

Simulation spatio-temporelle par agents des cercles de vie communautaires intégrant le choix discret et la modélisation à base d'agents : construction d'un modèle théorique et cadre de recherche

Auteurs

Che Guanqiong ; Qiu Baoxing ; Wang Yitian ; Lan Xu

Résumé

La performance des services d'un cercle de vie communautaire dépend de la compréhension fine des interactions entre les activités hétérogènes des habitants et la localisation des équipements. Les recherches récentes sont passées de l'analyse spatiale statique aux activités spatio-temporelles dynamiques, aux projets individuels à l'échelle micro et à la simulation des décisions comportementales. Elles restent toutefois limitées dans la quantification des préférences individuelles et dans la représentation systématique des dimensions du choix ; les interactions entre individus hétérogènes et espace, ainsi que les mécanismes d'émergence ascendante, demeurent insuffisamment éclairés. En prenant le système "projet-activité" de la géographie temporelle comme prototype théorique, cet article propose un cadre intégrant le modèle Logit mixte et la modélisation à base d'agents. Il explicite une construction en trois étapes : configuration d'agents résidents et spatiaux dotés d'attributs statiques et dynamiques ; conception et estimation de mécanismes décisionnels reflétant l'hétérogénéité des préférences ; puis simulation ABM articulant planification, exécution et rétroaction. La distribution statistique de l'hétérogénéité des préférences résidentielles est ainsi intégrée à un modèle de simulation par agents, créant une boucle de rétroaction entre modélisation théorique et validation pratique. Quatre champs d'application sont proposés : évaluation dynamique multidimensionnelle de la performance des services du cercle de vie ; analyse attributive des mécanismes d'interaction entre habitants et cercles de vie ; formation de la polysémie spatiale et construction de scénarios à partir de la simulation des activités ; prévision de scénarios et évaluation des interventions dans l'évolution des cercles de vie. Le cadre fournit un modèle calculable pour analyser la complexité et l'hétérogénéité des interactions homme-espace dans les cercles de vie communautaires et soutient une gouvernance du renouvellement précise et centrée sur l'humain.

Mots-clés

simulation du comportement spatio-temporel ; modèle Logit mixte ; modèle à base d'agents ; cercle de vie communautaire ; planification centrée sur l'humain

1 Progrès théoriques et méthodologiques dans les recherches sur les cercles de vie

Avec l'approfondissement de la stratégie chinoise de nouvelle urbanisation, la structure spatiale urbaine et la vie sociale ont été profondément réorganisées, et l'espace social est devenu plus diversifié, dynamique et complexe [1-3]. Un paradigme de recherche en planification centré sur l'espace physique statique ne permet plus d'expliquer efficacement les besoins diversifiés des habitants, leurs comportements dynamiques ni leurs interactions complexes avec l'environnement spatial. L'étude des processus d'interaction homme-espace et des mécanismes décisionnels sous contraintes spatio-temporelles multi-échelles est donc indispensable pour comprendre la complexité et la temporalité imbriquée de l'espace social urbain ; elle répond aussi aux exigences d'une nouvelle urbanisation centrée sur les personnes [4-5].

Dans ce contexte, le cercle de vie communautaire constitue un champ actif qui porte et relie les multiples activités des habitants et assure en continu des échanges matériels, informationnels et émotionnels. Il est à la fois un support micro de l'interaction homme-espace et un médiateur clé entre individu, société et espace. Il devient ainsi une entrée majeure pour analyser les mécanismes de l'interaction homme-espace et mettre en oeuvre l'idée de ville du peuple [6-7]. Cette interaction est fortement processuelle, car elle se manifeste dans l'évolution continue des trajectoires d'activité et dans la dépendance séquentielle des décisions spatio-temporelles. Elle est aussi profondément complexe, car elle émerge de l'hétérogénéité individuelle, des réseaux sociaux, de l'environnement spatial, des institutions et de la culture [8-9].

Les études existantes s'appuient cependant souvent sur des données statiques "figées" dans des districts administratifs ou des unités de recensement, ou sur des données transversales qui homogénéisent les individus au sein des groupes. Ces données fournissent des instantanés à quelques moments, mais elles ne captent pas efficacement les processus d'activité d'individus différenciés sous contraintes spatio-temporelles ni leur interaction dynamique avec l'environnement bâti [4]. Cette limite théorique et méthodologique produit directement un décalage entre la configuration du cercle de vie et les besoins réels des habitants, ce qui rend difficile une gouvernance spatiale de haute qualité centrée sur l'humain.

L'article se concentre donc sur deux questions centrales. Sur le plan théorique, comment dépasser l'analyse statique par instantanés et expliquer avec précision les associations dynamiques et les motifs émergents entre séquences d'activités individuelles et décisions spatiales ? Sur le plan pratique, comment construire des outils capables de simuler l'interaction réelle entre l'humain et l'espace et d'offrir un appui décisionnel fin et dynamique pour la configuration des équipements et l'optimisation spatiale des cercles de vie ? Pour y répondre, l'article associe la notion de "projet" en géographie temporelle, qui souligne les doubles contraintes entre intentions subjectives d'activité et conditions objectives ainsi que le lien dynamique entre séquences d'activité et choix spatiaux, avec la modélisation à base d'agents portée par l'IA. Il propose un modèle de simulation spatio-temporelle par agents pour les cercles de vie communautaires, intégrant temps, espace et activité [10-12]. Centré sur des agents résidents aux caractéristiques hétérogènes, le modèle utilise un choix discret pour représenter le processus "évaluation spatiale - choix - déplacement" et mobilise la simulation de scénarios pour révéler les interactions entre habitants individuels et espace de vie sous contraintes multiples. Il offre ainsi un paradigme analytique ascendant qui répond dynamiquement aux comportements individuels.

1.1 De l'espace statique à l'activité spatio-temporelle dynamique

Sous l'effet de l'intégration de la planification urbaine-rurale, de la géographie temporelle, de la géographie comportementale et de technologies telles que les données spatio-temporelles massives, les recherches sur les cercles de vie sont passées de l'espace physique aux activités de population, et des lieux nodaux aux réseaux de flux. Les premières études reposaient sur une ontologie spatiale et prolongeaient les théories classiques de planification, notamment la théorie des zones concentriques et l'unité de voisinage. Elles considéraient le cercle de vie comme un conteneur spatial statique, clairement borné et annulaire [13]. Dans cette perspective, l'attention portait sur l'organisation spatiale interne, afin de révéler les structures macroscopiques et les combinaisons de fonctions résidentielles, commerciales, vertes et autres [14]. Les méthodes d'économétrie spatiale et les SIG ont aussi été

utilisées pour évaluer la performance et l'équité des équipements publics, fournissant des preuves pour une allocation standardisée des ressources spatiales [15-16].

À mesure que les activités humaines deviennent plus mobiles et imbriquées, la construction des cercles de vie exige des théories et des méthodes partant des systèmes d'activité pour étudier les relations homme-espace. L'introduction de la géographie temporelle a marqué un tournant paradigmatique. Les notions de trajectoire et de prisme spatio-temporels permettent de décrire les parcours d'activité réels et les ensembles d'opportunités possibles, déplaçant l'attention des espaces d'activité statiques et nodaux vers les processus d'activité et les réseaux de flux [17-19]. En parallèle, les données spatio-temporelles massives enrichissent les données de trajectoires individuelles et d'activités urbaines, orientant la recherche vers l'inférence des motifs d'activité, l'identification des niveaux et fonctions des cercles de vie et l'analyse des mécanismes des espaces d'activité [20]. Les travaux couvrent la délimitation, la structure et la typologie des cercles de vie à partir de trajectoires spatio-temporelles [21-22], l'appariement demande-comportement-offre des équipements de service [23-24], l'évaluation de l'efficacité et de la vitalité spatiales à partir des comportements spatio-temporels [25], les mécanismes de l'environnement bâti influençant ces comportements [26-29], ainsi que la différenciation sociale des comportements dans les cercles de vie [30-31]. Ces études apportent un appui théorique solide à l'identification fonctionnelle fine, à l'analyse des interactions personnes-espace et à l'amélioration de la qualité de vie centrée sur l'humain.

1.2 De l'activité spatio-temporelle macro aux projets individuels micro

La géographie temporelle et la géographie comportementale ont introduit une perspective centrée sur l'humain et fondée sur l'activité dans l'étude des cercles de vie. Néanmoins, la plupart des travaux résument encore les motifs d'activité spatio-temporelle à un niveau agrégé. Les différences individuelles, la perception spatiale et les contraintes socio-économiques sont insuffisamment prises en compte, ce qui rend difficile l'analyse des mécanismes d'activité et des associations séquentielles sous les contraintes conjointes de l'individu et de l'environnement. La recherche demeure ainsi souvent au stade de l'observation a posteriori et soutient peu la prédiction a priori [2,8].

En réponse, des études ont proposé le concept de projet, en soulignant que les activités sont étroitement liées aux intentions et aux plans individuels tout en étant contraintes par la capacité, le couplage et l'autorité [32-33]. Ce concept dépasse la classification des activités selon leurs caractéristiques et les classe plutôt selon la manière dont intentions individuelles et situations externes organisent conjointement l'activité. Il approfondit la compréhension des effets conjoints de l'agentivité subjective et des contraintes objectives dans les contextes d'activité et offre une nouvelle grille d'analyse des mécanismes processuels du comportement spatio-temporel et de la complexité des systèmes d'activité [1,6].

Dans ce cadre, les chercheurs chinois et internationaux ont étudié les systèmes quotidiens "projet-activité" dans trois directions. Premièrement, les études sur le bien-être social et l'équité révèlent les différences de projets de vie, de difficultés spatio-temporelles et d'effets sociaux entre groupes. Elles se concentrent sur les navetteurs, les femmes, les personnes âgées et les groupes à faible revenu, en analysant les contraintes et stratégies d'adaptation liées à la distance domicile-emploi, aux responsabilités familiales, aux capacités physiques et économiques [34-41]. Deuxièmement, les travaux examinent comment les changements technologiques reconfigurent la forme et la flexibilité des projets. La mobilité intelligente et les services de livraison peuvent réduire les contraintes de capacité liées au

déplacement et rendre possibles des séquences d'activités complexes et multi-objectifs [23,42-44]. Troisièmement, les enquêtes multimodales de données massives et la visualisation se développent. Les données de localisation et de trajectoire, les médias sociaux et les sciences sociales computationnelles permettent une représentation à haute résolution des trajectoires d'activité des groupes sociaux et aident à identifier les contraintes derrière certaines trajectoires de projet, faisant passer la mesure du projet d'une description macro à une précision micro et à une analyse dynamique [12,45].

1.3 Des modèles conceptuels de projet à la simulation des décisions comportementales

La proposition et l'application du concept de projet ont déplacé la recherche sur la vie quotidienne du niveau collectif macro vers le niveau individuel micro. Des études ont proposé des algorithmes de construction des espaces d'activité individuels à partir d'ancres d'activité [46]. D'autres ont utilisé des modèles de choix discret fondés sur la théorie de l'utilité aléatoire, combinés à des simulations multi-agents, pour analyser les choix de destination et d'itinéraire sous les contraintes conjointes des intentions de l'agent, de l'environnement bâti et de l'allocation du temps [47-49]. Ces recherches confirment la faisabilité de la modélisation à base d'agents pour simuler les micro-comportements, mais elles restent le plus souvent au niveau de populations typifiées. L'expression quantitative des préférences et des différences individuelles doit encore être approfondie.

La présente étude prend donc le système "projet-activité" de la géographie temporelle comme prototype théorique. La décision est comprise comme une évaluation d'utilité et un choix réalisés par des individus aux préférences hétérogènes dans un champ d'opportunités et de contraintes défini par l'environnement bâti. Opérationnellement, l'article combine le modèle Logit mixte et la modélisation à base d'agents afin de construire un modèle de simulation spatio-temporelle des activités quotidiennes. Dans ce modèle, les agents spatio-temporels représentent les individus. Sous les contraintes conjointes des conditions externes produites par l'environnement bâti et des préférences internes, les agents prennent leurs décisions d'activité selon la maximisation de l'utilité. Les paramètres de préférence reflétant l'hétérogénéité individuelle sont estimés par le modèle Logit mixte, ce qui établit un mécanisme d'évaluation et de décision sous l'action conjointe "contraintes-préférences". Le modèle peut quantifier la contribution et les seuils effectifs de facteurs non observables, comme les préférences individuelles, aux résultats spatio-temporels des activités quotidiennes ; il peut aussi prédire les changements macro par ajustement des paramètres. Il approfondit ainsi la compréhension des interactions entre individus, décisions, activités, temps et espace, et fournit une base décisionnelle pour le renouvellement et la gouvernance des cercles de vie intégrant l'hétérogénéité individuelle.

2 Construction d'un modèle de simulation spatio-temporelle par agents des cercles de vie communautaires

Le modèle est décrit selon le cadre ODD couramment utilisé pour les modèles à base d'agents, c'est-à-dire "overview - design concepts - details" [50]. La vue d'ensemble comprend les objectifs de simulation, les agents et la sélection des variables ; les concepts de conception précisent les règles de décision des agents spatio-temporels ; les détails du modèle couvrent le fonctionnement et la validation.

2.1 Objectif de construction du modèle

Afin de répondre à l'incapacité des études existantes à saisir les préférences individuelles hétérogènes et leur interaction dynamique avec les environnements spatiaux, cette étude intègre les modèles de choix discret et la modélisation à base d'agents pour construire une plateforme de simulation pilotée par les préférences individuelles et rétroagie par les environnements spatio-temporels. Elle se concentre

sur trois questions. Reconnaissance des motifs : quels motifs d'activité spatio-temporelle émergent de l'interaction dynamique entre choix hétérogènes d'activité-déplacement et environnements spatiaux multicouches ? Exploration des mécanismes : comment les préférences hétérogènes interagissent-elles avec des systèmes spatiaux-sociaux complexes par rétroaction, et quels en sont les facteurs clés et les seuils effectifs ? Évaluation des politiques : quels effets différenciés les schémas de conception alternatifs produisent-ils sur le cercle de vie dans son ensemble et sur les individus ?

2.2 Agents et variables du modèle : paramétrage des agents spatio-temporels

2.2.1 Agents résidents

Les agents résidents disposent d'une capacité active et adaptative de décision. À partir de leurs objectifs, préférences, états actuels et perceptions de l'environnement, ils évaluent l'utilité et choisissent activement destinations, itinéraires et arrangements temporels. Leurs attributs constituent les facteurs de base des décisions d'activité. Ils comprennent des attributs statiques et dynamiques, dont les paramètres proviennent de données statistiques macro, d'enquêtes micro et de la calibration du modèle [51-52]. Les attributs statiques définissent les caractéristiques socio-démographiques et les préférences stables de long terme, servant de base aux motifs d'activité initiaux et aux paramètres de décision. Les attributs dynamiques enregistrent les états en temps réel pendant la simulation et sont à la fois base et résultat des décisions.

Tableau 1. Attributs des agents résidents et sources de données

Groupe d'attributs	Variables	Signification principale	Sources de données
Statique : attributs socio-démographiques	Âge ; profession ; structure du ménage ; revenu ; localisation résidentielle ; possession d'outils de transport	Reflètent les différences de demande d'activité, de capacité de mobilité, de contraintes temporelles, de séquençage d'activités, de sensibilité aux coûts, de capacité de consommation, d'accessibilité spatiale, de choix modal et de rayon d'activité potentiel	Données de recensement ; données de grille communautaire ; données immobilières
Statique : paramètres de préférence interne	Sensibilité au temps ; sensibilité au coût ; préférence pour la qualité des équipements ; aversion à la foule ; coefficient d'inertie	Exprime la sensibilité au temps et aux coûts monétaires, l'attention à l'environnement et à la qualité du service, l'aversion pour la congestion, et la préférence pour les espaces et équipements familiers même lorsqu'ils ne sont pas optimaux	Journaux d'activités ; estimation des paramètres du Logit mixte
Dynamique : état spatio-temporel	Programme quotidien d'activités ; localisation	Enregistre les séquences d'activités planifiées et réalisées,	Journaux d'activités ;

	actuelle ; activité actuelle ; état de déplacement	les coordonnées actuelles, le type et l'heure de début de l'activité, l'itinéraire et le temps de trajet restant	données de services géolocalisés
Dynamique : état physiologique et psychologique	Fatigue ; urgence ; satisfaction ou utilité cumulée	Reflète l'endurance d'activité, la pression temporelle avant la prochaine activité fixe et l'utilité cumulée des activités accomplies	Journaux d'activités ; données de services géolocalisés
Dynamique : mémoire, ressources et contraintes	Mémoire et apprentissage ; budget quotidien de coût ; budget quotidien de temps ; liste des tâches	Influence les choix ultérieurs et enregistre les limites de dépenses, le temps discrétionnaire restant et les tâches fixes ou flexibles à accomplir	Journaux d'activités ; enquêtes comportementales ; mises à jour de simulation

2.2.2 Agents de l'environnement spatial du cercle de vie

L'environnement spatial du cercle de vie est à la fois objet de décision, support d'activité et cadre de contraintes pour les agents résidents. Il est représenté comme un plan bidimensionnel composé de points, de lignes et de polygones : les points figurent les équipements de service qui attirent les agents, les lignes les voies praticables, et les polygones les entités bâties. Les agents de l'environnement spatial possèdent des attributs statiques et dynamiques. Les attributs statiques reflètent les qualités tridimensionnelles et les structures topologiques de l'environnement spatial, formant un système d'indicateurs couvrant la structure du réseau viaire, les équipements fonctionnels et la qualité environnementale. Ces attributs sont stockés en espace bidimensionnel comme informations descriptives et interviennent dans la cognition et l'évaluation spatiales des agents résidents. Les attributs dynamiques reflètent les caractéristiques variables dans le temps, comme l'occupation et la congestion actuelles ; ils rétroagissent en temps réel par les variables de la fonction d'utilité et influencent les décisions d'activité ultérieures.

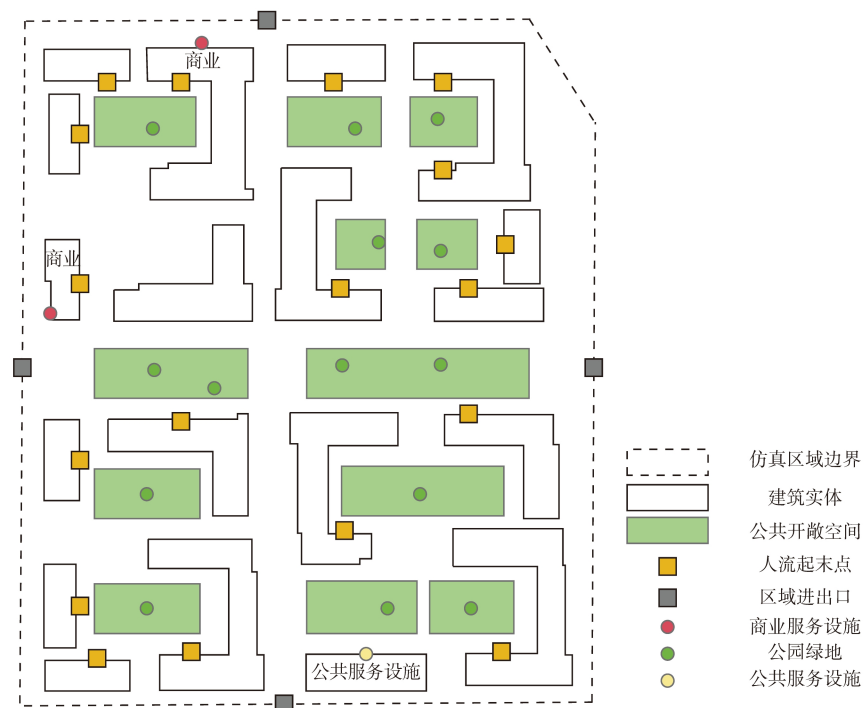


Figure 1. Environnement spatial virtuel.

Tableau 2. Système d'indicateurs de l'environnement spatial

Indicateur primaire	Indicateur secondaire	Signification	Sources de données
Réseau viaire	Longueur ; largeur ; densité du réseau routier ; proximité ou intégration ; intermédiation ou choix	Mesure la longueur et la largeur des voies, la densité du réseau dans différents rayons du cercle de vie, l'accessibilité des rues et leur potentiel d'attraction des flux orientés vers des destinations, ainsi que la probabilité d'être traversées par des flux de passage	Données de planification ; OpenStreetMap et autres données massives
Équipements fonctionnels	Échelle ; distribution ; densité ; coefficient d'occupation ; mixité ; horaires d'ouverture	Mesure l'échelle, la distribution spatiale, la densité, le coefficient d'occupation, la mixité fonctionnelle et le temps de service des équipements dans le cercle de vie	Données POI ; relevés de terrain
Qualité environnementale	Couverture végétale ; facteur de vue du ciel ; rapport largeur-hauteur	Reflète le verdissement des parcs et rues, la visibilité du ciel aux noeuds viaires, le rapport entre	Images de télédétection ; relevés de

	de rue ; ratio de façade	largeur de rue et hauteur des bâtiments, et le rapport entre façade bâtie et longueur de l'alignement routier	terrain
--	--------------------------	---	---------

2.3 Conception du modèle : mécanisme décisionnel et estimation des paramètres

Le mécanisme décisionnel des agents constitue le pont computationnel entre les comportements individuels micro et les phénomènes systémiques macro. Par rapport aux travaux antérieurs, l'avancée centrale du modèle réside dans l'introduction du modèle Logit mixte. Les distributions d'hétérogénéité des paramètres servent à marquer les différences individuelles entre agents résidents, permettant à des agents dotés de paramètres personnalisés de décider et d'interagir dans un environnement virtuel. Il devient ainsi possible de révéler plus finement les effets des préférences individuelles non observables sur les motifs spatio-temporels et la performance spatiale du cercle de vie. Le modèle comporte deux étapes : définition de l'ensemble de choix d'activité, puis construction et estimation de la fonction d'utilité des plans d'activité.

2.3.1 Définition de l'ensemble de choix d'activité

À partir des journaux d'activités et des données de l'environnement spatial du cercle de vie, le modèle génère pour chaque agent résident un ensemble faisable de motifs d'activité C_n sous contraintes de capacité, de couplage et d'autorité. Cet ensemble comprend des motifs j_n tels que "domicile-travail-domicile" ou "domicile-accompagner l'enfant à l'école-travail-achats-domicile". Chaque motif possède des attributs, comme le temps de trajet, le coût monétaire et le type d'activité, utilisés ensuite pour évaluer l'utilité du choix d'activité.

2.3.2 Construction de la fonction d'utilité et estimation des paramètres

Une fois généré l'ensemble faisable personnalisé C_n , chaque agent résident évalue et choisit parmi les plans quotidiens possibles selon des préférences hétérogènes, en reliant les attributs du décideur aux alternatives de choix d'activité. Un modèle de choix discret fondé sur la théorie de l'utilité aléatoire est introduit. Plus précisément, le modèle Logit mixte sert à construire et estimer la fonction d'utilité et les paramètres de chaque motif d'activité j , afin de produire un comportement de choix probabiliste.

Pour l'agent résident n , l'utilité aléatoire U_{nj} du choix du motif d'activité j comprend un terme déterministe observable V_{nj} et un terme aléatoire non observable ϵ_{nj} :

$$U_{nj} = V_{nj} + \epsilon_{nj} \quad (1)$$

L'utilité observable V_{nj} est définie comme une combinaison linéaire des attributs X_{nj} du motif d'activité j :

$$V_{nj} = \beta_n X_{nj} \\ = \beta_{n1} T_{nj} + \beta_{n2} C_{nj} + \sum_{m \in M} \gamma_{nm} D_{jm} \quad (2)$$

Ici, $\beta_n = (\beta_{n1}, \beta_{n2}, \gamma_{n1}, \gamma_{n2}, \dots)$ est le vecteur aléatoire des coefficients de préférence de l'agent résident n . Il varie entre individus afin de saisir l'hétérogénéité des préférences. T_{nj} désigne le temps total de trajet du motif j , C_{nj} le coût monétaire total, M l'ensemble des types d'activité, dont travail, achats et loisirs, m un type d'activité spécifique dans M , et D_{jm} une variable muette binaire. Si le motif j inclut l'activité m , $D_{jm} = 1$; sinon $D_{jm} = 0$. γ_{nm} est le coefficient de préférence de l'agent n pour le type d'activité m . $\gamma_{nm} > 0$ indique une préférence, tandis que $\gamma_{nm} < 0$ indique une aversion.

Le réglage central est que β_n n'est pas une constante fixe mais un vecteur aléatoire variant entre individus, capturant une hétérogénéité des préférences non expliquée par les variables observables. La méthode du maximum de vraisemblance simulé permet d'estimer la distribution de ces paramètres à partir des données d'enquête des journaux d'activités et d'obtenir une distribution statistique quantitative de l'hétérogénéité des préférences dans la zone étudiée. Lors de l'initialisation ultérieure du modèle ABM, chaque agent résident n tire indépendamment un vecteur spécifique β_n depuis la distribution estimée, puis ce vecteur est fixé. Chaque agent possède ainsi une logique décisionnelle unique et stable, cohérente avec les régularités empiriques du comportement. Le modèle passe d'une inférence simple fondée sur des règles à une simulation ancrée dans les comportements observés, améliorant sa puissance explicative et sa validité prédictive.

2.4 Fonctionnement et validation du modèle

2.4.1 Initialisation du modèle

L'initialisation vise à générer un champ virtuel cohérent avec l'environnement spatial réel du cercle de vie et les caractéristiques de la population. Elle peut être mise en oeuvre sur des plateformes comme NetLogo et AnyLogic et comprend trois modules séquentiels. Premièrement, l'environnement spatial est numérisé : à partir de données GIS de haute précision, la topologie du réseau routier, les empreintes bâties, les points d'équipements publics et d'autres informations géographiques numériques sont importés ou vectorisés dans la plateforme, puis les attributs statiques et dynamiques sont configurés selon le système d'indicateurs des agents spatiaux. Deuxièmement, les agents résidents sont générés : des algorithmes comme l'ajustement proportionnel itératif et des données de recensement multidimensionnelles servent à créer une liste d'agents virtuels correspondant aux caractéristiques démographiques réelles du cercle de vie. Pour chaque agent, un vecteur aléatoire unique β_n est tiré de la distribution de préférences estimée par le Logit mixte, représentant ses préférences internes. Troisièmement, les agents résidents sont appariés et initialisés spatialement : la liste est affectée aux bâtiments résidentiels selon les unités statistiques, ce qui complète l'initialisation des ancrages spatiaux. Les ensembles de choix d'activité sont ensuite générés selon les rôles sociaux des agents et, au début de la simulation, un plan d'activité est sélectionné et exécuté de manière probabiliste pour obtenir un programme initial et un état spatio-temporel de départ.

2.4.2 Cycle dynamique planification-exécution-rétroaction

Après l'initialisation, le modèle entre dans un cycle itératif composé de décisions quotidiennes de planification à basse fréquence, de décisions activité-équipement-itinéraire à haute fréquence et de rétroactions spatiales. Le cycle comprend quatre étapes. Premièrement, réglage et perception de l'état spatial. Au début de chaque pas t , l'état de l'environnement est défini ou mis à jour selon les actions des agents au tour précédent et devient l'entrée de la perception spatiale du tour courant. Deuxièmement, décision et action des agents résidents. Les conditions de déclenchement de la planification quotidienne et de l'exécution des activités sont fixées, puis un modèle décisionnel à deux niveaux est appliqué : planification quotidienne et choix activité-équipement-itinéraire. Au niveau de la planification quotidienne, chaque agent calcule l'utilité aléatoire U_{nj} de chaque motif j dans son ensemble faisable personnalisé C_n à partir de ses coefficients β_n , puis tire un motif selon les probabilités du modèle Logit mixte comme plan général j de la journée. *Au niveau du choix activité-équipement-itinéraire, à partir du motif choisi j , l'agent sélectionne un équipement f dans l'ensemble des équipements actuellement atteignables dans le temps et l'espace selon la fonction d'utilité, ce qui achève le choix de*

destination. L'utilité de l'itinéraire est ensuite calculée à partir du temps de trajet attendu, et l'itinéraire est choisi probabilistiquement par le modèle Logit [52]. Troisièmement, enregistrement des données. Le modèle consigne les trajectoires spatio-temporelles complètes, les journaux d'activités, l'utilité cumulée et les séquences décisionnelles de chaque agent résident, ainsi que les états macro d'usage, comme la densité piétonne et les types d'activité dans les équipements spatiaux. Ces données soutiennent la validation ultérieure et l'évaluation des effets de planification. Quatrièmement, mise à jour des données et itération du modèle. Après ces étapes, les états internes des agents et les états spatiaux sont mis à jour, et un nouveau cycle de perception, décision, action et enregistrement commence. Par itération, les décisions des résidents remodelent continuellement les états spatiaux, par exemple en créant ou en soulageant la congestion, tandis que les états spatiaux mis à jour deviennent des paramètres d'entrée influençant les décisions suivantes. Des motifs spatio-temporels multi-niveaux émergent alors dynamiquement.

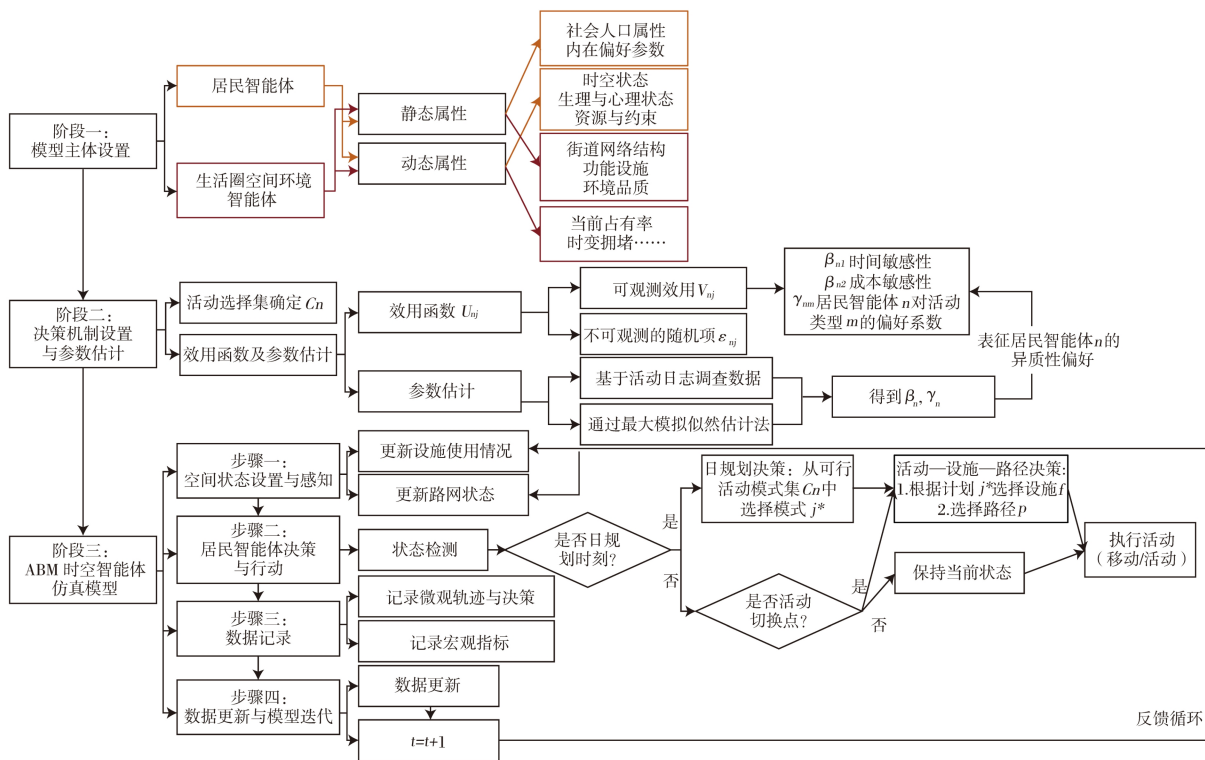


Figure 2. Processus d'estimation des paramètres et de simulation du modèle spatio-temporel à base d'agents.

2.4.3 Vérification de la validité du modèle

Pour évaluer la validité et la crédibilité du modèle, et garantir qu'il peut servir de plateforme fiable d'expérimentation computationnelle pour expliquer les mécanismes décisionnels des activités résidentielles et prédire les effets des interventions spatiales, une validation à deux niveaux est établie, combinant appariement des motifs macro et test de la logique micro. D'abord, l'appariement des motifs comportementaux macro est réalisé. Le modèle est exécuté jusqu'à un état stable ou bien la moyenne de plusieurs jours de simulation est utilisée. Des analyses de corrélation spatiale et d'ajustement temporel comparent les cartes de chaleur simulées et observées de densité piétonne et de distribution

spatio-temporelle, ainsi que les courbes de visite quotidiennes ou hebdomadaires des différents équipements. Des tests K-S ou des comparaisons de quantiles comparent aussi les distributions du nombre de chaînes d'activités quotidiennes, des distances de trajets simples et des durées d'activités issues de la simulation et des enquêtes, afin de tester si le modèle reproduit les régularités macro stables de l'activité spatio-temporelle dans la zone étudiée. Ensuite, l'analyse de sensibilité et la validation interne sont menées. L'analyse de sensibilité à un facteur modifie séparément des paramètres d'entrée comme la capacité des équipements et l'écart-type des distributions de préférences, puis examine si l'orientation et l'ampleur des changements des sorties principales, notamment les visites d'équipements, sont raisonnables. Des scénarios extrêmes, comme une forte hausse de la demande d'activité pendant les vacances ou la fermeture d'un équipement, sont également simulés pour observer si le modèle produit des comportements attendus, tels que congestion ou vides de service, et ainsi tester la robustesse de sa logique.

3 Applications du modèle spatio-temporel à base d'agents aux cercles de vie communautaires

3.1 De la mesure statique à la perception dynamique : évaluation dynamique multidimensionnelle de la performance des services

L'analyse traditionnelle de l'accessibilité statique, fondée sur les points d'équipement et les superpositions de buffers, ne peut pleinement tenir compte des rayons d'activité réels des individus ni de leurs limites comportementales sous les contraintes conjointes de capacité spatio-temporelle et d'interaction de groupe. Elle ne représente donc pas de façon réaliste la performance dynamique des espaces et équipements pour des individus hétérogènes. En intégrant le Logit mixte et les paramètres d'hétérogénéité des préférences, le modèle spatio-temporel à base d'agents représente l'environnement spatial comme un système d'opportunités et de contraintes variant selon les personnes. Sur cette base, il simule les décisions d'activité-déplacement des habitants hétérogènes sous contraintes multiples et leur rétroaction continue avec l'espace. Il peut évaluer le cercle de vie de manière dynamique et centrée sur l'humain selon trois dimensions - noeuds, réseaux et lieux - couvrant la performance des équipements, les services sociaux et la résilience du système.

Au niveau des noeuds, le modèle simule le choix des équipements sous contraintes réelles. Il peut diagnostiquer l'écart entre la population théoriquement desservie et la population effectivement desservie par un équipement, et évaluer l'appariement offre-demande ainsi que l'efficacité d'usage. Les indicateurs passent ainsi de la simple "couverture" et de la "portée géométrique" à un "taux de couverture effective" et à une "carte des fluctuations spatio-temporelles de la qualité du service". Le modèle peut aussi identifier les angles morts de service liés à des conflits temporels, à des seuils de prix et à d'autres obstacles, offrant un appui plus précis pour l'implantation des équipements, leur positionnement typologique et leur gestion opérationnelle.

Au niveau du réseau, le modèle considère le cercle de vie comme un système complexe composé de noeuds d'équipements et de flux de résidents. En simulant des scénarios tels que la défaillance d'un équipement clé ou l'ajout de nouveaux noeuds, il évalue la résilience globale et l'efficacité structurelle du réseau de services, identifie les hubs essentiels et les liens vulnérables, et analyse la redondance fonctionnelle et la substituabilité des équipements, soutenant ainsi l'amélioration de l'efficacité et de l'équité du système de services.

Au niveau du lieu, le modèle se concentre sur l'espace comme support d'interaction sociale. En suivant les trajectoires d'activité spatio-temporelles, il évalue quantitativement l'inclusivité et la différenciation

spatio-temporelle de l'usage des espaces publics et diagnostique les lieux potentiels de rassemblement ou de conflit entre groupes. En simulant l'introduction de nouvelles activités économiques ou l'ajustement des règles spatiales, il peut anticiper les changements de vitalité du lieu selon différents dispositifs de conception, faisant passer l'évaluation de l'espace de la mesure des conteneurs fonctionnels à l'appréciation du potentiel de création de lieu.

3.2 De l'association macro au mécanisme micro : interaction et attribution entre personnes et cercles de vie

Les recherches traditionnelles s'arrêtent souvent à l'association statistique macro entre personnes et espace et ne révèlent pas les moteurs micro des phénomènes observés. Le modèle spatio-temporel à base d'agents établit un pont interactif entre l'hétérogénéité des préférences résidentielles, les décisions activité-déplacement et l'environnement spatial. Il permet de modéliser et d'analyser deux mécanismes clés.

Au niveau micro, le modèle caractérise le mécanisme de couplage et d'adaptation entre comportement spatio-temporel individuel et environnements multidimensionnels. En intégrant les règles décisionnelles du Logit mixte et la rétroaction spatiale dynamique, il simule précisément le cycle perception spatiale, évaluation de l'utilité, mouvement d'activité et mise à jour des attributs. Les racines micro de tout phénomène macro peuvent alors être retracées. Par exemple, une faible utilisation d'un équipement peut être suivie à travers les chaînes décisionnelles de tous les agents résidents et attribuée à des horaires inadaptés, relevant d'une contrainte de couplage, à un coût excessif, relevant d'une contrainte d'autorité, ou à une qualité insuffisante, relevant d'une contrainte de préférence. Cette capacité d'analyse mécanistique approfondit l'évaluation, passant de "l'équipement est-il utilisé ?" à "pourquoi ne l'est-il pas ?" et "qui l'utiliserait ?", ce qui soutient directement des politiques de service public précises et différenciées selon les populations.

Au niveau macro, le modèle montre comment un ordre global émerge des interactions individuelles micro. Les comportements adaptatifs d'individus hétérogènes se superposent, interagissent et s'itèrent dans un espace partagé, produisant finalement des motifs socio-spatiaux macro que l'addition simple ne permet pas de prédire, c'est-à-dire un ordre local [8]. Le modèle spatio-temporel à base d'agents peut non seulement représenter les motifs d'activité et l'ordre local, mais aussi identifier, en ajustant les entrées, les combinaisons de facteurs, conditions critiques et trajectoires qui produisent un ordre donné. En fixant les règles initiales et les paramètres spatiaux, la planification peut orienter l'auto-organisation vers des ordres locaux plus résilients, vivants et inclusifs, passant d'un contrôle déterministe de type plan figé à des interventions adaptatives qui cultivent les possibilités positives.

3.3 De la configuration fonctionnelle à la fabrique du lieu : polysémie spatiale et construction de scénarios fondés sur la simulation des activités

La planification traditionnelle se concentre sur la configuration fonctionnelle matérielle de l'espace et peine à saisir les activités sociales et l'esprit du lieu que l'espace porte. En simulant les choix d'activité et les mécanismes d'interaction des habitants hétérogènes sous contraintes réelles, le modèle spatio-temporel à base d'agents permet aux planificateurs d'évaluer l'espace non seulement selon ce qui manque, mais aussi selon les raisons pour lesquelles les espaces existants ne soutiennent pas des projets plus riches. Il peut donc explorer de manière prospective comment des interventions spatiales fines stimulent des activités quotidiennes actives et diversifiées ainsi que des interactions entre individus différents dans les mêmes temps et lieux. La fabrique du lieu est ainsi requalifiée : elle passe

du design formel-esthétique au design de processus sociaux fondé sur la dynamique comportementale. Le modèle soutient en particulier deux stratégies complémentaires de fabrique du lieu pilotées par la simulation des activités.

Premièrement, il permet l'insertion précise de catalyseurs spatiaux pour activer le potentiel polysémique des noeuds. La polysémie d'un espace dépend de son adéquation aux projets des usagers [50]. En analysant les facteurs qui influencent les décisions des habitants et leurs trajectoires d'activité, le modèle diagnostique les écarts entre l'offre spatiale existante et la demande diversifiée d'activité en matière d'équipements, de types d'activités et d'accessibilité. Il simule ensuite les réponses dynamiques des types d'activité, de leur intensité et des motifs sociaux après l'introduction d'éléments catalyseurs à différents lieux et de différents types. Le design passe ainsi du jugement expérientiel à une prédiction précise fondée sur l'émergence comportementale, ce qui aide à garantir que chaque micro-renouvellement active effectivement l'espace en lui donnant le potentiel flexible d'un salon social ou d'un marché vivant.

Deuxièmement, le modèle aide à tisser systématiquement des réseaux de rencontre spatio-temporelle afin de stimuler la vitalité du système. Un espace isolé possède une polysémie limitée, tandis que la connexion de plusieurs noeuds complémentaires ou similaires peut catalyser des scénarios plus riches grâce à des effets de réseau dépassant la somme des individus. Le modèle peut simuler le processus par lequel la connexion crée la polysémie. Par exemple, un itinéraire piéton convivial reliant un jardin communautaire, une supérette, un point de services aux personnes âgées et un arrêt de bus permet non seulement de prévoir le chevauchement entre flux domicile-travail et loisirs, mais aussi de simuler de nouvelles chaînes d'activités, comme les achats en chemin et les interactions sociales par la marche. Ce tissage systématique d'opportunités de rencontre spatio-temporelle reconstruit le cercle de vie en le faisant passer d'un ensemble de parcelles fonctionnelles à une scène fluide soutenant rencontres, activités spontanées et exploration continue.

3.4 De la description du présent à la simulation du futur : prévision de scénarios et évaluation des interventions

Le modèle spatio-temporel à base d'agents offre une plateforme d'expérimentation simulée hautement contrôlable pour la planification et l'évaluation des politiques, déplaçant l'évaluation de l'après-coup vers la prédiction prospective. Ses applications principales sont doubles. Premièrement, il soutient la simulation d'optimisation de l'allocation des ressources. En simulant des schémas de planification sous différents objectifs et contraintes, il peut prédire les changements macro de distribution piétonne spatio-temporelle, de charge des équipements, de pression sur le réseau de transport et de bénéfices sociaux. Il peut aussi entrer dans le mécanisme micro en suivant les changements des chaînes de déplacement individuelles, du temps moyen de trajet et des écarts d'accessibilité entre groupes sociaux en réponse aux transformations spatiales. Ce double regard sur phénomènes macro et attribution micro fait passer l'évaluation de la planification d'une comparaison statique des schémas à une compréhension dynamique des réponses comportementales, fournissant une base décisionnelle issue de la simulation des systèmes complexes pour identifier la stratégie optimale d'allocation des ressources et équilibrer efficacité et équité.

Deuxièmement, il soutient une évaluation fine des interventions politiques, en particulier le test quantitatif de politiques souples non spatiales. En ajustant dans le modèle des règles temporelles, comme les horaires d'ouverture des équipements, des leviers de prix, comme les réductions horaires, ou

des paramètres d'autorisation, comme les services réservés à certains groupes, il devient possible de simuler et de prévoir les effets de transmission des stratégies de gestion sur les comportements des habitants et la performance du système. Le modèle peut, par exemple, calculer précisément l'effet de l'extension des horaires nocturnes des équipements communautaires sur leur usage par les actifs, ou évaluer comment les subventions de prix améliorent les opportunités d'activité des ménages à faible revenu. Cette capacité à traduire des politiques abstraites en paramètres ajustables et à conduire des expériences de politique publique permet aux décideurs d'anticiper les conséquences complexes avant mise en oeuvre, d'optimiser l'intensité et les cibles des interventions et d'améliorer la précision, l'efficacité et l'inclusivité de l'action publique.

4 Perspectives de recherche

Cette étude construit un modèle quadripartite - individus, activités, temps et espace - pour la simulation spatio-temporelle par agents des cercles de vie communautaires. Elle intègre de manière innovante la capacité du modèle Logit mixte à analyser l'hétérogénéité individuelle et la capacité du modèle à base d'agents à simuler l'émergence interactive, et propose trois perspectives clés pour l'analyse des interactions. Premièrement, l'interaction subjectif-objectif entre individus et espace : le Logit mixte étiquette les préférences différenciées des agents résidents par les distributions d'hétérogénéité des paramètres, puis la modélisation à base d'agents simule les régularités spatio-temporelles, la différenciation spatiale et les mécanismes d'interaction entre individus différenciés et espace. Deuxièmement, l'interaction inter-échelles entre décisions individuelles micro et motifs collectifs macro : la simulation spatio-temporelle par agents peut révéler comment des décisions individuelles locales et micro interagissent de manière non linéaire et génèrent des motifs spatio-temporels macro ordonnés. Des expériences contrôlées peuvent ensuite identifier les facteurs clés et seuils effectifs qui guident la formation des motifs. Troisièmement, l'interaction à court et long terme entre personnes et espace : à court terme, le modèle analyse les activités de population à différents moments de la journée et leurs usages de l'espace ; à long terme, la collecte de données historiques et la simulation de scénarios permettent d'analyser les changements d'activités et de structure spatiale sous l'effet des transformations démographiques, des technologies de l'information et des politiques. À travers ces trois perspectives, le modèle décrit précisément les différences individuelles dans les cercles de vie, explique les mécanismes d'interaction entre individus et espace et prédit de manière prospective la performance de la planification et des services. Il fournit ainsi un soutien décisionnel centré sur l'humain pour l'usage efficace de l'espace, l'amélioration de la performance des services et la création de vitalité communautaire.

La présente étude réalise principalement la construction du cadre, l'inférence des mécanismes et l'intégration méthodologique. Pour renforcer réellement une pratique de planification des cercles de vie applicable et centrée sur l'humain, deux directions de recherche restent nécessaires. Premièrement, l'acquisition approfondie des données individuelles d'activité spatio-temporelle et l'expression de l'hétérogénéité. Les données micro spatio-temporelles à grande échelle font aujourd'hui face à un triple dilemme entre étendue, précision et profondeur. Les percées futures résident dans l'intégration de données spatio-temporelles multi-granulaires et multimodales, combinant des trajectoires GPS et journaux d'activités de haute précision et riches sémantiquement avec des données de signalisation mobile à large couverture. Sur cette base, l'apprentissage automatique et l'inversion des données peuvent reconstruire les attributs complets et la sémantique des activités d'individus à grande échelle,

extraire des étiquettes numériques de comportement stable et les intégrer comme variables latentes dans le modèle Logit mixte. Cela permettrait une modélisation de bout en bout des données, comportements et préférences, rendant les choix spatiaux hétérogènes mesurables et explicables. Deuxièmement, la simulation dynamique de l'interaction bidirectionnelle homme-espace et de l'évolution de long terme. Les modèles existants décrivent encore imparfaitement la boucle de rétroaction par laquelle les personnes influencent l'espace et l'espace reconfigure les personnes, ainsi que les mécanismes évolutifs de long terme. Au niveau micro, des méthodes comme les réseaux de neurones récurrents (RNN) peuvent décrire comment les activités individuelles s'accumulent et rétroagissent sur la cognition et l'évaluation spatiales, influençant ensuite les choix. Au niveau macro, les modèles de dynamique des systèmes peuvent être combinés pour simuler les effets longs et non linéaires des changements démographiques, du renouvellement de l'environnement bâti et des politiques de planification, afin d'évaluer les impacts durables des interventions. Avec ces extensions, il sera possible de construire un modèle spatio-temporel par agents qui non seulement explique les mécanismes complexes d'interaction individu-espace, mais simule et évalue aussi les bénéfices à long terme des schémas de planification, offrant un noyau méthodologique pour une planification urbaine centrée sur l'humain, calculable et simulable.

Références

- [1] Chai Yanwei, Ta Na. La révolution comportementale dans la géographie chinoise et ses implications théoriques[J]. *Geographical Research*, 2024, 43(9): 2259-2270.
- [2] Wang De, Ren Xiyuan, Hu Yang. Modélisation des décisions comportementales pour la planification urbaine fondée sur le temps et éléments exploratoires depuis Lujiazui à Shanghai[J]. *Urban Planning International*, 2024, 39(3): 40-50.
- [3] SILVA B N, KHAN M, HAN K. Vers des villes intelligentes durables : revue des tendances, architectures, composants et défis ouverts[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2018, 38: 697-713.
- [4] Zhou Suhong, Chai Yanwei, Kwan Mei-Po, et al. Frontières des théories et méthodes de la géographie comportementale en Chine[J]. *Geographical Research*, 2024, 43(9): 2235-2258.
- [5] ELLEGARD K. Penser la géographie temporelle : concepts, méthodes et applications[M]. London, UK: Routledge, 2018.
- [6] Wu Zhiqiang, Wang Kai, Chen Wei, et al. Discussion académique sur la pensée innovante pour la gouvernance fine de l'espace communautaire[J]. *Urban Planning Forum*, 2020(3): 1-14.
- [7] Sun Yiyuan, Feng Jian. Cadre de recherche sur l'interaction entre vie quotidienne et espace sous l'influence des technologies de l'information et de la communication[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2025, 80(8): 2055-2071.
- [8] Zhang Yan, Chai Yanwei. Le tournant de la géographie temporelle vers les recherches sur le système projet-activité[J]. *Progress in Geography*, 2022, 41(1): 53-63.
- [9] CHEN B Y, LUO Y B, et al. Modèle de données spatio-temporel et structure d'index pour la géographie temporelle computationnelle[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2023, 37(3): 550-583.
- [10] Li Chunjiang, Chai Yanwei, Li Yanxi, et al. Recherche exploratoire sur un système de classification projet-activité[J]. *Geographical Research*, 2024, 43(9): 2295-2307.
- [11] SADOWSKI J. Cyberspaces et paysages urbains : sur l'émergence de l'urbanisme de plateforme[J]. *Urban Geography*, 2020, 41(3): 448-452.

- [12] SHAW S L. La géographie temporelle dans un monde hybride physique-virtuel[J]. *Journal of Geographical Systems*, 2023, 25(3): 339-356.
- [13] Liu Quan, Qian Zhenghan, Huang Dingfang, et al. Caractéristiques d'évolution et tendances des motifs spatiaux du cercle de vie communautaire de 15 minutes[J]. *Urban Planning Forum*, 2020(6): 94-101.
- [14] Huang Huiming, Zhou Dailin, Wang Ye. Modèles d'organisation spatiale des cercles de vie communautaires fondés sur la morphologie résidentielle : éléments depuis Guangzhou[J]. *Urban Planning Forum*, 2021(2): 94-101.
- [15] Shen Yuhui, Tong Ziyu. Méthodes d'évaluation de la commodité du cercle de vie communautaire à l'échelle humaine[J]. *South Architecture*, 2022(7): 72-80.
- [16] Cai Xingfei, Wang Hao, Li Li, et al. Évaluation des cercles de vie communautaires : pratiques d'application, défis et perspectives[J]. *Planners*, 2023, 39(5): 47-52.
- [17] KIM H M, KWAN M P. Mesures d'accessibilité spatio-temporelle : algorithme géo-computationnel centré sur l'ensemble faisable d'opportunités et la durée possible d'activité[J]. *Journal of Geographical Systems*, 2003, 5(1): 71-91.
- [18] YIN L, SHAW S L. Exploration des trajectoires spatio-temporelles dans les espaces de proximité physique et sociale : approche SIG spatio-temporelle[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2015, 29(5): 742-761.
- [19] Liao Jingying, Lin Yaoyu, Xiao Zuopeng, et al. Modèle conceptuel et mesure de l'espace accessible en temps réel fondés sur le prisme spatio-temporel[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2024, 79(4): 931-948.
- [20] Niu Xinyi, Lin Shijia. Données massives spatio-temporelles dans les recherches de planification urbaine : évolution technologique, questions de recherche et tendances de frontière[J]. *Urban Planning Forum*, 2022(6): 50-57.
- [21] Chai Yanwei, Li Chunjiang, Xia Wanqu, et al. Modèle de délimitation des cercles de vie communautaires urbains : données du sous-district de Qinghe à Beijing[J]. *Urban Development Studies*, 2019, 26(9): 1-8.
- [22] Liang Hong, Ju Qiuwen, Chai Yanwei, et al. Mesurer et classer la structure spatiale des cercles de vie urbains multi-niveaux du point de vue du comportement spatio-temporel : données de Beijing[J]. *Shanghai Urban Planning Review*, 2025(3): 49-58.
- [23] Zhang Shanqi, Zhen Feng, Kong Yu, et al. Évaluation et configuration optimale des équipements de service du cercle de vie communautaire sur la base de l'interaction entre espaces virtuel et physique : progrès et perspectives[J]. *Journal of Natural Resources*, 2023, 38(10): 2435-2446.
- [24] Wang De, Hu Yang. Planification des comportements urbains spatio-temporels : concepts, cadre et perspectives[J]. *Urban Planning Forum*, 2022(1): 44-50.
- [25] Zou Sicong, Zhang Shanqi, Zhen Feng. Mesure de l'espace d'activité quotidienne communautaire et facteurs de vitalité à partir du comportement spatio-temporel des habitants : données des sous-districts de Shazhou et Nanyuan à Nanjing[J]. *Progress in Geography*, 2021, 40(4): 580-596.
- [26] Zhang Wenjia, Lu Daming. Revue de la mesure de l'environnement bâti et des recherches empiriques affectant le comportement spatio-temporel[J]. *Urban Development Studies*, 2019, 26(12): 9-16.
- [27] TAO T, WANG J, CAO X. Exploration des associations non linéaires entre attributs spatiaux et distance de marche vers les transports publics[J]. *Journal of Transport Geography*, 2020, 82: 102560.

- [28] Tao Yinhua, Chai Yanwei, Yang Jie. Une perspective comportementale spatio-temporelle sur les modes de vie sains des habitants urbains[J]. *Human Geography*, 2021, 36(1): 22-29.
- [29] Luo Xueyao, Zhang Wenjia, Chai Yanwei. Effets de seuil de l'environnement bâti dans les cercles de vie de 15 minutes[J]. *Geographical Research*, 2022, 41(8): 2155-2170.
- [30] Zhang Xue, Chai Yanwei. Cadre de recherche sur la différenciation sociale dans les communautés d'habitat mixte à partir du comportement spatio-temporel[J]. *Human Geography*, 2022, 37(6): 39-46.
- [31] Zhao Meifeng, Zhang Lanqing, Wang Degen. Différenciation et facteurs d'influence de l'allocation des équipements publics urbains du point de vue du cercle de vie : comparaison de villes de tailles différentes dans la région Beijing-Tianjin-Hebei[J]. *Urban Development Studies*, 2024, 31(10): 77-86.
- [32] Zhang Yan, Chai Yanwei. La "nouvelle" géographie temporelle : recherches innovantes de l'équipe de Kajsas en Suède[J]. *Human Geography*, 2016, 31(5): 19-24.
- [33] LATHAM A. Diagrammer le social : explorer l'héritage des paysages diagrammatiques de Torsten Hägerstrand[J]. *Landscape Research*, 2020, 45(6): 699-711.
- [34] Ta Na, Chai Yanwei, Kwan Mei-Po. Mesure comportementale et interaction espace-comportement dans les modes de vie quotidiens des résidents suburbains de Beijing[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(8): 1271-1280.
- [35] ZHANG S Q, YANG Y, ZHEN F, et al. Comprendre les comportements de déplacement et les motifs d'activité des populations vulnérables à partir de données de cartes intelligentes : une approche fondée sur l'espace d'activité[J]. *Journal of Transport Geography*, 2021, 90: 102938.
- [36] Jiao Jian, Wang De, Cheng Ying. Motifs d'activité quotidienne et caractéristiques des populations pauvres en temps à Shanghai[J]. *City Planning Review*, 2023, 47(4): 31-44.
- [37] He Jiaming, Zhou Suhong, Xie Xuemei. Objectifs des déplacements quotidiens et facteurs d'influence des habitantes de Guangzhou du point de vue de la géographie féministe[J]. *Geographical Research*, 2017, 36(6): 1053-1064.
- [38] GIURGE L M, WHILLANS A V, WEST C. Pourquoi la pauvreté en temps importe pour les individus, les organisations et les nations[J]. *Nature Human Behaviour*, 2020, 4: 993-1003.
- [39] KWAN M P. Les limites de l'effet de voisinage : incertitudes contextuelles dans les recherches géographiques, de santé environnementale et de sciences sociales[J]. *Annals of the American Association of Geographers*, 2020, 108(6): 1482-1490.
- [40] MUURISEPP K, JARV O, TAMMARU T, et al. Espaces d'activité et sources de données massives dans les recherches sur la ségrégation : revue méthodologique[J]. *Frontiers in Sustainable Cities*, 2022, 4: 861640.
- [41] Wei Yue, Yang Dongfeng. Effets de l'environnement bâti du quartier et de la destination sur les opportunités d'activité quotidienne des personnes âgées : perspectives de perception et de participation[J]. *Progress in Geography*, 2023, 42(1): 89-103.
- [42] YUAN Y H, XU Y. Modéliser les espaces d'activité avec de grandes données géographiques : progrès et défis[J]. *Geography Compass*, 2022, 16(11): e12663.
- [43] Niu Qiang, Yi Shuai, Gu Chongtai, et al. Nouveaux concepts et méthodes de fourniture d'équipements de service dans les cercles de vie communautaires en ligne et hors ligne : données de Wuhan[J]. *Urban Planning Forum*, 2019(6): 81-86.

- [44] Wu Lei, Niu Qiang, Ajaibibula Ainiwar, et al. Cercles de vie communautaires en ligne et hors ligne intégrant espaces virtuels et physiques : mise à niveau itérative et exploration planificatrice[J]. Urban Planning Forum, 2024(2): 25-33.
- [45] ARRANZ-LOPEZ A, SORIA-LARA J A. Usage des TIC et fragmentation spatiale de la participation aux activités dans les sociétés urbaines post-Covid-19[J]. Land Use Policy, 2022, 120: 1-11.
- [46] Yuan Zehao, Luo Yubo, Zhang Yu, et al. Méthodes et applications de construction des espaces d'activité individuels à partir d'ancres d'activité[J]. Journal of Geo-information Science, 2025, 27(11): 2652-2669.
- [47] OMER I, KAPLAN N. Propriétés structurelles des centralités angulaires et métriques du réseau viaire et implications pour les flux de déplacement[J]. Urban Analytics and City Science, 2019, 46(6): 1182-1200.
- [48] Che Guanqiong, Qiu Baoxing, Wang Yitian, et al. Planification du cercle de vie communautaire fondée sur la simulation de l'activité de marche des habitants : cadre de recherche et questions[J]. Journal of Human Settlements in West China, 2024, 39(2): 139-143.
- [49] Che Guanqiong, Lan Xu, Wang Yitian. Optimisation spatiale des zones résidentielles du cercle de vie sous simulation de la marche des habitants[J]. South Architecture, 2025(2): 21-29.
- [50] Zhou Zhifei. Inadéquation population-espace dans les espaces publics des anciennes communautés et réponses de conception[J]. Urban Problems, 2021(6): 25-33.
- [51] YANG S Q, DANE G, ARENTZE T A. Modèle à base d'agents pour simuler les expériences affectives et les activités des piétons en vue d'évaluer le design des espaces publics urbains[J]. Cities, 2025, 166: 106292.
- [52] WOLPERT L, OMER I. Analyse comparative des modèles de volume piétonnier : modèles à base d'agents, méthodes d'apprentissage automatique et régression multiple[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2025, 117: 102238.

Traduction assistée par l'intelligence artificielle