

Technologies de planification numérique - Données et connaissances

NIU Xinyi, LIN Shijia, SANG Tian, ZHANG Xiaoke

Résumé : En utilisant les paradigmes technologiques axés sur les données et les connaissances, cet article examine de manière systématique les domaines et types de technologies de planification numérique, ainsi que les tendances et les défis émergents. En distinguant les concepts de technologie numérique et de technologie de planification numérique, l'article explore l'évolution de trois catégories de technologies de planification numérique : la modélisation urbaine, la planification basée sur les mégadonnées spatio-temporelles et la planification basée sur l'intelligence artificielle. Il identifie deux paradigmes technologiques : la technologie axée sur les connaissances et la technologie axée sur les données, afin de comprendre les utilisations et les défis actuels des technologies de planification numérique. En partant des données et des connaissances, l'article discute également des tendances émergentes dans le domaine des technologies de planification numérique. Les technologies de planification numérique sont des méthodes utilisant les technologies numériques à différentes étapes du processus de planification, notamment l'analyse, la simulation et la prise de décision. Les paradigmes technologiques axés sur les données peuvent bien soutenir l'analyse et la simulation, mais les limites du paradigme technologique axé sur les connaissances rendent difficile son utilisation pour la prise de décision. La tendance future des technologies de planification numérique est de combiner les données et les connaissances en résolvant les défis de la transition "des données aux connaissances". Ceci est accompli en apprenant et en extrayant les "connaissances boîte blanche" du domaine de la planification à partir des données, et en utilisant ces connaissances pour guider l'analyse, la simulation et la prise de décision en planification.

Mots clés: Technologie de planification numérique, Technologie numérique, Données axées, Connaissances axées, Paradigmes technologiques.

À l'ère numérique actuelle, les technologies numériques transforment profondément la vie et le travail des individus. Le développement des technologies numériques telles que l'informatique en nuage, les mégadonnées et l'intelligence artificielle favorise la transformation numérique de l'ensemble de la société, y compris dans les domaines de la vie, de l'économie et de la gouvernance. La discipline de l'urbanisme et de l'aménagement du territoire ressent également l'impact profond de la numérisation et des technologies numériques. Les dix dernières années ont été marquées par l'influence majeure des technologies numériques sur cette discipline. Par exemple, des technologies telles que les jumeaux numériques et la réalité virtuelle ont modifié la manière de percevoir et d'explorer l'espace urbain[1-2], tandis que les mégadonnées spatio-temporelles et l'intelligence artificielle ont rapidement été intégrées à la recherche et à la pratique de l'urbanisme[3-5]. La technologie émergente de génération de contenu par intelligence artificielle (AIGC) transforme la manière dont les plans et rapports de planification sont générés. Des recherches en planification aux résultats pratiques, les technologies numériques ont eu un impact profond et omniprésent sur l'urbanisme.

Les dix dernières années ont également été celles où l'urbanisme a porté une attention particulière aux technologies de planification numérique. Les technologies des mégadonnées

spatio-temporelles et de l'intelligence artificielle sont devenues des sujets majeurs dans cette discipline, entraînant deux vagues d'engouement. Depuis le début des années 2010, la technologie des mégadonnées spatio-temporelles a attiré une attention considérable et a eu un impact positif et profond sur les recherches concernant l'espace urbain. Cette technologie a été largement utilisée dans des domaines de recherche tels que la structure de l'espace urbain, la structure de l'espace régional, les comportements et l'environnement bâti, ainsi que la gouvernance urbaine, marquant ainsi le début de "l'ère des mégadonnées" en recherche en urbanisme[6]. Depuis la fin des années 2010, l'intelligence artificielle a de nouveau attiré l'attention des chercheurs en urbanisme[7], en particulier les techniques d'apprentissage automatique, qui ont vu une croissance rapide des publications académiques depuis 2018[8]. L'engouement pour l'intelligence artificielle dans cette discipline est encore en pleine expansion[9]. Les technologies de planification numérique sont désormais couramment utilisées dans la recherche en urbanisme, avec des sujets d'étude dans divers domaines.

Dans l'ère numérique actuelle, les technologies de planification numérique sont devenues les technologies dominantes en urbanisme. Bien qu'il existe une grande variété de technologies de planification numérique utilisées dans la recherche et la pratique de l'urbanisme, il subsiste encore de nombreuses questions en suspens concernant la compréhension même de ces technologies, ainsi que de l'impact et des changements qu'elles entraînent en raison de leur développement rapide. Cet article vise à répondre à ces questions. Il commence par définir le cadre conceptuel des technologies de planification numérique, puis, à partir des dimensions des données et des connaissances, passe en revue l'évolution de ces technologies, systématise leurs paradigmes technologiques et discute des tendances de recherche émergentes et des défis. Enfin, il envisage les tendances futures des technologies de planification numérique dans la discipline de l'urbanisme.

1. Le champ et les usages des technologies de planification numérique

1.1 Distinction entre technologies numériques et technologies de planification numérique

Pour définir précisément le cadre conceptuel des technologies de planification numérique, il est nécessaire de partir de la compréhension du mot « technologie ». Les définitions données par différents dictionnaires sont fondamentalement similaires : elles expliquent toutes la relation entre les concepts de science et de technologie, et définissent la technologie comme « l'application pratique de méthodes spécifiques issues de la science »¹. En partant de la relation entre technologie et science, on peut clairement distinguer deux types de technologies utilisées dans la recherche et la pratique de la planification.

La première catégorie peut être directement appelée « technologies numériques ». Bien que des technologies telles que la réalité virtuelle, l'informatique en nuage, l'internet des objets, etc., soient utilisées dans les applications du secteur de la planification, les sciences qui sous-tendent ces technologies sont les sciences informatiques, c'est-à-dire des connaissances issues du domaine de l'informatique. Concrètement, dans les applications de ces technologies à la planification, les sciences et méthodes sur lesquelles elles reposent ne diffèrent pas fondamentalement de celles utilisées dans d'autres domaines ou disciplines. Par exemple, la technologie de réalité virtuelle utilisée pour présenter les résultats de la planification ou la technologie des bases de données utilisée pour la gestion des informations de planification.

La deuxième catégorie peut être appelée « technologies de planification numérique ». Les

technologies de planification numérique sont des méthodes utilisant les technologies numériques aux différentes étapes de la recherche et de la pratique de la planification ; elles consistent à utiliser des technologies numériques pour réaliser l'analyse de l'état actuel de la planification, la modélisation et la prévision, la formulation de scénarios, le choix des scénarios, la mise en œuvre de la planification et l'évaluation de la planification. Bien que ces technologies reposent sur les technologies numériques, ce qui les guide est le savoir disciplinaire en urbanisme, et non celui des sciences informatiques. Concrètement, dans les applications de ces technologies aux étapes d'analyse de l'état actuel, de modélisation et de prévision, de formulation et de choix des scénarios, de mise en œuvre et d'évaluation, les sciences et méthodes sur lesquelles elles reposent diffèrent de manière significative de celles utilisées dans d'autres disciplines.

Avant l'apparition des technologies numériques, il existait déjà diverses technologies de planification. Prenons un exemple pour illustrer la relation et la différence entre les « technologies numériques » et les « technologies de planification numérique ». Au début des années 1960, McHarg a proposé la technologie de superposition pour l'analyse de la convenance des terres. Il utilisait des films transparents colorés à la main, superposés manuellement sous une source lumineuse, pour réaliser la méthode de superposition dite « millefeuille ». La méthode de superposition « millefeuille » créée par McHarg est une technologie de planification, guidée par l'idée urbanistique « Design with Nature » qu'il a formulée, une connaissance disciplinaire en urbanisme[10]. La technologie de planification de McHarg a inspiré les premiers chercheurs en systèmes d'information géographique (SIG) des années 1960, ce qui a conduit à la création de la fonction de superposition spatiale des SIG, devenue par la suite l'une des fonctions de base de l'analyse spatiale des SIG. La superposition spatiale des SIG est une « technologie numérique », et les sciences qui la guident sont les sciences de l'information géographique. À partir des années 1980, des techniques d'analyse de la convenance des terres basées entièrement sur la superposition SIG ont été développées[11-12], devenant une « technologie de planification numérique ». Ce qui guide la technique d'analyse de la convenance des terres à l'aide de la superposition SIG reste la connaissance urbanistique formulée par McHarg à l'époque. Cet exemple montre clairement qu'il est nécessaire, et possible, de distinguer les concepts de technologies numériques et de technologies de planification numérique.

1.2 Types d'usages des technologies de planification numérique

Une fois la distinction entre technologies numériques et technologies de planification numérique établie, on peut discuter des types d'usages des technologies de planification numérique. Les technologies de planification numérique peuvent être classées en trois types d'usages : l'analyse des effets de la planification, la simulation des phénomènes de planification et la prise de décision sur les objets de planification.

L'usage analytique désigne l'analyse des effets, des facteurs et des mécanismes. Le terme « diagnostic » couramment utilisé ces dernières années est un exemple typique d'usage analytique. Par exemple, utiliser les mégadonnées spatio-temporelles pour analyser la perception du public vis-à-vis des communautés peut efficacement diagnostiquer l'efficacité de la gouvernance communautaire.

L'usage de simulation inclut la modélisation et la prévision ; le terme « dérivation » couramment utilisé est un exemple typique d'usage de simulation. Par exemple, simuler l'impact de la mise en

œuvre d'une politique de ville compacte sur les finances publiques et les services urbains[14]. L'usage décisionnel désigne la formulation et le choix des scénarios de planification, qui est l'objectif central de la planification. Par exemple, utiliser des réseaux de neurones profonds pour générer le meilleur scénario de réseau routier[15].

Les trois types d'usages des technologies de planification numérique s'appuient sur diverses technologies numériques comme moyens fondamentaux, mais ce qui guide ces technologies, ce sont les connaissances urbanistiques appliquées aux étapes d'analyse de l'état actuel, de modélisation et de prévision, de formulation et de choix des scénarios, de mise en œuvre et d'évaluation.

Après avoir défini le concept et les usages des technologies de planification numérique, l'article examine trois technologies numériques typiques depuis les années 1990 — la modélisation urbaine, les technologies de planification basées sur les mégadonnées spatio-temporelles et les technologies de planification basées sur l'intelligence artificielle — en étudiant leur évolution respective, pour analyser leurs paradigmes technologiques et leurs relations avec les usages.

2. Techniques de modélisation urbaine : conduite par la connaissance et conduite par les données

2.1 Techniques de modélisation urbaine depuis le XXIe siècle

La technique de modélisation urbaine (urban modeling) est une technique de planification de longue date. Apparue dans les années 1950, la technique de modélisation urbaine n'était pas initialement une technique de planification numérique, et les modèles devaient être calculés manuellement. La technique de modélisation urbaine s'est largement répandue dans les années 1960, avec l'émergence de la pensée de la planification rationnelle qui a stimulé le développement des modèles urbains. Les modèles urbains à grande échelle (large scale urban model) sont devenus populaires, et la prise de décision est devenue l'un des principaux usages de la modélisation urbaine, ce qui a conduit à désigner cette période comme l'ère de la planification rationnelle (rational planning). La pensée de la planification rationnelle a pris fin dans les années 1970, et les modèles urbains à grande échelle ont été largement critiqués et remis en question[16], cependant, la technique de modélisation urbaine n'a pas disparu et a continué à exister dans le milieu académique[17]. Depuis les années 1990, des technologies numériques comme les SIG se sont intégrées à la modélisation urbaine[18], et la technique de modélisation urbaine est devenue une technologie typique de la planification numérique.

Depuis le XXIe siècle, trois types de techniques de modélisation urbaine se sont développées parallèlement. La première catégorie est le modèle urbain à grande échelle traditionnel, qui continue de se développer au XXIe siècle ; la deuxième catégorie est celle des modèles basés sur des règles (rule-based model) apparus au milieu des années 1990, principalement en raison des technologies SIG ; la troisième catégorie est celle des modèles de simulation microscopique comme les automates cellulaires (CA). Ces trois types de modèles urbains ont évolué jusqu'à aujourd'hui, avec des paradigmes techniques et des usages en constante évolution.

2.2 Conduite par la connaissance et conduite par les données dans la technique de modélisation urbaine

Le premier type, les modèles urbains à grande échelle, continue d'être utilisé dans la planification foncière et des transports des zones urbaines, avec UrbanSim[19-20] comme exemple typique.

Les modèles urbains à grande échelle après les années 1990 ont évolué d'un usage décisionnel vers un usage de simulation, utilisé pour simuler les impacts de différentes politiques de planification futures. Du point de vue des paradigmes techniques, les modèles urbains à grande échelle sont des techniques de planification conduite par la connaissance, dont les principes sont construits sur des connaissances en planification, en intégrant les interactions spatiales et de transport, ainsi que les principes de décision des ménages, entreprises et gouvernements. Les modèles urbains à grande échelle sont souvent appelés modèles "connaissance boîte noire" ou "connaissance boîte grise" car l'expression des interactions entre les terres, les transports, l'environnement, etc., nécessite des formules mathématiques complexes. Ces formules contiennent de nombreux paramètres, sont difficiles à comprendre et ne peuvent pas correspondre directement de manière claire aux objectifs et stratégies de planification spatiale.

Le deuxième type, les modèles basés sur des règles, avec des exemples comme CUF[21] et What If?[22-23], a été créé à l'origine pour simuler des politiques et évaluer leurs impacts possibles, et juger de la rationalité et de la faisabilité des stratégies de planification, sans être utilisés pour la prise de décision. Du point de vue des paradigmes techniques, les modèles basés sur des règles restent des techniques de planification conduite par la connaissance, mais leurs principes sont exprimés sous forme de règles simples et claires. Par exemple, le modèle CUF commence par prédire la demande totale, puis alloue l'utilisation des terres en fonction de la pertinence des zones foncières[24]. Les modèles ne sont plus basés sur des formules mathématiques de type interaction spatiale ou choix discret. Par comparaison, les modèles basés sur des règles sont appelés modèles "connaissance boîte blanche", fondés sur des règles simples créées à partir de connaissances explicites. L'émergence de ces modèles aux règles explicites est indissociable de l'intégration des technologies numériques comme les SIG.

Tableau 1 : Paradigmes techniques et usages des techniques de modélisation urbaine

	Modèles urbains à grande échelle	Modèle basé sur des règles	Modèle de simulation microscopique
Paradigme technologique	Connaissance dirigée	Connaissance dirigée	Basé sur les données
Utilisation	Transition de la prise de décision vers la simulation	Simulation	Simulation

La troisième catégorie des modèles de simulation microscopique inclut le modèle CA (automate cellulaire) [25] et le modèle ABM (multi-agent-based model) [26]. Les modèles de simulation microscopique ont été créés à l'origine pour simuler l'évolution future des schémas d'utilisation des sols, et jusqu'à aujourd'hui, ils sont principalement utilisés à des fins de simulation. Ces modèles ont introduit des approches issues des sciences informatiques, comme le CA et l'ABM, donnant ainsi naissance à un nouveau paradigme de modélisation basé sur les données. Les modèles de simulation microscopique dépendent de longues séries de données historiques pour ajuster les règles de transformation du modèle. Ils nécessitent des séries longues de données historiques pour entraîner le modèle, afin de simuler l'évolution future de l'utilisation des terres. Par exemple, on peut utiliser 200 ans de données historiques pour ajuster le modèle et simuler l'évolution de l'utilisation des sols pour les 50 prochaines années[27]. Le CA, qui provient des sciences informatiques, a apporté une méthode de modélisation pilotée par les données. Le cœur du modèle d'automate cellulaire réside dans les règles de transformation, qui ne reposent absolument sur aucune théorie ou principe de planification ; les règles sont "appries" à partir des données. Ces connaissances "appries", même si elles existent, restent des "connaissances

boîte noire".

Du paradigme de la modélisation pilotée par les données et par la connaissance, la connaissance a toujours été un mot-clé dans la technique de modélisation urbaine. Les modèles urbains à grande échelle traditionnels reposent sur des bases de "connaissances boîte grise", tandis que les modèles basés sur des règles reposent sur des bases de "connaissances boîte blanche". Les modèles de simulation microscopique ont introduit un paradigme de modélisation "piloté par les données", apportant également des "connaissances boîte noire" (Tableau 1). Actuellement, la technique de modélisation urbaine est davantage utilisée comme un laboratoire pour la simulation de l'évolution de l'espace urbain, la simulation étant devenue l'usage principal, et non l'usage décisionnel de l'ère de la planification rationnelle. Que ce soit pour la modélisation pilotée par la connaissance ou par les données, la technique actuelle de modélisation urbaine est principalement utilisée pour la simulation, sans pouvoir répondre efficacement aux besoins décisionnels.

3. Technologie de Planification des Données Spatiotemporelles Basée sur les Données

3.1 Évolution de la Technologie des Grandes Données Spatiotemporelles**

Les grandes données spatiotemporelles sont présentes dans la discipline de la planification depuis plus de 10 ans. Les grandes données spatiotemporelles elles-mêmes peuvent être utilisées comme une technologie numérique dans le cadre de la planification. Le projet *Mobile Landscapes* a été le premier à utiliser les données de communication mobile pour percevoir les variations spatiotemporelles de l'intensité des activités urbaines, où les grandes données spatiotemporelles étaient encore considérées comme relevant du domaine des technologies numériques [28]. Au cours des dix dernières années, les grandes données spatiotemporelles dans la planification urbaine et rurale ont évolué progressivement d'une technologie numérique vers une technologie de planification numérique permettant d'étudier la relation entre l'espace urbain et les activités urbaines. Elles sont devenues une technologie de soutien efficace pour des sujets de recherche en planification, tels que la structure de l'espace urbain, la structure de l'espace régional, le comportement et l'environnement construit, ainsi que la gouvernance urbaine. La technologie de planification des grandes données spatiotemporelles soutient la recherche sur les "activités urbaines" et "l'espace urbain" sous quatre perspectives : "percevoir les phénomènes spatiotemporels des activités dans l'espace, reconnaître les modèles spatiotemporels des activités, découvrir les facteurs spatiaux influençant les activités, et explorer les mécanismes d'interaction entre l'espace et les activités" [6]. Ces quatre aspects de la technologie de planification des grandes données spatiotemporelles doivent également être compris à travers les paradigmes basés sur les données et sur la connaissance.

3.2 Recherche Basée sur les Données des Activités et de l'Espace

"Percevoir les phénomènes spatiotemporels des activités dans l'espace" consiste à utiliser les grandes données spatiotemporelles pour décrire de manière quantitative les caractéristiques spatiotemporelles des activités urbaines, sans examiner les facteurs et mécanismes sous-jacents influençant ces phénomènes. Dans ce type de technologie, les grandes données spatiotemporelles sont utilisées comme une technologie de perception des caractéristiques spatiotemporelles des activités urbaines. Par exemple, le projet *Mobile Landscapes* a utilisé les données de communication mobile pour mesurer les variations spatiotemporelles de l'intensité

des activités urbaines [28]. "Reconnaître les modèles spatiotemporels des activités dans l'espace" consiste à utiliser les grandes données spatiotemporelles pour résumer les modèles et les lois spatiotemporels des activités. Par exemple, les grandes données spatiotemporelles peuvent être utilisées pour analyser les habitudes de déplacement des différents groupes démographiques [29]. Cette approche explore les modèles et les lois des activités en partant soit du temps, soit de l'espace, mais ne s'intéresse pas aux mécanismes d'interaction entre l'espace et les activités. Ces deux types de recherche sur les grandes données spatiotemporelles relèvent d'une approche basée sur les données.

"Découvrir les facteurs spatiaux influençant les activités" consiste à utiliser les grandes données spatiotemporelles pour identifier les facteurs spatiaux qui influencent les activités urbaines. Par exemple, l'utilisation de données spatiotemporelles multi-sources permet d'inférer les fonctions urbaines à partir des caractéristiques spatiotemporelles des activités urbaines [30]. Cette technologie interprète les informations fonctionnelles urbaines à partir des données. "Explorer les mécanismes d'interaction entre l'espace et les activités" consiste à utiliser les grandes données spatiotemporelles pour explorer les caractéristiques de l'interaction entre l'espace urbain et les activités, afin de comprendre les mécanismes sous-jacents. Par exemple, l'utilisation des grandes données spatiotemporelles permet de mesurer le rayon de service spatial des centres commerciaux urbains selon leur fonction et de valider la théorie des lieux centraux dans la planification des systèmes de centres commerciaux [31]. Cette approche interprète les informations sur les activités urbaines et l'espace urbain à partir des données afin de valider les connaissances disciplinaires existantes. Ces deux types de technologies basées sur les grandes données spatiotemporelles relèvent également d'une approche basée sur les données.

Ainsi, la technologie de planification des grandes données spatiotemporelles suit toujours un paradigme basé sur les données, extrayant des informations des données, découvrant de nouveaux phénomènes et validant les connaissances existantes à partir des informations. Depuis sa création, la technologie de planification des grandes données spatiotemporelles a principalement servi à des fins analytiques, en répondant efficacement à l'analyse de l'espace et des activités. Elle n'est pas encore adaptée à des fins de simulation et de prise de décision (Tableau 2). Les grandes données spatiotemporelles évoluent d'un diagnostic de l'espace urbain vers une prévision de l'espace urbain, soutenant ainsi les décisions de planification. C'est l'une des avancées majeures des technologies de planification des grandes données spatiotemporelles.

Tableau 2 : Paradigmes Technologiques et Usages de la Technologie de Planification des Grandes Données Spatiotemporelles

	Phénomènes spatio-temporels actifs dans l'espace perçu	Règles spatio-temporelles actives dans l'espace cognitif	Découverte des facteurs spatiaux influençant les activités	Exploration des mécanismes d'interaction entre l'espace et les activités
Paradigme technologique	Approche pilotée par les données	Approche pilotée par les données	Approche pilotée par les données	Approche pilotée par les données
Utilisation	Analyse (analyse des phénomènes)	Analyse (extraction de connaissances)	Analyse (interprétation des phénomènes)	Analyse (interprétation des phénomènes)

4. Technologie de Planification Basée sur l'Intelligence Artificielle : Connaissance et Données

4.1 Technologie des Systèmes Experts Basée sur les Connaissances

L'intelligence artificielle est une technologie numérique ancienne. La première vague de l'intelligence artificielle a été celle des systèmes experts (SE), également appelés systèmes basés sur les connaissances (KBS). Vers 1980, de nombreux domaines ont exploré l'application des systèmes experts, y compris la planification urbaine. Les premières technologies de planification basées sur l'intelligence artificielle ont émergé dans les années 1980, avec la publication d'articles [32], de monographies [33], ainsi que l'apparition de plusieurs systèmes, tels que les systèmes experts pour le zonage [34] ou pour la sélection des sites [35]. Dès la fin des années 1980, le milieu universitaire chinois explorait déjà les systèmes experts pour la planification urbaine. Par exemple, l'article de Chen Bingzhao et al. [36], publié en 1989, sur un système expert de gestion de la planification et de la construction, a été le premier article chinois sur l'intelligence artificielle dans le domaine de la planification urbaine. Cette exploration était presque synchronisée avec celle au niveau international.

Les systèmes experts sont des technologies destinées à aider à la prise de décision dans le cadre d'objectifs de planification. Leur caractéristique principale est d'extraire les connaissances des experts, de créer une base de connaissances, de formaliser ces connaissances en règles explicites, puis de permettre à la machine de prendre des décisions en fonction de ces règles. Les systèmes experts relèvent d'un paradigme technique typique basé sur les connaissances, dont le cœur consiste à exprimer les connaissances de la discipline de la planification sous forme de règles claires et exploitables par la machine, souvent dans un format "si-alors" ("if-then"). Ces règles forment ce que l'on appelle des "connaissances en boîte blanche" dans la base de connaissances. Le système prend ensuite des décisions sur la base de ces règles "if-then".

Cependant, les technologies de planification basées sur les systèmes experts ont rencontré de nombreuses difficultés [37]. À partir des années 1990, le consensus académique a identifié deux principaux obstacles jugés difficiles à surmonter [33,38]. Le premier défi est l'extraction des connaissances : comment résumer les connaissances en planification sous une forme compréhensible et exploitable. La difficulté d'exprimer et d'extraire les connaissances en planification est le principal obstacle au développement des systèmes experts en planification urbaine, et cette difficulté est intrinsèque à la nature même des connaissances en planification. Le deuxième défi est l'expression des connaissances, c'est-à-dire leur formalisation en règles explicites. Or, toutes les connaissances en urbanisme ne peuvent pas être exprimées sous forme de règles "if-then". De nombreuses évaluations restent floues ou incertaines. La difficulté d'extraire et d'exprimer les connaissances en planification sous une forme claire a entraîné un ralentissement, voire un arrêt, des explorations dans ce domaine à partir des années 1990.

4.2 Technologie d'Apprentissage Automatique Basée sur les Données

Depuis les années 2010, l'apprentissage automatique a connu un essor, marquant une nouvelle vague de progrès en intelligence artificielle. À partir de la fin des années 2010, l'apprentissage automatique a également pénétré le domaine de la planification urbaine, où il est devenu la technologie dominante dans ce domaine [8]. Contrairement aux systèmes experts, l'apprentissage automatique n'exige plus d'extraction des connaissances. Il apprend à partir de grandes quantités de "données" empiriques, permettant à la machine d'accumuler des connaissances par elle-même et d'utiliser ces connaissances pour prendre des décisions et

résoudre des problèmes. L'apprentissage automatique contourne ainsi les difficultés liées à la nature floue et imprécise des connaissances en planification, ainsi qu'aux défis de leur extraction et formalisation. Cependant, l'apprentissage automatique repose sur les données pour son "entraînement". L'avènement des mégadonnées a précisément résolu la question de l'accès aux données, expliquant pourquoi l'intelligence artificielle basée sur l'apprentissage automatique a prospéré à l'ère des mégadonnées. Les technologies de planification basées sur l'apprentissage automatique relèvent donc d'un paradigme technique basé sur les données.

Un exemple courant d'application est l'utilisation de l'apprentissage automatique à partir d'images de paysages urbains pour évaluer la qualité de l'environnement bâti des rues [39]. L'évaluation de la qualité de l'environnement bâti est une technologie de planification entièrement basée sur les données, utilisant des ensembles d'images pour l'entraînement et permettant des évaluations intelligentes. Par ailleurs, des méthodes telles que l'apprentissage automatique sont également explorées pour générer des projets de planification [40-41]. Par exemple, après avoir appris les réseaux routiers urbains, il est possible de générer automatiquement des réseaux routiers intégrés à la texture des quartiers historiques, ce qui relève de la prise de décision en matière de conception [15]. Il convient de noter que cette dernière application appartient encore au domaine décisionnel, alors que la première relève principalement de l'analyse.

En 2023, la génération de contenu par intelligence artificielle (AIGC) a émergé de manière spectaculaire. L'AIGC implique des technologies telles que l'apprentissage profond et le traitement du langage naturel, et peut être considérée comme une application pratique de l'apprentissage automatique. En formant davantage des modèles généraux pour des tâches spécifiques en planification, on pourrait produire des rapports spécialisés, des dessins et d'autres contenus. Avec des modèles spécialisés capables de comprendre les besoins spécifiques des tâches de planification, il devient possible de générer automatiquement du texte, des images et d'autres contenus variés. Cela représente un avenir prometteur pour les technologies de planification basées sur l'intelligence artificielle.

4.3 Reconnaître les Technologies de Planification Basées sur l'Intelligence Artificielle selon les Dimensions "Données et Connaissances"

Les technologies de planification basées sur l'intelligence artificielle peuvent être examinées sous les dimensions des "données et connaissances". Les connaissances ont toujours été un mot-clé pour ces technologies. Les systèmes experts des premières années étaient "basés sur les connaissances" et reposaient sur des "connaissances en boîte blanche". Cependant, l'acquisition de connaissances en planification était leur principal obstacle. Aujourd'hui, les technologies de planification basées sur l'apprentissage automatique permettent aux machines d'apprendre elles-mêmes à partir des données pour construire des modèles de connaissances. Ces modèles, cependant, relèvent des "connaissances en boîte noire", car même les créateurs des algorithmes ne peuvent expliquer précisément pourquoi la machine prend certaines décisions : tout provient de l'entraînement des données. Ainsi, même les technologies basées sur les données fonctionnent autour des connaissances, qu'il s'agisse de "connaissances en boîte blanche" ou "en boîte noire".

En résumant l'évolution des technologies de planification basées sur l'intelligence artificielle, on peut voir que ces technologies ont commencé par un paradigme basé sur les connaissances, et

que le développement de l'apprentissage automatique a introduit un paradigme basé sur les données. Qu'il s'agisse de paradigmes basés sur les connaissances ou sur les données, les technologies actuelles d'intelligence artificielle dans la planification sont principalement utilisées à des fins d'analyse et peinent encore à répondre aux besoins de prise de décision (Tableau 3). Les caractéristiques intrinsèques de la discipline de la planification rendent difficile l'utilisation exclusive de paradigmes basés sur les connaissances ou sur les données. En effet, les décisions en planification ne peuvent être fondées sur des "connaissances en boîte noire".

Tableau 3 : Paradigmes et Usages des Technologies de Planification Basées sur l'Intelligence Artificielle

	专家系统ES/KBS	机器学习ML
技术范式	知识驱动	数据驱动
用途	决策	分析、决策

Peng et al. [42] ont proposé une vision en quatre phases concernant la relation entre les urbanistes et l'intelligence artificielle (IA). Ces phases sont : Phase 1 - IA assistée (AI-assisted), Phase 2 - IA augmentée (AI-augmented), Phase 3 - IA automatisée (AI-automated), Phase 4 - IA autonomisée (AI-automatized). L'exemple mentionné précédemment concernant la génération automatique du réseau routier urbain relève de la phase 3, où l'objectif de planification est défini par l'homme et la solution est fournie par l'IA. Le point central des quatre phases de l'IA en planification urbaine est que, quel que soit le stade, il ne faut jamais exclure l'humain du processus de planification, car la planification reste une activité décisionnelle centrée sur l'homme. En considérant les technologies de planification basées sur l'IA à travers les dimensions des « données et connaissances », on peut mieux comprendre ce point central, car l'activité décisionnelle centrée sur l'humain nécessite un soutien par des « connaissances en boîte blanche », et non par des « connaissances en boîte noire » générées par l'apprentissage automatique.

5. "Des données aux connaissances" : Perspectives et défis des technologies de planification numérique

5.1 Paradigmes basés sur les connaissances et sur les données

Le paradigme technologique basé sur les connaissances repose sur l'utilisation des connaissances de la discipline de la planification pour réaliser des analyses, des simulations et des prises de décision. Il nécessite des connaissances préexistantes en matière de planification comme base. Par exemple, dans les modèles urbains à grande échelle, les connaissances de la discipline de la planification sont représentées sous forme de formules mathématiques dans les modèles ; dans les systèmes experts, elles sont exprimées sous forme de règles. Dans le paradigme technologique basé sur les connaissances, les données restent indispensables et sont utilisées conformément aux connaissances disciplinaires pour accomplir les tâches d'analyse, de simulation et de prise de décision.

Le paradigme technologique basé sur les données repose sur l'utilisation des données pour réaliser des analyses, des simulations et des prises de décision, sans nécessiter de connaissances préalables issues de la discipline de la planification. Ce paradigme peut fonctionner soit en extrayant directement à partir des données des caractéristiques des effets de la planification, des facteurs d'influence et des mécanismes d'action (comme dans le cas des technologies de planification utilisant de grandes données spatiotemporelles), soit en entraînant des modèles sur

des ensembles de données, afin d'utiliser ces modèles pour des tâches d'analyse, de simulation et de prise de décision (comme dans le cas des technologies de planification basées sur l'apprentissage automatique).

Le paradigme basé sur les connaissances trouve son origine dans le système de connaissances de la discipline de la planification et constitue un paradigme intrinsèque à cette discipline. En revanche, le paradigme basé sur les données résulte de l'évolution des technologies numériques. Les technologies de planification basées sur les données n'ont émergé qu'après l'intégration des technologies numériques dans les technologies de planification. L'intégration des technologies numériques a grandement favorisé le développement des technologies de planification basées sur les données, en résolvant de nombreux problèmes qui avaient longtemps entravé ces technologies. En examinant l'évolution de trois types typiques de technologies de planification depuis les années 1990, on constate que le paradigme basé sur les données est devenu dominant dans les technologies de planification numérique actuelles.

5.2 Connaissances : boîte blanche, boîte grise, boîte noire

La définition de la technologie, qui est "l'application des méthodes scientifiques dans la pratique", illustre d'emblée la relation entre les connaissances et les technologies. En retraçant l'évolution des trois types typiques de technologies de planification numérique, on peut les relier par le fil conducteur des connaissances. La plupart des technologies de planification numérique peuvent être classées comme reposant sur des "connaissances en boîte blanche", des "connaissances en boîte grise" ou des "connaissances en boîte noire". Dans les modèles basés sur des règles et les systèmes experts, les connaissances sont en boîte blanche ; dans les modèles urbains à grande échelle, les connaissances sont en boîte grise ; et dans les technologies de planification utilisant des automates cellulaires ou l'apprentissage automatique, les connaissances sont en boîte noire. Voir Fig. 1.

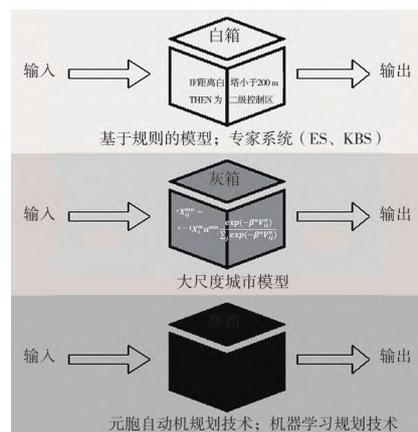


Fig. 1 : Connaissances en boîte blanche, boîte grise et boîte noire dans les technologies de planification numérique

Les "connaissances en boîte blanche" sont certainement dignes de confiance. Dans un cadre idéal, nous souhaiterions que les technologies de planification soient principalement guidées par des connaissances en boîte blanche. Cependant, le plus grand défi pour la discipline de la planification réside dans l'extraction et l'expression des connaissances : comment traduire les connaissances floues, implicites et incertaines en un format clair et structuré, transformant ainsi

ces connaissances en "boîte blanche". L'histoire des systèmes experts a déjà montré que cette difficulté est intrinsèquement liée aux caractéristiques de la discipline de la planification, constituant ainsi le principal goulot d'étranglement du paradigme technologique basé sur les connaissances.

Les technologies de planification basées sur les données, quant à elles, évitent ces défis liés à l'extraction et à l'expression des connaissances, mais introduisent des "connaissances en boîte noire". Les technologies d'intelligence artificielle basées sur l'apprentissage automatique en sont des exemples typiques. Bien que ces technologies produisent souvent des résultats impressionnants, les "connaissances en boîte noire" obtenues sont tout aussi critiquées que les "connaissances en boîte grise" des modèles urbains à grande échelle. Les décisions de planification ne peuvent pas être simplement fondées sur des "connaissances en boîte noire", et encore moins dans le cadre de décisions de grande envergure. C'est pourquoi les paradigmes technologiques basés sur les données conviennent mieux aux usages analytiques et de simulation, mais peinent à répondre aux besoins décisionnels.

5.3 La clé pour les technologies numériques : résoudre le passage "des données aux connaissances"

La nature intrinsèque de la discipline de la planification, centrée sur la prise de décision humaine, détermine les fonctions d'analyse, de simulation et de prise de décision des technologies numériques, ainsi que l'évolution des paradigmes technologiques basés sur les connaissances et les données. Les critiques adressées dans le passé à la planification rationnelle nous ont déjà montré que les décisions guidées par les paradigmes traditionnels basés sur les connaissances posaient des problèmes évidents. Le paradigme basé sur les données a enrichi et amélioré les technologies de planification, mais a également introduit le problème des "connaissances en boîte noire". Cela explique pourquoi ces technologies sont efficaces pour les usages analytiques et de simulation, mais encore inadaptées pour des applications décisionnelles, où les "connaissances en boîte noire" posent de plus grands défis.

L'objectif ultime des technologies de planification reste de soutenir efficacement la prise de décision. Pour y parvenir, l'avenir des technologies de planification numérique repose sur un paradigme technologique "guidé à la fois par les données et les connaissances". Les technologies actuelles sont capables de produire des "connaissances en boîte noire". Si nous parvenons à développer des méthodes permettant d'extraire des "connaissances en boîte blanche" à partir de ces résultats, ou à mieux comprendre ces connaissances issues de l'apprentissage automatique, il deviendrait possible d'utiliser ces "connaissances en boîte blanche" pour des analyses fiables, des simulations et des prises de décision. Le passage "des données aux connaissances" se traduit plus précisément par le passage "des données aux connaissances en boîte blanche". Apprendre à extraire ces "connaissances en boîte blanche" à partir des données est donc essentiel pour guider les analyses, les simulations et les décisions en planification.

La tendance actuelle dans les technologies numériques de planification est clairement orientée vers un paradigme "guidé par les données et les connaissances". Résoudre le passage "des données aux connaissances" implique de découvrir les règles sous-jacentes dans les données, et d'utiliser ces règles pour guider les analyses, simulations et décisions. Aujourd'hui, des technologies comme la génération de contenu par intelligence artificielle (AIGC) et les modèles à grande échelle ont déjà démontré leur valeur et leur potentiel. L'utilisation de modèles généraux

pour surmonter les difficultés liées à l'expression floue ou incertaine des connaissances en planification, et la construction sur cette base de modèles spécialisés pour la planification, pourraient être une voie prometteuse à explorer pour répondre au défi "des données aux connaissances".

6. Conclusion et perspectives

Cet article a défini les concepts et applications des technologies numériques de planification, en les analysant sous l'angle des dimensions "données et connaissances". Deux paradigmes technologiques ont été identifiés, mettant en lumière les avancées et les défis actuels des technologies numériques. Quatre conclusions principales peuvent être tirées :

Cet article clarifie le concept de technologies numériques de planification, en les distinguant des technologies numériques générales. Les technologies numériques de planification englobent des méthodes employées dans chaque phase du processus de planification, y compris l'analyse de la situation actuelle, la modélisation prédictive, la formulation et la sélection de solutions, ainsi que la mise en œuvre, le suivi et l'évaluation des plans. Ces technologies se répartissent en trois grandes fonctions : analyse, simulation et prise de décision.

Les technologies numériques de planification peuvent être classées en deux paradigmes : "guidé par les données" et "guidé par les connaissances". Le paradigme basé sur les connaissances est inhérent à la discipline de la planification, tandis que celui basé sur les données est né de l'intégration des technologies numériques. Ces paradigmes déterminent la nature des applications des technologies numériques de planification.

Les technologies numériques actuelles dédiées à la prise de décision en planification nécessitent encore des avancées significatives. Bien que le paradigme basé sur les données soutienne efficacement les fonctions analytiques et de simulation, les limitations des "connaissances en boîte noire" en restreignent l'application aux décisions. De leur côté, les goulots d'étranglement liés à l'extraction et à l'expression des connaissances limitent également les paradigmes basés sur les connaissances.

L'avenir des technologies numériques de planification repose sur le paradigme "guidé par les données et les connaissances". La clé réside dans la résolution du passage "des données aux connaissances", en utilisant les technologies numériques pour apprendre et extraire des "connaissances en boîte blanche" fiables à partir des données, permettant ainsi des analyses, simulations et décisions fiables.

Notes

① Cette définition est traduite du Cambridge Academic Content Dictionary (Cambridge University Press, 2017), qui explique le terme technology comme suit : « Technology is a particular method by which science is used for practical purposes. »

② Dans les années 1970, les critiques adressées à la planification rationnelle incluaient une dénonciation directe des modèles urbains à grande échelle, qualifiés de boîte noire en termes de connaissances. En comparaison avec les connaissances issues de modèles ultérieurs tels que les automates cellulaires et l'apprentissage automatique, les modèles urbains à grande échelle sont davantage adaptés à la classification comme boîte grise.

References

- [1] WHITE G, ZINK A, CODECÁ L, et al. A digital twin smart city for citizen feedback[J]. *Cities*, 2021, 110: 103064.
- [2] SILVENNOINEN H, KULIGA S, HERTHOGS P. et al. Effects of Gehl's urban design guidelines on walkability: a virtual reality experiment in Singaporean public housing estates[J]. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 2022, 49(9): 2409-2428.
- [3] 王焱, 钮心毅, 宋小冬. 基于城际出行的长三角城市群空间组织特征[J]. *城市规划*, 2021, 45(11): 43-53.
- [4] 杨俊宴, 邵典, 王桥, 等. 一种人工智能精细识别城市用地的方法探索: 基于建筑形态与业态大数据[J]. *城市规划*, 2021, 45(3): 46-56.
- [5] 王建国, 杨俊宴. 应对城市核心价值的数字化城市设计方法研究: 以广州总体城市设计为例[J]. *城市规划学刊*, 2021(4): 10-17.
- [6] 钮心毅, 林诗佳. 城市规划研究中的时空大数据: 技术演进、研究议题与前沿趋势 [J]. *城市规划学刊*, 2022(6): 50-57.
- [7] 吴志强. 人工智能辅助城市规划[J]. *时代建筑*, 2018(1): 6-11.
- [8] KOUTRA S, IOAKIMIDIS C S. Unveiling the potential of machine learning applications in urban planning challenges[J]. *Land*, 2022, 12(1): 83.
- [9] 吴志强, 甘惟, 刘朝晖, 等. AI 城市: 理论与模型架构[J]. *城市规划学刊*, 2022(5): 17-23.
- [10] 麦克哈格. 设计结合自然[M]. 芮经纬, 译. 天津: 天津大学出版社, 2020.
- [11] CARVER S J. Integrating multi-criteria evaluation with geographical information systems[J]. *International Journal of Geo-graphical Information System*, 1991, 5(3):321-339.
- [12] MALCZEWSKI J. GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview[J]. *Progress in Planning*, 2004, 62(1): 3-65.
- [13] KONTOKOSTA C E, FREEMAN L, LAI Y. Up-and-coming or down-and- out? social media popularity as an indicator of neighborhood change[J]. *Journal of Planning Education and Research*, 2021: 0739456X21998445.
- [14] KIKUCHI H, EMBERGER G, ISHIDAH. et al. Dynamic simulations of compact city development to counter future population decline[J]. *Cities*, 2022, 127: 103753.
- [15] 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.
- [16] LEE D B. Retrospective on large-scale urban models[J]. *Journal of the American Planning Association*, 1994, 60(1): 35-40.
- [17] WEGENER M. Operational urban models state of the art[J]. *Journal of the American Planning Association*, 1994, 60(1): 17-29.
- [18] KLOSTERMAN R E. Large-scale urban models retrospect and prospect[J]. *Journal of the*

- American Planning Association, 1994, 60(1): 3-6.
- [19] WADDELL P A. Behavioral simulation model for metropolitan policy analysis and planning: residential location and housing market components of urbansim[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2000, 27(2): 247-263.
- [20] KAKARAPARTHI S K, KOCKELMANK M. Application of urbansim to the Austin, Texas, region: integrated-model forecasts for the year 2030[J]. *Journal of Urban Planning and Development*, 2011, 137(3):238-247.
- [21] LANDIS J D. The California urban futures model: a new generation of metropolitan simulation models[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*,1994, 21(4): 399-420.
- [22] KLOSTERMAN R E. The what if? collaborative planning support system[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*,1999, 26(3): 393-408.
- [23] PETTIT C, BIERMANN S, PELIZAROC. et al. A data-driven approach to exploring future land use and transport scenarios: the online what if? tool[J]. *Journal of Urban Technology*,2020, 27(2): 21-44.
- [24] LANDIS J D. Imagining land use futures: applying the California urban futures model [J], *Journal of the American Planning Association*, 1995, 61(4), 438-457.
- [25] COUCLELIS H. From cellular automata to urban models: new principles for model development and implementation[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*,1997, 24(2): 165-174.
- [26] BENENSON I. Multi-agent simulations of residential dynamics in the city[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 1998, 22(1): 25-42.
- [27] CLARKE K C, GAYDOS L J. Loose-coupling a cellular automaton model and GIS: long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore[J]. *International Journal of Geographical Information Science*,1998, 12(7): 699-714.
- [28] RATTI C, FRENCHMAN D, PULSELLI R M, et al. Mobile landscapes: using location data from cell phones for urban analysis[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2006, 33(5): 727-748.
- [29] BWAMBALE A, CHOUDHURY C F, HESS S. Modelling trip generation using mobile phone data: a latent demographics approach[J]. *Journal of Transport Geography*,2019, 76: 276-286.
- [30] ZHANG Y T, LI Q Q, TU W, et al. Functional urban land use recognition integrating multi-source geospatial data and crosscorrelations[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2019, 78: 101374.
- [31] VAN MEETEREN M, POORTHUIS A. Christaller and “big data”: recalibrating central place theory via the geoweb[J]. *Urban Geography*, 2018,39(1):122-148.
- [32] ORTOLANO L, PERMAN C D. A planner's introduction to expert systems[J]. *Journal of the American Planning Association*, 1987, 53(1): 98-103.
- [33] KIM T J, WIGGINS L L, Wright J R. Expert systems: applications to urban planning [M]. New York, NY: Springer New York, 1990.
- [34] DAVIS J R, GRANT I W. ADAPT: A knowledge-based decision support system for producing zoning schemes[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*,1987, 14(1):53-66.
- [35] FINDIKAKI I. SISES: an expert system for site selection[M]//Expert systems: applications to urban planning. New York, NY: Springer New York, 1990.
- [36] 陈秉钊, 潘志伟, 宋小冬, 等. 城镇建设项目规划管理智能辅助决策系统[J]. *计算结构力学*

及其应用, 1989, 6(2): 1-10.

[37] HAN S Y, KIM T J. Can expert systems help with planning? [J]. Journal of the American Planning Association, 1989, 55(3): 296-308.

[38] RUBENSTEIN-MONTANO B. A survey of knowledge-based information systems for urban planning: moving towards knowledge management[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2000, 24(3): 155-172.

[39] 叶宇, 张昭希, 张啸虎, 等. 人本尺度的街道空间品质测度: 结合街景数据和新分析技术的大规模、高精度评价框架[J]. 国际城市规划, 2019, 34(1): 18-27.

[40] 杨俊宴, 朱晓. 人工智能城市设计在街区尺度的逐级交互式设计模式探索[J]. 国际城市规划, 2021, 36(2): 7-15.

[41] 甘惟, 吴志强, 王元楷, 等. AIGC 辅助城市设计的理论模型建构[J]. 城市规划学刊, 2023(2): 12-18.

[42] PENG Z R, LU K F, LIU Y. et al. The pathway of urban planning AI: from planning support to plan-making[J]. Journal of Planning Education and Research, 2023: 0739456X231180568.

Références

[1] WHITE G, ZINK A, CODECÁ L, et al. Un jumeau numérique pour une ville intelligente permettant le retour des citoyens [J]. *Cities*, 2021, 110: 103064.

[2] SILVENNOINEN H, KULIGA S, HERTHOGS P, et al. Effets des lignes directrices de conception urbaine de Gehl sur la praticabilité : une expérience en réalité virtuelle dans les domaines de logements sociaux singapouriens [J]. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 2022, 49(9): 2409-2428.

[3] 王珪, 钮心毅, 宋小冬. Caractéristiques de l'organisation spatiale de l'agglomération urbaine du delta du Yangtsé basée sur les déplacements interurbains [J]. *城市规划 (Urban Planning)*, 2021, 45(11): 43-53.

[4] 杨俊宴, 邵典, 王桥, 等. Exploration d'une méthode d'identification fine des utilisations urbaines à l'aide de l'intelligence artificielle : basée sur les formes architecturales et les données massives des activités [J]. *城市规划 (Urban Planning)*, 2021, 45(3): 46-56.

[5] 王建国, 杨俊宴. Étude des méthodes de conception urbaine numérique répondant aux valeurs centrales de la ville : le cas de la conception urbaine globale de Guangzhou [J]. *城市规划学刊 (Urban Planning Forum)*, 2021(4): 10-17.

- [6] 钮心毅, 林诗佳. Les données spatio-temporelles massives dans la recherche en urbanisme : évolution technologique, sujets de recherche et tendances à la pointe [J]. *城市规划学刊 (Urban Planning Forum)*, 2022(6): 50-57.
- [7] 吴志强. Planification urbaine assistée par intelligence artificielle [J]. *时代建筑 (Architecture of the Times)*, 2018(1): 6-11.
- [8] KOUTRA S, IOAKIMIDIS C S. Dévoiler le potentiel des applications d'apprentissage automatique face aux défis de la planification urbaine [J]. *Land*, 2022, 12(1): 83.
- [9] 吴志强, 甘惟, 刘朝晖, 等. AI et villes : théories et modèles d'architecture [J]. *城市规划学刊 (Urban Planning Forum)*, 2022(5): 17-23.
- [10] 麦克哈格. *Design with Nature* [M]. Traduit par 芮经纬. Tianjin : Tianjin University Press, 2020.
- [11] CARVER S J. Intégration de l'évaluation multicritères avec les systèmes d'information géographique [J]. *International Journal of Geographical Information System*, 1991, 5(3): 321-339.
- [12] MALCZEWSKI J. Analyse de l'adéquation de l'utilisation des terres basée sur les SIG : une vue d'ensemble critique [J]. *Progress in Planning*, 2004, 62(1): 3-65.
- [13] KONTOKOSTA C E, FREEMAN L, LAI Y. En pleine ascension ou en déclin ? La popularité sur les réseaux sociaux comme indicateur des changements de quartier [J]. *Journal of Planning Education and Research*, 2021: 0739456X21998445.
- [14] KIKUCHI H, EMBERGER G, ISHIDAH. et al. Simulations dynamiques du développement des villes compactes pour contrer le déclin démographique futur [J]. *Cities*, 2022, 127: 103753.
- [15] FANG Z, JIN Y, YANG T. Intégration de l'intelligence de planification dans l'apprentissage profond : un outil de soutien pour la conception de réseaux de rues [J]. *Journal of Urban Technology*, 2022, 29(2): 99-114.
- [16] LEE D B. Retour sur les modèles urbains à grande échelle [J]. *Journal of the American Planning Association*, 1994, 60(1): 35-40.
- [17] WEGENER M. Modèles urbains opérationnels : état de l'art [J]. *Journal of the American Planning Association*, 1994, 60(1): 17-29.
- [18] KLOSTERMAN R E. Les modèles urbains à grande échelle : rétrospective et perspectives [J]. *Journal of the American Planning Association*, 1994, 60(1): 3-6.
- [19] WADDELL P A. Modèle de simulation comportementale pour l'analyse des politiques métropolitaines et la planification : composantes de localisation résidentielle et de marché du logement d'Urbansim [J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2000, 27(2): 247-263.
- [20] KAKARAPARTHI S K, KOCKELMANK M. Application d'Urbansim à la région d'Austin, Texas : prévisions du modèle intégré pour l'année 2030 [J]. *Journal of Urban Planning and Development*, 2011, 137(3): 238-247.
- [21] LANDIS J D. Le modèle d'avenir urbain californien : une nouvelle génération de modèles de simulation métropolitaine [J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1994, 21(4):

399-420.

- [22] KLOSTERMAN R E. Le système de soutien à la planification collaborative « Et si ? » [J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1999, 26(3): 393-408.
- [23] PETTIT C, BIERMANN S, PELIZAROC, et al. Une approche axée sur les données pour explorer les scénarios futurs d'utilisation des sols et de transport : l'outil en ligne « Et si ? » [J]. *Journal of Urban Technology*, 2020, 27(2): 21-44.
- [24] LANDIS J D. Imaginer les futurs de l'utilisation des sols : application du modèle californien d'avenir urbain [J]. *Journal of the American Planning Association*, 1995, 61(4): 438-457.
- [25] COUCLELIS H. Des automates cellulaires aux modèles urbains : nouveaux principes pour le développement et la mise en œuvre des modèles [J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1997, 24(2): 165-174.
- [26] BENENSON I. Simulations multi-agents des dynamiques résidentielles dans la ville [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 1998, 22(1): 25-42.
- [27] CLARKE K C, GAYDOS L J. Couplage lâche d'un modèle d'automates cellulaires et des SIG : prédiction à long terme de la croissance urbaine pour San Francisco et Washington/Baltimore [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 1998, 12(7): 699-714.
- [28] RATTI C, FRENCHMAN D, PULSELLI R M, et al. Paysages mobiles : utilisation des données de localisation des téléphones portables pour l'analyse urbaine [J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2006, 33(5): 727-748.
- [29] BWAMBALE A, CHOUDHURY C F, HESS S. Modélisation de la génération de déplacements à l'aide des données de téléphones mobiles : une approche par démographie latente [J]. *Journal of Transport Geography*, 2019, 76: 276-286.
- [30] ZHANG Y T, LI Q Q, TU W, et al. Reconnaissance fonctionnelle de l'utilisation des terres urbaines intégrant des données géospatiales multi-sources et des corrélations croisées [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2019, 78: 101374.
- [31] VAN MEETEREN M, POORTHUIS A. Christaller et les « big data » : recalibrer la théorie des lieux centraux via le géoweb [J]. *Urban Geography*, 2018, 39(1): 122-148.
- [32] ORTOLANO L, PERMAN C D. Introduction des planificateurs aux systèmes experts [J]. *Journal of the American Planning Association*, 1987, 53(1): 98-103.
- [33] KIM T J, WIGGINS L L, Wright J R. *Expert systems: applications to urban planning* [M]. New York, NY : Springer New York, 1990.
- [34] DAVIS J R, GRANT I W. ADAPT : un système d'aide à la décision basé sur la connaissance pour produire des schémas de zonage [J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1987, 14(1): 53-66.
- [35] FINDIKAKI I. SISES : un système expert pour la sélection de sites [M] // Expert systems : applications to urban planning. New York, NY : Springer New York, 1990.
- [36] 陈秉钊, 潘志伟, 宋小冬, 等. Système de soutien intelligent pour la gestion de la planification des projets de construction urbaine [J]. *计算结构力学及其应用 (Computational Structural Mechanics and Applications)*, 1989, 6(2): 1-10.
- [37] HAN S Y, KIM T J. Les systèmes experts peuvent-ils aider à la planification ? [J]. *Journal of the American Planning Association*, 1989, 55(3): 296-308.
- [38] RUBENSTEIN-MONTANO B. Une enquête sur les systèmes d'information basés sur la

connaissance pour la planification urbaine : vers la gestion des connaissances [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2000, 24(3): 155-172.

[39] 叶宇, 张昭希, 张啸虎, 等. Mesure de la qualité des espaces de rue à l'échelle humaine : cadre d'évaluation massif et précis combinant données de rue et nouvelles techniques d'analyse [J]. *国际城市规划 (Urban Planning International)*, 2019, 34(1): 18-27.

[40] 杨俊宴, 朱骁. Exploration du modèle de conception interactive progressive pour la conception urbaine à l'échelle du quartier assistée par intelligence artificielle [J]. *国际城市规划 (Urban Planning International)*, 2021, 36(2): 7-15.

[41] 甘惟, 吴志强, 王元楷, 等. Construction d'un modèle théorique d'AIGC pour la conception urbaine [J]. *城市规划学刊 (Urban Planning Forum)*, 2023(2): 12-18.

[42] PENG Z R, LU K F, LIU Y, et al. Le chemin de l'IA en urbanisme : du soutien à la planification à l'élaboration des plans [J]. *Journal of Planning Education and Research*, 2023: 0739456X231180568.