

Du couplage statique à l'interaction dynamique : une méthode intelligente de conception urbaine à l'échelle mésoscopique

HUANG Yuyue, YANG Junyan, SUN Haocheng, YANG Qingxin, CUI Ao

Résumé. En tant qu'articulation essentielle entre l'échelle urbaine macroscopique et l'échelle microscopique de l'îlot, la conception urbaine à l'échelle mésoscopique assume une double fonction : coordonner l'ordre fonctionnel bidimensionnel et l'ordre morphologique tridimensionnel. Or, face à l'évolution rapide des besoins urbains, les méthodes traditionnelles demeurent limitées par un couplage « fonction–morphologie » statique et univoque, ainsi que par une capacité d'ajustement insuffisante. Cette recherche propose, à partir d'un algorithme d'apprentissage par renforcement, une démarche de conception urbaine intelligente structurée en trois modules : contrôle du réseau, génération itérative des variantes et comparaison-optimisation. À partir des caractéristiques spatiales des éléments de couplage entre fonction et morphologie, elle distingue plusieurs modes d'interaction : couplage élevé, concentration nodale, entraînement axial, prédominance fonctionnelle et prédominance morphologique. Ces modes sont ensuite expérimentés sur un secteur témoin. Les résultats montrent que la méthode accroît nettement la diversité des solutions, l'efficacité du processus et l'adaptabilité des projets, ouvrant une voie opérationnelle vers une conception urbaine fondée sur l'interaction dynamique.

Mots-clés : conception urbaine intelligente ; échelle mésoscopique ; interaction dynamique ; organisation fonctionnelle ; morphologie spatiale.

Classification des bibliothèques chinoises : TU984. Code du document : A. DOI : 10.16361/j.upf.202503004.

Numéro d'article : 1000-3363 (2025) 03-0025-09.

* Projet majeur de la Fondation nationale des sciences naturelles de Chine « Prototypes technologiques de bâtiments neutres en carbone dans les environnements urbains à haute densité » (n° 52394224) ; Programme national clé de recherche et développement « Technologies clés de conception urbaine intelligente pour l'optimisation spatiale de l'environnement bâti » (n° 2024YFC3807900).

Le Règlement relatif à la gestion de la conception urbaine définit celle-ci comme un moyen efficace de mettre en œuvre la planification urbaine, d'orienter la conception architecturale et de façonner l'identité des villes [1]. Face à la complexité croissante des besoins économiques, sociaux et écologiques, la conception urbaine vise, par de multiples voies, à « créer des formes spatiales tridimensionnelles dans l'environnement urbain » [2], afin d'optimiser globalement celui-ci [3]. Dans la seconde moitié du processus de nouvelle urbanisation en Chine, elle joue un rôle particulièrement important dans l'amélioration de la qualité spatiale et la réalisation d'un développement durable.

En raison du caractère multiscalaire du système urbain, complexe et fortement intégré, la conception urbaine se décline en contenus et priorités différenciés. À l'échelle mésoscopique, elle porte principalement sur des secteurs urbains relativement autonomes sur le plan fonctionnel et cohérents sur le plan environnemental [4], couvrant plusieurs niveaux, de la ville au quartier, à la rue et au bâtiment [5]. Située entre la conception urbaine générale à l'échelle macroscopique et la conception détaillée de l'îlot à l'échelle microscopique, elle assume une double responsabilité [6] : d'une part, organiser un espace fonctionnel rationnel en traduisant la structure d'ensemble définie à l'échelle supérieure ; d'autre part, coordonner les intensités de développement, les hauteurs bâties et d'autres paramètres morphologiques afin d'orienter la conception à l'échelle des îlots. Cette maîtrise conjointe de la fonction et de la forme fait de l'échelle mésoscopique un maillon décisif pour concrétiser les intentions du projet urbain.

Toutefois, l'évolution continue des besoins sociaux impose une conception plus souple, capable d'assurer une interaction dynamique entre fonctions et formes. Les méthodes actuelles restent pourtant insuffisantes en matière de diversité et d'efficacité. D'une part, elles reposent souvent sur l'expérience subjective et sur un mode de couplage statique et unique [7], ce qui limite leur capacité à répondre à la multiplicité des

interactions entre fonction et morphologie. Les méthodes intelligentes fondées uniquement sur le transfert de styles à partir de cas existants demeurent elles aussi peu adaptables lorsqu'elles sont confrontées à des environnements complexes [8]. D'autre part, chaque nouveau site exige fréquemment de reconstruire la logique de conception sous-jacente [9]. Le processus est long, coûteux en travail et dépourvu de mécanismes efficaces de rétroaction en temps réel [10], ce qui empêche l'ajustement rapide des solutions et limite leur diffusion à grande échelle dans la pratique.

Sur cette base, la présente étude s'appuie sur les caractéristiques de couplage entre fonction et morphologie à l'échelle mésoscopique et mobilise une intelligence artificielle auto-apprenante pour répondre aux difficultés de diversité et d'efficacité. L'objectif est de dépasser la dépendance à l'égard de l'expérience subjective et des immenses bibliothèques de cas, en simulant une interaction dynamique entre les deux systèmes. Des stratégies d'itération et d'optimisation différenciées sont ensuite appliquées selon plusieurs modes spatiaux de couplage, afin d'améliorer encore l'adaptabilité et la pertinence des solutions. L'expérimentation montre que la méthode proposée peut reproduire le processus dans lequel fonctions et formes s'influencent, coopèrent et se confrontent, tout en générant rapidement plusieurs variantes. Elle fournit ainsi une référence utile pour la conception urbaine de demain.

1 Réflexions sur la conception urbaine à l'échelle mésoscopique

1.1 Enjeu central : organisation fonctionnelle bidimensionnelle et conception morphologique tridimensionnelle

En tant qu'« expression visible de la structure profonde et des lois de développement de l'espace urbain » [11], la fonction et la morphologie constituent depuis toujours le cœur de la conception urbaine. D'une part, l'organisation fonctionnelle bidimensionnelle détermine directement les orientations futures du développement, l'efficacité de l'usage du sol et la qualité de vie. À l'échelle mésoscopique, elle traduit le positionnement défini à l'échelle macroscopique et sert de fondement à l'organisation fonctionnelle des bâtiments à l'échelle microscopique. Elle doit donc affiner la répartition des usages au-delà des grandes catégories foncières. En intégrant les fonctions selon une logique de fonctionnalisme rationnel et d'efficacité d'usage, elle permet une planification plus précise et un développement plus intensif du sol.

D'autre part, la morphologie spatiale tridimensionnelle constitue l'expression visible du projet urbain et reflète directement l'identité culturelle et les valeurs esthétiques de la ville. À l'échelle mésoscopique, la conception morphologique prolonge la maîtrise générale de la structure urbaine, organise plus finement les formes des différents îlots et traduit cette organisation en exigences tridimensionnelles applicables à l'échelle inférieure. Elle porte notamment sur la hauteur, la densité bâtie et l'intensité de développement. Elle permet ainsi de corriger à la fois le caractère trop général des contrôles morphologiques macroscopiques et la fragmentation des interventions à l'échelle microscopique.

En définitive, l'enjeu central consiste, à partir des objectifs de la planification supérieure, à coordonner l'organisation fonctionnelle bidimensionnelle et la morphologie tridimensionnelle d'un secteur, puis à orienter la conception des îlots afin d'instaurer un équilibre réciproque entre disposition fonctionnelle et forme spatiale.

1.2 Problème : le désajustement entre fonction et morphologie produit un désordre spatial

La fonction et la morphologie sont les deux composantes fondamentales du système spatial à l'échelle mésoscopique. Elles s'influencent mutuellement et s'imbriquent dans l'espace. Il est généralement admis qu'un couplage dynamique efficace entre les deux permet, sous contrainte de ressources foncières limitées, de mobiliser au maximum le potentiel de chaque système et de favoriser un développement mutuellement renforcé. Il s'agit d'une voie essentielle pour améliorer l'efficacité du fonctionnement urbain et garantir la durabilité [12].

Or, avec l'accélération du développement urbain, les projets à l'échelle mésoscopique sont confrontés à des situations existantes plus complexes et à une multiplication des parties prenantes. L'écart entre des activités fonctionnelles diverses et changeantes et des formes bâties fixes et univoques devient de plus en plus manifeste, notamment lorsque des fonctions peu denses et peu actives coexistent avec des morphologies bâties de forte intensité. Pour les habitants, une mauvaise répartition des espaces de production et de vie accroît les congestions, favorise les îlots de chaleur et la pollution atmosphérique et dégrade la qualité de vie. Pour la gestion urbaine, le désajustement entre fonction et morphologie provoque une inadéquation entre l'offre et la demande spatiales, limite la libération de la vitalité urbaine et entraîne un gaspillage de ressources. Il conduit finalement à un désordre spatial et à un déséquilibre des relations entre population et territoire.

1.3 Difficulté : assurer une interaction dynamique entre fonction et morphologie

Pour les concepteurs, la mise en œuvre d'une interaction dynamique entre fonction et morphologie à l'échelle mésoscopique se heurte à plusieurs difficultés. Premièrement, le mécanisme d'interaction est difficile à décomposer. La ville est un système évolutif : les besoins des populations et les structures sociales changent avec le temps, de sorte que la relation entre fonction et espace fluctue sous l'effet conjoint de facteurs externes — politiques d'urbanisme, réseaux de transport — et internes — conditions naturelles, économie et population (fig. 1). La modification d'une zone fonctionnelle peut transformer l'ensemble de la morphologie, tandis que l'évolution de celle-ci peut, en retour, infléchir l'organisation fonctionnelle. Cette « indivisibilité » et cette « imprévisibilité partielle » [13] compliquent l'analyse et l'anticipation des transformations spatiales.

Deuxièmement, la rétroaction dynamique est tardive. Les décisions et leur mise en œuvre sont soumises à de multiples intérêts et à la complexité de l'environnement bâti. Les concepteurs doivent ajuster et vérifier les variantes à plusieurs reprises en fonction des retours produits à chaque étape. Faute de méthodes et d'outils efficaces, ce processus est lent, ce qui réduit la validité des solutions.

Répondre à cette difficulté exige donc de dépasser les limites des méthodes traditionnelles. Il faut comprendre les mécanismes d'interaction dynamique entre fonction et morphologie et développer une méthode intelligente caractérisée par un processus rapide, un large éventail de contextes d'application et un seuil d'utilisation relativement faible [14], afin de soutenir un développement couplé et évolutif des deux systèmes.

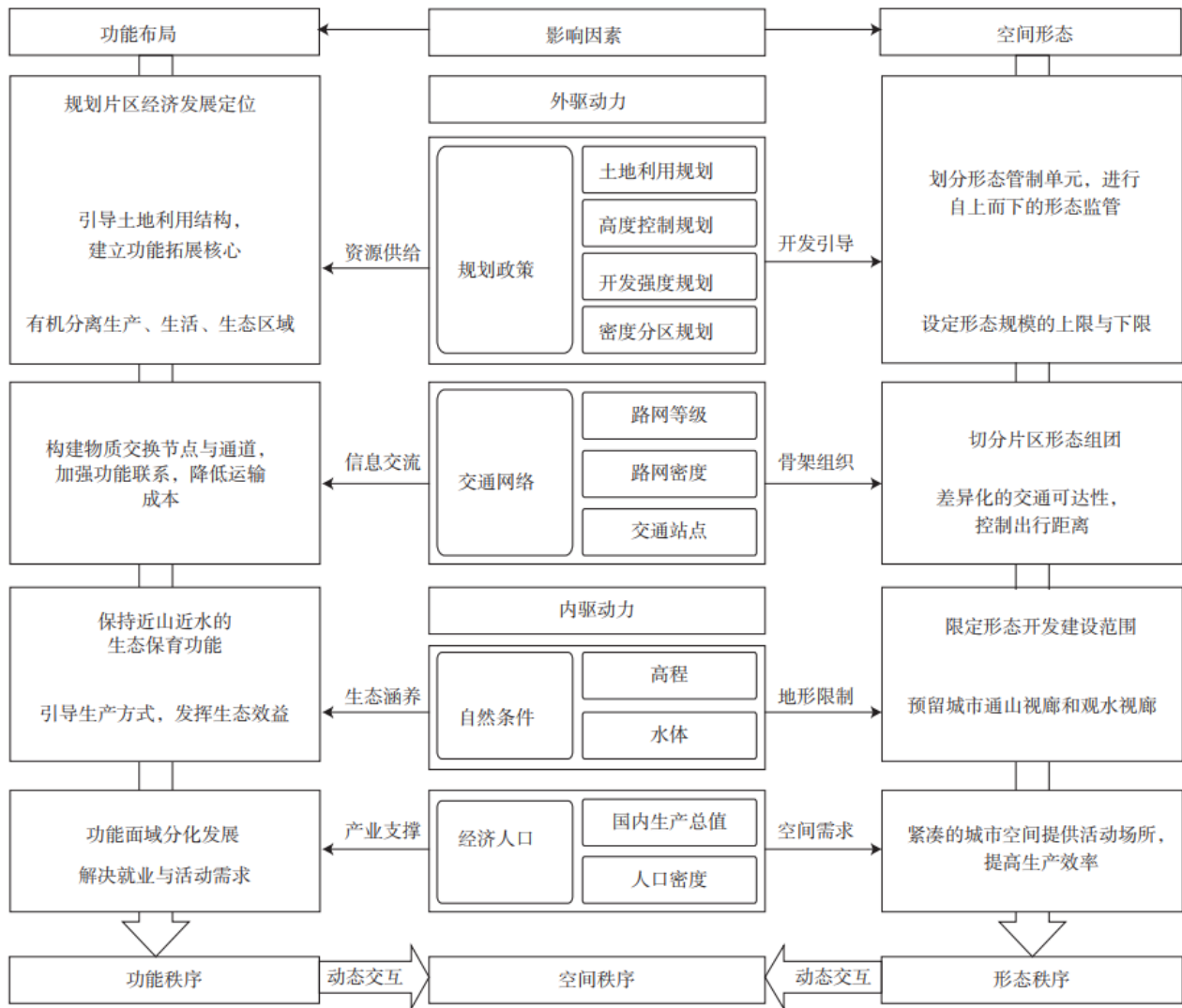


Figure 1. Mécanismes par lesquels de multiples facteurs influencent l'interaction dynamique entre fonction et morphologie

2 Construction d'une démarche de conception urbaine intelligente à l'échelle mésoscopique

2.1 Fondements méthodologiques

2.1.1 Éléments de couplage entre fonction et morphologie

La coordination entre systèmes spatiaux ne signifie ni leur superposition complète ni leur indépendance, mais leur harmonisation structurelle. Selon les théories classiques de la localisation, les « nœuds, réseaux et surfaces » constituent les trois éléments fondamentaux du développement spatial [15]. Les éléments de couplage entre fonction et morphologie peuvent de la même manière être abstraits sous la forme de points, de lignes et de surfaces [16].

Pour le système fonctionnel, les points correspondent aux centres des principales fonctions publiques et aux espaces centraux des activités productives et quotidiennes. Les lignes désignent les corridors reliant les grands centres, généralement constitués de fonctions publiques disposées le long des axes routiers, des cours d'eau ou des espaces verts ; ils forment les corridors économiques du secteur. Les surfaces renvoient aux zones fonctionnelles, par exemple les groupements d'affaires, résidentiels ou administratifs. L'association des noyaux fonctionnels, des corridors économiques et des surfaces de fond constitue la structure fonctionnelle qui oriente le développement à l'échelle mésoscopique.

Dans le système morphologique, les points prennent généralement la forme de grands ensembles d'équipements publics ou de groupes d'immeubles tertiaires de grande hauteur, servant de repères et de

pôles d'orientation [17]. Les lignes sont constituées par des séquences continues de bâtiments hauts ou de constructions de faible densité, qui forment des corridors visuels. Les surfaces correspondent au tissu de base de la morphologie urbaine, rempli par les bâtiments de chaque îlot. L'articulation entre groupes de repères, corridors visuels et tissus bâtis produit une ossature morphologique identifiable à l'échelle mésoscopique.

Les éléments fonctionnels et morphologiques construisent ensemble la structure spatiale globale par un cycle de rétroaction fondé sur le couplage et la symbiose. D'un côté, les fonctions guident la formation de la morphologie. Dans le processus classique de conception, les noyaux fonctionnels et l'orientation des corridors économiques sont d'abord définis en fonction des objectifs de développement et des ressources du site, avant que la morphologie ne soit élaborée. La qualité de celle-ci dépend donc largement de la rationalité de l'organisation fonctionnelle [18], qui lui fournit son cadre interne. De l'autre, la morphologie exerce une rétroaction sur les fonctions. L'espace physique offre le milieu nécessaire à l'incubation des activités et contribue à perfectionner leur répartition. Une morphologie compacte et diversifiée peut attirer davantage d'utilisateurs et renforcer la vitalité du secteur. Reliées par les activités humaines et régulées par le marché, les pouvoirs publics et d'autres acteurs, fonction et morphologie s'ajustent en continu selon les usages de l'espace [19] et finissent par former une structure relativement stable.

2.1.2 Cadre technique fondé sur l'apprentissage par renforcement

L'apprentissage par renforcement^① est un paradigme d'auto-apprentissage piloté par la performance de l'environnement. Contrairement à l'apprentissage supervisé, il ne nécessite pas un entraînement préalable sur de vastes jeux de données : l'agent choisit ses actions successives à partir de signaux de récompense et de l'expérience accumulée. Cette méthode peut s'adapter à de multiples états possibles de l'environnement et prendre des décisions en conséquence, ce qui la rend particulièrement pertinente pour la conception d'espaces urbains dynamiques [20].

En prenant pour fondement théorique l'interaction entre les éléments fonctionnels et morphologiques à l'échelle mésoscopique, chaque îlot est assimilé à un agent spatial. La génération d'un projet urbain devient alors un processus de coopération, d'interaction et de jeu entre plusieurs agents. Un réseau de politique définit les actions fonctionnelles et morphologiques exécutables, tandis qu'un réseau d'évaluation utilise comme fonction de gain le degré de coordination du couplage entre les deux systèmes. Le processus de décision markovien assure l'itération des variantes, complétée par une comparaison et une optimisation homme-machine. La logique générale est organisée en trois modules : contrôle du réseau, itération des solutions et comparaison-optimisation (fig. 2).

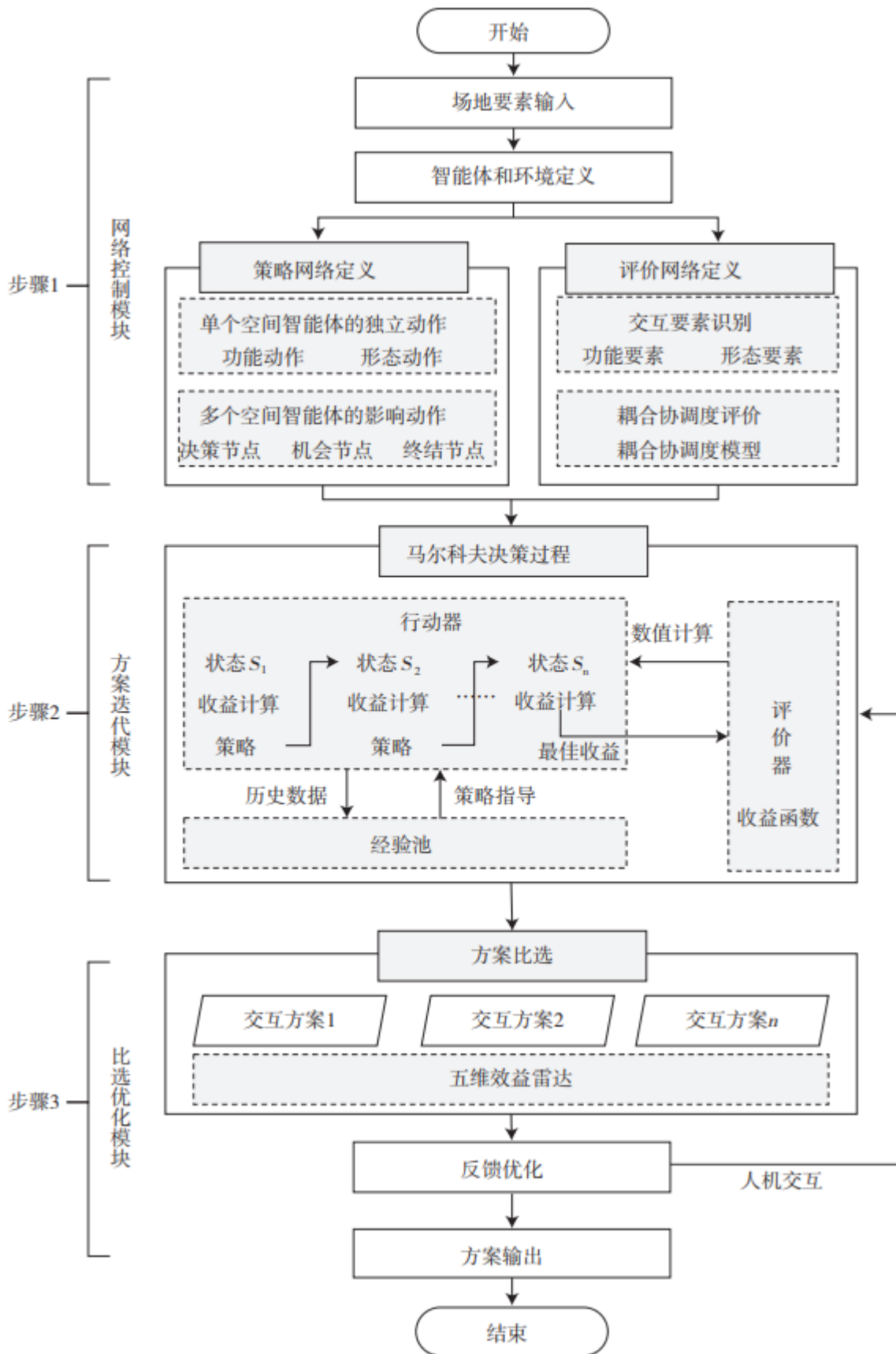


Figure 2. Schéma technique de la conception intelligente de l'interaction fonction–morphologie à l'échelle mésoscopique

2.2 Module de contrôle du réseau

2.2.1 Construction du réseau de politique à partir des actions fonctionnelles et morphologiques

Le réseau de politique définit les actions fonctionnelles et morphologiques de chaque agent-îlot ainsi que les interactions entre plusieurs agents.

(1) Réseau de politique d'un agent spatial individuel

Pour les actions indépendantes d'un îlot, les espaces d'action sont définis par $A = [a_1, a_2, \dots, a_n]^T$ et $B = [b_1, b_2, \dots, b_n]^T$. Sous l'effet de la rétroaction du réseau d'évaluation, l'agent exécute à chaque étape une action fonctionnelle a_t et une action morphologique b_t .

Sur le plan fonctionnel, les nouvelles catégories de terrain couramment utilisées à l'échelle mésoscopique sont les catégories B, A, G et R. Les usages B1 et B2 présentant des différences morphologiques importantes, ils sont traités comme deux actions distinctes, correspondant respectivement aux services orientés vers la vie quotidienne, aux services à la production, aux services d'intérêt public, aux espaces verts et aux fonctions résidentielles.

Sur le plan morphologique, neuf indicateurs répartis en trois dimensions — échelle, caractère emblématique et diversité — sont retenus (tableau 1). Leurs intervalles de génération sont définis selon les prescriptions de la planification supérieure.

Tableau 1. Indicateurs morphologiques de la conception urbaine à l'échelle mésoscopique

空间形态属性	指标名称	计算方式	指标释义
规模性	总体积/m ³	$V_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^n V_i$	V_i 为街坊内第 <i>i</i> 个建筑单体体积
	总基底面积/m ²	$S_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^n S_i$	S_i 为街坊内第 <i>i</i> 个建筑单体的基底面积
	建筑密度	$B = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{S}$	S为街坊面积
	容积率	$P = \frac{V_{\text{sum}}}{S}$	/
	平均高度/m	$H_{\text{avg}} = \frac{V_{\text{sum}}}{S_{\text{sum}}}$	/
标志性	最高高度/m	H_{max}	/
	最大基底面积/m ²	S_{max}	/
多样性	高度错落度	$D_h = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (H_i - H_{\text{avg}})^2}}{n}$	H_i 为街坊内第 <i>i</i> 个建筑单体高度
	基底面积错落度	$D_s = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - S_{\text{avg}})^2}}{n}$	S_{avg} 为街坊内的平均基底面积

(2) Réseau de politique multi-agents

Les îlots ne sont pas des unités complètement indépendantes séparées par le réseau viaire ; ils forment un réseau spatial complexe, structuré à la fois par les effets d'agglomération et par les mécanismes d'équilibre [21]. Dans un certain rayon d'influence, la modification d'une propriété fonctionnelle ou morphologique d'un îlot peut entraîner l'ajustement d'autres îlots. Il est donc nécessaire de définir un espace d'action et un espace d'état pour formaliser les actions d'influence entre agents.

L'espace d'action désigne l'étendue dans laquelle une modification d'un îlot entraîne des changements chez les autres. La recherche utilise l'algorithme des K plus proches voisins et retient les neuf îlots les plus proches de l'îlot cible. L'espace d'état correspond à l'ensemble du secteur : toute action sur un îlot modifie potentiellement l'état global.

Lorsqu'un îlot périphérique adopte une nouvelle action sous l'influence d'un îlot cible, il peut à son tour agir sur ses voisins. Une itération sans limite produirait une infinité d'états environnementaux. Afin de tenir compte des capacités de calcul et de préserver une diversité suffisante, le nombre d'itérations est limité par trois types de nœuds inspirés des arbres de décision : le nœud de décision, qui correspond à l'agent modifiant son action en premier ; le nœud d'opportunité, influencé une première fois par le nœud de décision ; et le nœud terminal, dont l'état est modifié une seconde fois. Les îlots situés au-delà du nœud terminal conservent leur état.

Des règles d'influence fonctionnelle et morphologique sont ensuite définies dans l'espace d'action. L'algorithme CART (classification and regression tree) procède par divisions binaires successives de données continues ou discrètes et sélectionne automatiquement la combinaison présentant le plus faible indice de Gini :

$$Gini(A) = 1 - \sum_{i=1}^C p_i^2$$

où A désigne le nœud, p_i la probabilité d'appartenance à la catégorie i et C le nombre de catégories.

2.2.2 Construction du réseau d'évaluation à partir du degré de couplage « fonction-morphologie »

L'objectif étant de générer des projets dans lesquels fonction et morphologie sont coordonnées, le critère central d'évaluation est leur degré de couplage. Les modèles classiques de coordination, fondés notamment sur le coefficient de couplage et l'indice de coordination, sont couramment utilisés pour évaluer la relation entre deux systèmes [22-23], surtout lorsque ceux-ci peuvent être représentés numériquement.

Les systèmes fonctionnel et morphologique possèdent toutefois une forte dimension spatiale. Un indicateur unique ne peut traduire leurs différences de couplage dans l'espace ; une notation manuelle serait à la fois subjective et trop coûteuse pour traiter de grands volumes d'états. Le réseau d'évaluation proposé adapte donc le modèle de coordination aux caractéristiques spatiales des éléments et comprend quatre étapes : conversion des solutions en niveaux de gris, identification des éléments de couplage, notation des îlots et calcul du degré de coordination.

① **Conversion en niveaux de gris.** Les variantes fonctionnelles et morphologiques sont converties en images en niveaux de gris. Dans le système fonctionnel, les catégories sont hiérarchisées selon leur importance structurelle ($B2 > A > B1 > G > R$). Dans le système morphologique, les valeurs des indicateurs sont réparties en cinq niveaux par la méthode des ruptures naturelles.

② **Identification des éléments de couplage.** Des règles d'identification des points, lignes et surfaces transforment automatiquement les résultats en niveaux de gris. Pour les points, la moyenne de gris des îlots proches de chaque intersection routière est calculée comme potentiel ; les N valeurs les plus élevées sont retenues comme points fonctionnels ou morphologiques. Pour les lignes, sont sélectionnés les îlots situés de part et d'autre des voies principales et secondaires et appartenant aux 50 % supérieurs des valeurs fonctionnelles ou morphologiques ; les N axes regroupant le plus d'unités sont conservés. Pour les surfaces, sont retenus les îlots situés dans les 75 % supérieurs des valeurs de gris du secteur.

③ **Notation des îlots.** Afin de convertir les différences de distribution spatiale en champs numériques, chaque îlot reçoit une note selon son rôle dans la constitution des éléments de couplage. Les points, qui correspondent aux noyaux fonctionnels ou aux groupes de repères, exercent le rayonnement et le pouvoir de signal les plus élevés ; les lignes, qui constituent les corridors économiques ou visuels, occupent une position intermédiaire ; les surfaces de fond ont le pouvoir d'identification le plus faible. Lorsqu'un îlot participe à plusieurs éléments, les notes sont cumulées.

④ **Calcul de la coordination.** Le modèle de coordination calcule, pour un état donné, le degré de couplage de chaque îlot. La coordination globale du secteur correspond à la somme des valeurs obtenues pour l'ensemble des îlots.

2.3 Module d'itération des solutions

Le mode de couplage constitue une représentation de l'état d'interaction [24] et traduit la direction d'évolution de systèmes après leur interaction dynamique. Dans la conception intelligente, différents modes correspondent donc à des trajectoires d'itération distinctes.

L'examen des relations spatiales entre les éléments fonctionnels et morphologiques — en privilégiant les points et les lignes, les surfaces ayant un pouvoir d'identification plus faible — fait apparaître plusieurs situations. Lorsque les deux systèmes sont complets, c'est-à-dire lorsque leurs éléments ponctuels et linéaires peuvent être identifiés, ceux-ci peuvent être fortement superposés, présenter une superposition principalement ponctuelle, principalement linéaire, locale, ou presque inexistante. Lorsque seul l'un des deux systèmes est complet, le mode est soit fonctionnellement dominant, soit morphologiquement dominant. Lorsque les deux systèmes sont incomplets, leur distribution est dispersée.

En s'inspirant des classifications usuelles fondées sur le degré de coordination, un niveau compris entre 80 % et 100 % est considéré comme bien coordonné, tandis qu'un niveau inférieur à 20 % correspond à un développement désaccordé [25-26]. La présente recherche utilise donc les seuils de 80 % et 20 % pour distinguer huit modes : couplage élevé, concentration nodale, entraînement axial, couplage modéré, développement désaccordé, prédominance fonctionnelle, prédominance morphologique et distribution dispersée (tableau 2).

Tableau 2. Huit modes de couplage entre fonction et morphologie

Mode de couplage	Intégrité fonctionnelle	Intégrité morphologique	Couplage des points	Couplage des lignes
Couplage élevé	Complet	Complet	≥ 80 %	≥ 80 %
Concentration nodale	Complet	Complet	≥ 80 %	< 80 %
Entraînement axial	Complet	Complet	< 80 %	≥ 80 %
Couplage modéré	Complet	Complet	20–80 %	20–80 %
Développement désaccordé	Complet	Complet	≤ 20 % ou < 80 %	< 80 % ou ≤ 20 %
Prédominance fonctionnelle	Complet	Incomplet	—	—
Prédominance morphologique	Incomplet	Complet	—	—
Distribution dispersée	Incomplet	Incomplet	—	—

Parmi ces huit modes, les trois configurations faiblement coordonnées — développement désaccordé, distribution dispersée et couplage modéré — sont écartées. Les cinq restantes — couplage élevé, concentration nodale, entraînement axial, prédominance fonctionnelle et prédominance morphologique — expriment des interactions plus rationnelles et représentent des orientations spatiales différentes. Elles offrent aux concepteurs un éventail diversifié de trajectoires d'itération (fig. 3).

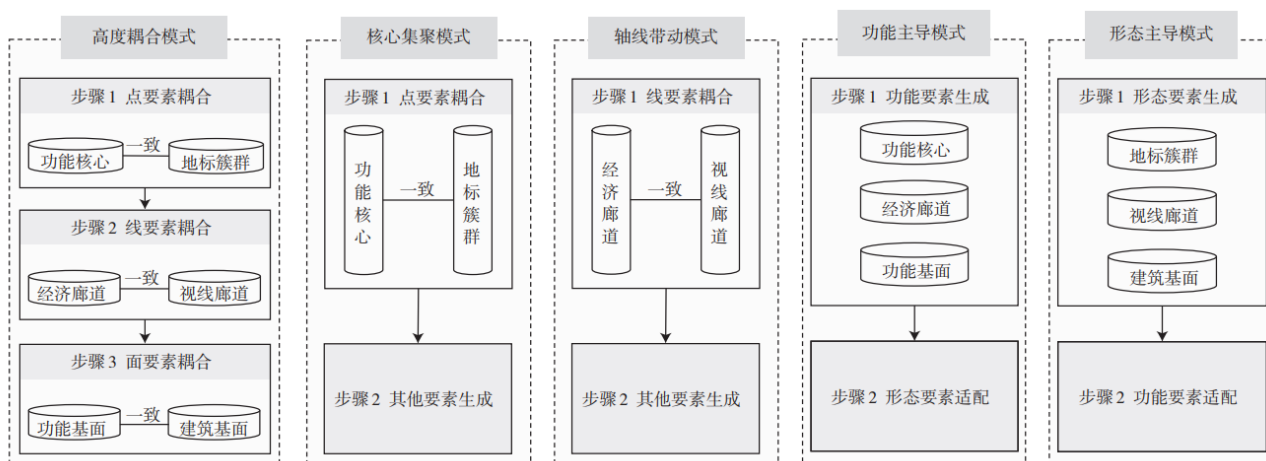


Figure 3. Schéma des étapes de génération guidées par différents modes de couplage

2.4 Module de comparaison et d'optimisation

Certaines exigences de conception étant difficiles à convertir directement en paramètres de contrôle, un module de comparaison et d'optimisation homme-machine est ajouté aux solutions générées automatiquement afin d'obtenir des projets applicables.

Premièrement, un radar d'évaluation en cinq dimensions est construit afin de comparer la valeur globale des solutions : économie, écologie, société, paysage et accessibilité. La performance économique est représentée par les superficies de terrains B1 et B2 et par le volume bâti ; la performance écologique par la part des terrains G et E ; la performance sociale par la proportion des constructions de catégorie A ; la performance paysagère par la visibilité des espaces verts et des plans d'eau, simulée à 360° depuis les îlots ; et l'accessibilité par la distance moyenne minimale entre les unités résidentielles et les équipements publics voisins.

À partir de ces critères, l'ordinateur calcule et étiquette automatiquement les performances multidimensionnelles d'un grand nombre de variantes initiales. Le concepteur sélectionne ensuite, à l'aide du radar, les solutions à approfondir et les optimise par interaction homme-machine en tenant compte des demandes des différentes parties prenantes. Le processus produit enfin un modèle vectoriel et des documents graphiques de conception urbaine à l'échelle mésoscopique.

3 Validation empirique : application de la conception urbaine intelligente à un secteur témoin

3.1 Un cas représentatif de « terrain relativement libre »

L'expérimentation porte sur un secteur de Chuzhou, représentatif de nombreuses franges urbaines encore peu développées, devenues sous l'effet des politiques contemporaines des zones prioritaires pour déconcentrer les fonctions de la vieille ville et étendre la ville nouvelle. Ces territoires comportent peu d'éléments existants à préserver et sont moins contraints par la complexité foncière ou la protection patrimoniale. Ils permettent donc de concrétiser plus largement le schéma spatial du projet et se prêtent à l'expérimentation d'une conception intelligente.

Cette exploration sur un « terrain relativement libre » vise d'abord à établir le processus de base de l'interaction intelligente entre fonction et morphologie. Des expériences seront ensuite menées dans des contextes comportant davantage de contraintes existantes, afin de constituer à terme une méthode mature et applicable aux projets réels.

Le site est principalement occupé par des terres agricoles, forestières et villageoises. Conformément aux orientations publiques supérieures, il doit être converti en terrain de construction urbaine. Avant la conception intelligente, une base numérique est construite afin d'évaluer les ressources existantes et de préserver les cours d'eau, les espaces verts à forte valeur écologique ainsi que les terrains résidentiels et culturels dont les bâtiments présentent une qualité satisfaisante.

Le centre géométrique de chaque îlot sert ensuite de coordonnée pour créer 155 agents spatiaux. Les agents correspondant aux fonctions ou aux caractéristiques morphologiques à conserver reçoivent un codage one-hot [27], de sorte qu'aucune action ne leur soit appliquée durant les itérations (fig. 4).

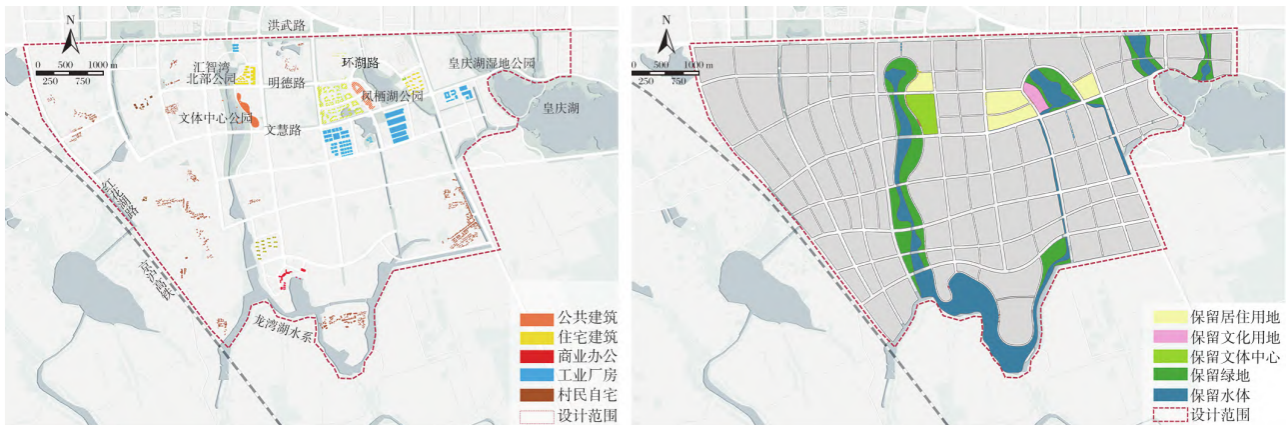


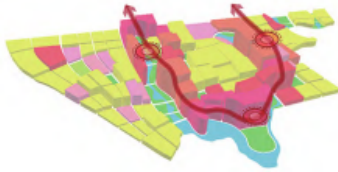
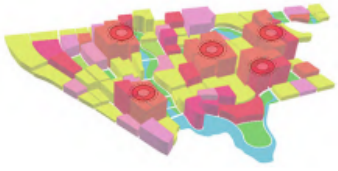
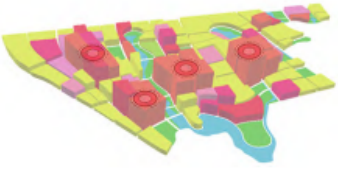
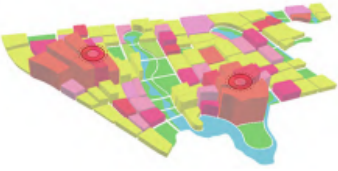
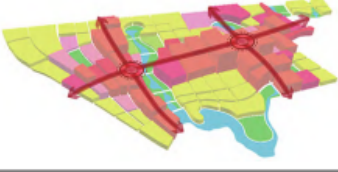
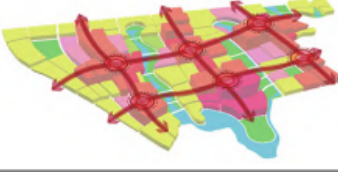
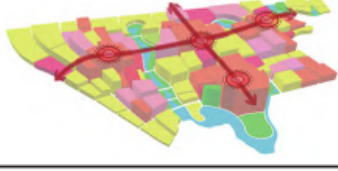
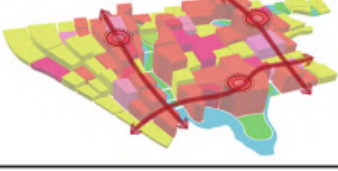
Figure 4. Conditions existantes et socle numérique du secteur témoin

3.2 Résultats de la conception urbaine intelligente fondée sur l'interaction dynamique « fonction–morphologie »

À partir de la démarche proposée, quinze variantes sont automatiquement générées pour les cinq modes de couplage retenus (tableau 3).

Tableau 3. Variantes de conception urbaine intelligente du secteur témoin

Mode de couplage	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Couplage élevé	A-1	A-2	A-3
Concentration nodale	B-1	B-2	B-3
Entraînement axial	C-1	C-2	C-3
Prédominance fonctionnelle	D-1	D-2	D-3
Prédominance morphologique	E-1	E-2	E-3

耦合模式	智能城市设计方案		
高度耦合模式	A-1	A-2	A-3
			
核心集聚模式	B-1	B-2	B-3
			
轴线带动模式	C-1	C-2	C-3
			
功能主导模式	D-1	D-2	D-3
			
形态主导模式	E-1	E-2	E-3
			

3.2.1 Génération des solutions en mode de couplage élevé

L'itération comprend un processus relatif aux éléments ponctuels et un autre relatif aux éléments linéaires. Les cinq intersections routières présentant les moyennes de gris les plus élevées parmi les agents voisins sont sélectionnées comme points couplés, tandis que les trois voies principales et secondaires les mieux classées sont retenues comme lignes couplées.

La superposition spatiale augmente avec le nombre d'itérations. Les points atteignent leur gain optimal après environ 1 200 itérations, et les lignes après un peu plus de 500. Diverses combinaisons aléatoires deux à deux sont alors constituées. Afin d'obtenir une organisation plus systématique, les trois combinaisons présentant la plus faible somme de distances perpendiculaires entre les points et les lignes voisines sont retenues comme variantes A-1, A-2 et A-3.

3.2.2 Génération des solutions en mode de concentration nodale

Dans ce mode, la forte concentration spatiale des facteurs de production forme des nœuds centraux. Les noyaux développés en premier diffusent ensuite les effets du capital, du travail et d'autres ressources vers

les îlots voisins. La disposition des noyaux fonctionnels et des groupes de repères se superpose largement, afin de maximiser les effets d'agglomération.

L'itération des points est proche de celle du mode précédent et se stabilise après plus de 1 200 itérations. Trois variantes présentant un gain élevé et un nombre différent de nœuds sont sélectionnées : B-1, B-2 et B-3. Le nombre de nœuds produit des configurations spatiales très différentes ; plus il augmente, plus l'unité structurelle globale tend à s'affaiblir.

3.2.3 Génération des solutions en mode d'entraînement axial

Le mode axial s'appuie sur le réseau de transport pour disposer des îlots présentant des fonctions plus publiques et des formes plus emblématiques. Il produit une structure en bande dans laquelle les axes entraînent le développement de l'ensemble du secteur.

Après un peu plus de 500 itérations, les éléments linéaires convergent vers des configurations fortement couplées. Les trois variantes présentant la valeur la plus élevée de la fonction de gain sont retenues : C-1, C-2 et C-3. Les résultats montrent que les solutions les plus performantes adoptent généralement une croix ou une variante de celle-ci. Lorsque l'axe traverse la partie centrale du secteur, son effet de rayonnement et d'entraînement est plus marqué.

3.2.4 Génération des solutions en mode de prédominance fonctionnelle

Dans ce mode, la morphologie apparaît comme un contenu d'adaptation à l'organisation fonctionnelle, dont la rationalité joue un rôle décisif. Afin d'exploiter l'incertitude de la génération automatique et de stimuler l'inspiration des concepteurs, aucune règle rigide de zonage fonctionnel n'est imposée au début ; l'algorithme d'apprentissage par renforcement explore librement les combinaisons possibles.

Au cours des premières itérations, les usages sont dispersés et aucun système fonctionnel fortement identifiable ne se forme. Après environ 1 000 itérations, les caractéristiques de l'organisation deviennent progressivement plus nettes et font apparaître des noyaux tertiaires, des centres de services publics et des corridors économiques. Un décideur spatial associe ensuite à ces structures les indicateurs morphologiques correspondants et produit les trois variantes présentant le gain le plus élevé : D-1, D-2 et D-3.

Globalement, lorsque le nombre d'éléments fonctionnels linéaires dépasse trois, les morphologies produites tendent à s'homogénéiser. Elles demeurent bien couplées aux fonctions, mais leur caractère distinctif s'affaiblit.

3.2.5 Génération des solutions en mode de prédominance morphologique

Guidé par le réseau de politique, ce mode génère d'abord une solution morphologique, puis associe intelligemment les fonctions à partir de corrélations issues de l'expérience. Contrairement au relief général modéré et aux élévations localisées des solutions à prédominance fonctionnelle, il produit davantage d'îlots de grande hauteur à forte valeur de repère. L'intervalle des hauteurs s'étend de 0 à 250 m et forme une silhouette plus riche.

Après environ 900 itérations, les fluctuations morphologiques deviennent lisibles : des groupes de repères de grande hauteur et des bandes continues de constructions hautes peuvent être identifiés. Les fonctions sont ensuite attribuées automatiquement, et les variantes E-1, E-2 et E-3, qui présentent les gains les plus élevés, sont produites. Ces solutions se caractérisent par une forte mixité fonctionnelle et ne présentent pas les zonages nettement différenciés observés dans le mode à prédominance fonctionnelle.

À partir de l'ensemble des variantes, un radar d'évaluation en cinq dimensions compare les solutions et les modes de couplage (fig. 5). La variante E-3, relevant de la prédominance morphologique et présentant la meilleure performance globale, est retenue comme solution initiale. Après plusieurs cycles de rétroaction et d'optimisation homme-machine, le projet final s'organise autour d'un réseau hydrographique en forme de « U », qui sert d'ossature spatiale. Des fonctions de service public et des bâtiments repères y sont implantés, tandis que plusieurs branches de développement rayonnent depuis cette structure.

L'étude de cas confirme la faisabilité et la transférabilité de la méthode à l'échelle mésoscopique. Dans des environnements urbains complexes et pluriels, elle peut proposer rapidement des organisations spatiales plus riches et plus rationnelles. Il convient également de souligner que les solutions produites par les différents modes ne sont pas des états statiques et indépendants : elles peuvent se transformer dynamiquement par ajustement des paramètres, ce qui renforce l'adaptabilité et la flexibilité de la conception face à l'évolution des besoins urbains.

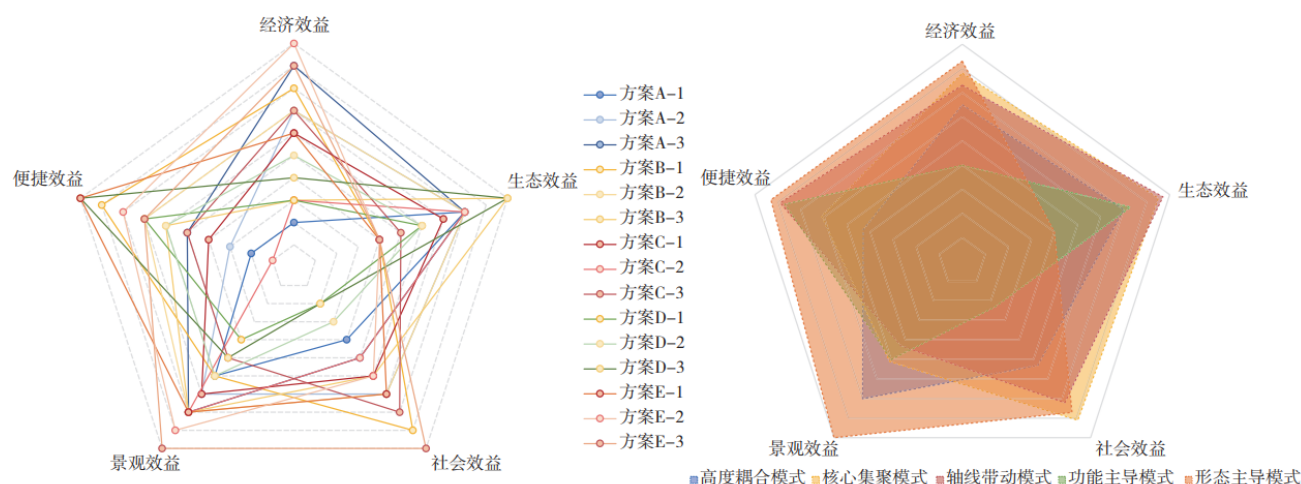


Figure 5. Diagrammes radar d'évaluation des différentes variantes et des modes de couplage

4 Conclusion

À mesure que le système spatial urbain évolue, l'interaction entre fonction et morphologie à l'échelle mésoscopique devient de plus en plus complexe. À partir d'une perspective d'interaction dynamique, cette recherche construit une méthode intelligente à portée générale fondée sur des algorithmes d'intelligence artificielle. L'échange entre le concepteur et le système permet à l'espace de passer du désordre à l'ordre et d'un état dynamique à un état relativement stable. La méthode simule ainsi l'évolution dans laquelle les systèmes fonctionnel et morphologique coopèrent, se confrontent et s'ajustent, révélant le caractère intrinsèquement évolutif de l'espace urbain.

Dans le contexte d'une transformation rapide des technologies émergentes, la conception urbaine numérique fondée sur l'intelligence artificielle connaît un essor soutenu. Face aux effets de la recomposition des modes de production et de vie sur les espaces urbains futurs, il importe de reconnaître davantage le rôle décisif des technologies intelligentes. L'intégration créative de l'intelligence humaine et de la puissance de calcul, afin de concevoir des espaces urbains de qualité à plusieurs échelles, dans plusieurs dimensions et pour des scénarios variés, restera vraisemblablement un enjeu scientifique majeur pendant longtemps. La conception urbaine intelligente tournée vers l'avenir n'en est encore qu'à ses débuts.

Note

① L'apprentissage par renforcement (reinforcement learning, RL) est une méthode d'apprentissage automatique dans laquelle un agent obtient des « récompenses » par essais et erreurs au cours de ses interactions avec un environnement. Ses composantes centrales sont le réseau de politique (policy network), le réseau critique ou d'évaluation (critic network) et le processus de décision markovien (Markov decision process, MDP). Les différentes actions de l'agent produisent des récompenses différenciées ; le signal de récompense guide l'action suivante afin de maximiser le gain. À partir de l'apprentissage à agent unique s'est développé l'apprentissage par renforcement multi-agents, dans lequel plusieurs agents coopèrent pour optimiser des tâches de conception dans des espaces complexes, de grande dimension et dynamiques.

Références

- [1] MINISTÈRE DU LOGEMENT ET DU DÉVELOPPEMENT URBAIN-RURAL DE LA RÉPUBLIQUE POPULAIRE DE CHINE. Règlement relatif à la gestion de la conception urbaine [S]. 2017. [en chinois]
- [2] TRANCIK R., GOODEY B., JIN Guangjun. Concept et contenu de la conception urbaine [J]. *New Architecture*, 1990(4): 76-77. [en chinois]
- [3] WANG Jianguo. Quatre générations de paradigmes de la conception urbaine du point de vue de la planification rationnelle [J]. *City Planning Review*, 2018, 42(1): 9-19. [en chinois]
- [4] BIAN Hongqin, CHEN Nan. Quarante ans de directives de conception urbaine à l'échelle mésoscopique : rétrospective, réflexion et perspectives [J]. *Planners*, 2020, 36(15): 55-60. [en chinois]
- [5] SUN Yimin. Construction scientifique des grands projets urbains à l'échelle mésoscopique : réflexion sur le système du concepteur en chef [J]. *Contemporary Architecture*, 2022(5): 19-23. [en chinois]
- [6] YANG Junyan, LU Xiaobo. Morphologie intermédiaire de la conception urbaine : exploration du projet « Neuf veines de Tongjin » à Nantong [J]. *City Planning Review*, 2019, 43(12): 106-116. [en chinois]
- [7] ZHANG Li, DENG Huishu, MEI Xiaohan, et al. Ingénierie des facteurs humains urbains : une science de la conception de la qualité de l'expérience spatiale [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022, 67(16): 1744-1756. [en chinois]
- [8] WU Zhiqiang, HUANG Xiaochun, LI Dong, et al. Table ronde académique sur « l'influence de l'intelligence artificielle sur la planification urbaine » [J]. *Urban Planning Forum*, 2018(5): 1-10. [en chinois]
- [9] YANG Chao. Principes de conception urbaine des villes nouvelles fondés sur l'« infrastructuralisme » : intégration de structures hétéro-organisées et auto-organisées [J]. *Urban Planning Forum*, 2023(5): 45-53. [en chinois]
- [10] YANG Junyan, ZHANG Zhonghu, SHI Yi. Exploration d'une plateforme numérique de participation publique à la conception urbaine pour la régénération : le cas du secteur de Yuejianglou à Nanjing [J]. *Urban Planning Forum*, 2024(3): 74-81. [en chinois]
- [11] SHAO Dian, YANG Junyan. Analyse de la superposition des systèmes multi-ossatures de la morphologie spatiale urbaine [J]. *Chinese Famous Cities*, 2023, 37(1): 71-78. [en chinois]
- [12] WANG Lin, TIAN Jian, XU Xiaonan, et al. Différenciation spatiale et couplage des établissements ruraux à l'échelle du district selon la relation morphologie–fonction : le cas du xian de Shan, dans le sud-ouest du Shandong [J]. *Progress in Geography*, 2024, 43(9): 1730-1743. [en chinois]
- [13] YANG Tao, TIAN Ying, XU Yanjie. Planification et gouvernance génératives interactives assistées par les jumeaux numériques [J]. *Shanghai Urban Planning Review*, 2023(5): 4-10. [en chinois]
- [14] GAN Wei, WU Zhiqiang, WANG Yuankai, et al. Construction d'un modèle théorique de conception urbaine assistée par l'AIGC [J]. *Urban Planning Forum*, 2023(2): 12-18. [en chinois]
- [15] ZHENG Degao, ZHU Wenjuan, LIN Chenhui, et al. Étude des secteurs prioritaires et potentiels de Shanghai dans une perspective d'optimisation de la structure fonctionnelle [J]. *Urban Planning Forum*, 2020(6): 65-71. [en chinois]
- [16] YANG Chao, LI Qiang. Logique formelle structurée de la conception urbaine : prolongement de la théorie de l'analyse de projet [J]. *Urban Development Studies*, 2024, 31(1): 31-41. [en chinois]
- [17] GUO Y., HU X., TANG J. Structural landmark salience computation in compact urban districts with 3D node-landmark grid analysis model: a case study on two sample districts in Changsha, China [J]. *Buildings*, 2023, 13(4): 1024.
- [18] HU Xinyu. Étude quantitative de l'espace et des activités des centres urbains à structure axiale et nodale dans les mégapoles asiatiques [D]. Université du Sud-Est, 2016. [en chinois]

- [19] HE Yong, CHEN Yufan, ZHAO Jing. Transformation fonctionnelle et évolution morphologique des établissements ruraux périurbains dans les régions économiquement développées de Chine [J]. Journal of Human Settlements in West China, 2023, 38(5): 17-23. [en chinois]
- [20] LI J. W., ZHOU T. Multiagent deep meta reinforcement learning for sea computing-based energy management of interconnected grids considering renewable energy sources in sustainable cities [J]. Sustainable Cities and Society, 2023, 99: 104917.
- [21] SHAO Dian, YANG Junyan, SHI Beixiang, et al. Du schéma directeur au système de contrôle : méthode de traduction fine de la conception urbaine à l'échelle de l'îlot [J]. City Planning Review, 2022, 46(10): 56-71. [en chinois]
- [22] ZHANG Xuchen, ZHAO Min. Origines des « études de couplage » en planification urbaine et analyse de leurs principales erreurs [J]. City Planning Review, 2022, 46(6): 37-47. [en chinois]
- [23] ZHANG L., WU M., BAI W., et al. Measuring coupling coordination between urban economic development and air quality based on the fuzzy BWM and improved CCD model [J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 75: 103283.
- [24] ZHANG Yang, HE Yi. De la séparation à l'intégration : logique de construction du système d'évaluation diagnostique des quartiers historiques à partir de la théorie du couplage systémique [J]. Urban Planning Forum, 2024(3): 82-90. [en chinois]
- [25] XING Zhong, ZHU Jiayi. Évaluation de l'équité des espaces verts fondée sur la théorie du développement coordonné par couplage [J]. City Planning Review, 2017, 41(11): 89-96. [en chinois]
- [26] ZHAO Xuechun, JU Chunyan. Relation de coordination entre espaces verts publics et espaces fonctionnels urbains et facteurs d'influence : le cas d'Urumqi [J]. Arid Land Geography, 2024, 47(5): 898-908. [en chinois]
- [27] YAO Jiawei, HUANG Chenyu, FU Bin, et al. Recherche et pratique d'une conception pilotée par la performance de l'environnement éolien et assistée par l'apprentissage profond par renforcement [J]. Architectural Journal, 2022(S1): 31-38. [en chinois]

Révision reçue : janvier 2025.

Traduction assistée par IA