- [20] QUAN S J, PARK J, ECONOMOU A, et al. Artificial intelligence-aided design: smart design for sustainable city development [J]. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, 2019, 46(8): 1581-1599.
- [21] FANG Z, JIN Y, YANG T. Incorporating planning intelligence into deep learning: a planning support tool for street network design [J]. Journal of Urban Technology, 2022, 29(2): 99-114.
- [22] SHEN J, LIU C, REN Y, et al. Machine learning assisted urban filling [C]//Proceedings of the 25th CAADRIA Conference. Hong Kong: Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA), 2020, 2: 679-688.
- [23] LONG Ying, ZHANG Enjia. Trois voies par lesquelles la révolution scientifique et technologique favorise les études et pratiques urbaines : laboratoires urbains, nouvelles villes et villes futures [J]. World Architecture, 2021(3): 62-65. (en chinois)
- [24] DENG Kaixuan, ZHANG Zhao, WANG Jun. Émergence et exploration du design intelligent de la morphologie urbaine dans le contexte numérique [J]. Urban and Rural Planning, 2023(3): 80-90. (en chinois)
- [25] GAN Wei, WU Zhiqiang, WANG Yuankai, et al. Construction d'un modèle théorique pour l'assistance AIGC à la conception urbaine [J]. Urban Planning Forum, 2023(2): 12-18. (en chinois)
- [26] WANG Jianguo. Les quatre générations de paradigmes de conception urbaine du point de vue de la planification rationnelle [J]. City Planning Review, 2018, 42(1): 9-19. (en chinois)
- [27] RENNER G, EKÁRT A. Genetic algorithms in computer aided design [J]. Computer-Aided Design, 2003, 35(8): 709-726.
- [28] BANDLER J W. Optimization methods for computer-aided design [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1969, 17(8): 533-552.
- [29] SARCAR M M M, RAO K M, NARAYAN K L. Computer Aided Design and Manufacturing [M]. Delhi: PHI Learning Pvt. Ltd., 2008.
- [30] SCHUMACHER P. Design parameters to parametric design [M]//KANAANI M, KOPEC D. The Routledge Companion for Architecture Design and Practice. New York: Routledge, 2015.
- [31] TEDESCHI A, LOMBARDI D. The algorithms-aided design (AAD) [M]//HEMMERLING M, COCCHIARELLA L. Informed Architecture: Computational Strategies in Architectural Design. Cham: Springer, 2017.
- [32] POPELKA S, ZERTUCHE L, BEROCHÉ H. Urban AI Guide [M]. Geneva: Zenodo, 2023.

- [33] GAN Wei. Étude des types et caractéristiques des technologies de planification urbaine intelligente en Chine et à l'étranger [J]. *Urban Planning International*, 2018, 33(3): 105-111. (en chinois)
- [34] YANG Junyan. Du design numérique au contrôle numérique : exploration par Weihai du paradigme de quatrième génération de la conception urbaine [J]. *Urban Planning Forum*, 2020(2): 109-118. (en chinois)
- [35] YANG Junyan, ZHU Xiao, SHAO Dian. Retour sur l'histoire : évolution et perspectives d'un siècle de technologies de conception urbaine fondées sur les graphes de connaissances [J]. *Urban Planning Forum*, 2021(6): 20-27. (en chinois)
- [36] HERZOG O, PAN Haixiao, DENG Zhituan, et al. L'IA de nouvelle génération au service de l'urbanisme : opportunités et défis [J]. *Urban Planning Forum*, 2023(4): 1-11. (en chinois)
- [37] WANG Shifu, LIANG Xiaoqi, DENG Zhaohua. Réflexions sur les idéaux spatiaux de la conception urbaine en Chine [J]. *Zhuangshi*, 2021(1): 32-37. (en chinois)
- [38] WANG Fang. Accompagner la nature, intégrer l'humanisme et l'autonomisation numérique : intégration d'un paradigme de conception urbaine de la nouvelle ère dans *Urban Design* (4e éd.) [J]. *The Architect*, 2023(5): 126-129. (en chinois)
- [39] ZHANG Y. *CityMatrix: an Urban Decision Support System Augmented by Artificial Intelligence* [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2017.
- [40] CUGURULLO F, CAPROTTI F, COOK M, et al. *Artificial Intelligence and the City: Urbanistic Perspectives on AI* [M]. Oxfordshire: Taylor & Francis, 2023.
- [41] GRIFFITHS T L. Understanding human intelligence through human limitation [J]. *Trends in Cognitive Sciences*, 2020(11): 873-883.
- [42] VEREBES T. Modèles urbains interactifs : histoire et héritage liés au prototypage de la ville du XXIe siècle [J]. *Urbanism and Architecture*, 2015(28): 73-87. (en chinois)
- [43] VEREBES T, LI Xuening. Ville adaptative : changement urbain, résilience et trajectoire vers un urbanisme de caractère [J]. *World Architecture*, 2013(9): 101-105. (en chinois)
- [44] YIGITCANLAR T, CORCHADO J M, MEHMOOD R, et al. Responsible urban innovation with local government artificial intelligence (AI): a conceptual framework and research agenda [J]. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 2021, 7(1): 71-87.
- [45] FUJII H, MANAGI S. Trends and priority shifts in artificial intelligence technology invention: a global patent analysis [J]. *Economic Analysis and Policy*, 2018, 58: 60-69.
- [46] LI Y, LU H, LI J, et al. Underwater image de-scattering and classification by deep neural network [J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2016, 54: 68-77.
- [47] LU H, LI B, ZHU J, et al. Wound intensity correction and segmentation with convolutional neural networks [J]. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 2017, 29(6): e3927.
- [48] EMMERT-STREIB F, DEHMER M, HAIBE-KAINS B. Gene regulatory networks and their applications: understanding biological and medical problems in terms of networks [J]. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 2014, 2: 38-45.
- [49] DINH H Q, AUBERT N, NOMAN N, et al. An effective method for evolving reaction networks in synthetic biochemical systems [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2014, 19(3): 374-386.
- [50] LU H, LI Y, CHEN M, et al. Brain intelligence: go beyond artificial intelligence [J]. *Mobile Networks and Applications*, 2018, 23: 368-375.

- [51] LUUSUA A, YLIPULLI J, FOTH M, et al. Urban AI: understanding the emerging role of artificial intelligence in smart cities [J]. *AI & Society*, 2023, 38(3): 1039-1044.
- [52] TAGDE P, TAGDE S, BHATTACHARYA T, et al. Blockchain and artificial intelligence technology in e-health [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28: 52810-52831.
- [53] GHOSH P K, CHAKRABORTY A, HASAN M, et al. Blockchain application in healthcare systems: a review [J]. *Systems*, 2023, 11(1): 38-82.
- [54] ZUO Y, GUO J, GAO N, et al. A survey of blockchain and artificial intelligence for 6G wireless communications [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2023, 25(4): 2494-2528.
- [55] JHAJARIA S, KAUR D. Study and comparative analysis of ChatGPT, GPT and DALL-E2 [C]//2023 14th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT). Piscataway: IEEE, 2023: 1-5.
- [56] MARCUS G, DAVIS E, AARONSON S. A very preliminary analysis of DALL-E 2 [J]. *arXiv preprint arXiv*, 2022, 2(2204): 13807-13821.
- [57] LIU Y, ZHANG K, LI Y, et al. Sora: a review on background, technology, limitations, and opportunities of large vision models [J]. *arXiv preprint arXiv*, 2024, 3(2402): 17177-17215.
- [58] TANG R, LIU L, PANDEY A, et al. What the DAAM: interpreting stable diffusion using cross attention [J]. *arXiv preprint arXiv*, 2022, 5(2210): 4885-4898.

Révisé : décembre 2024

(Cet article a été traduit avec l'aide de l'IA.)