

Couplage multirisque dans l'espace urbain et réponses résilientes par la planification

PENG Chong, ZUO Peiwen, LI Yuewen, ZHANG Mengjie

Résumé. À mesure que la population et les activités urbaines se concentrent à forte densité, les villes sont confrontées à des défis croissants liés au couplage de risques multiples. Le risque urbain est entré dans une « phase 3.0 », caractérisée par la coexistence et l'interaction de pressions durables et de perturbations soudaines devenues récurrentes. Le couplage multirisque est ainsi devenu un thème majeur de la recherche sur la résilience urbaine. Face aux défis du développement urbain futur, cet article examine les caractéristiques et scénarios du couplage multirisque, ses effets spatiaux, ses mécanismes et les pratiques de planification correspondantes. Il identifie ensuite les principales dimensions théoriques de la résilience sous risques couplés : interactions entre résilience écologique, sociale, technique et économique ; cycles longs et courts ; seuils de résilience ; et transmission entre échelles. Sur cette base, il propose un cadre de planification territoriale résiliente et précise les priorités de résilience pour les plans directeurs, détaillés et spécialisés. Enfin, il présente les orientations techniques de la planification future, notamment la collecte et le traitement d'informations multisources, l'évaluation de la superposition et du couplage des risques, la déduction de scénarios et la simulation, ainsi que la planification assistée par l'intelligence artificielle et le suivi de la mise en œuvre. L'étude fournit des références théoriques et des orientations méthodologiques pour la planification et la construction de villes résilientes dans la nouvelle ère.

Mots-clés : multirisque spatial urbain ; couplage des risques ; résilience urbaine ; planification spatiale

Classification de la Bibliothèque chinoise : TU984 Code du document : A DOI :
10.16361/j.upf.202405012 Numéro de l'article : 1000-3363 (2024) 05-0088-10

* Recherche soutenue par le Programme général de la Fondation nationale des sciences naturelles de Chine, « Effets spatiaux, mécanismes de résilience et régulation par la planification du couplage multirisque dans les zones urbaines à forte densité : étude de Wuhan » (projet no 52378057), et par le Programme de soutien à la recherche interdisciplinaire de l'Université des sciences et technologies de Huazhong, « Mécanismes de rétroaction homme-territoire, optimisation spatiale et régulation des politiques des systèmes urbains-ruraux dans des scénarios d'inondation extrême : étude de la région métropolitaine de Wuhan » (projet no 2023JCYJ020).

L'incertitude liée aux risques urbains s'intensifie en Chine, et le développement spatial de haute qualité est de plus en plus confronté à des défis de sécurité et de résilience. La construction d'un espace territorial résilient, capable de faire face à des risques multiples, est donc devenue une mission importante de la planification spatiale au service de la modernisation chinoise.

L'évolution des risques spatiaux peut être divisée en trois grandes étapes (figure 1). Lors de la phase 1.0, le principal défi de la résilience urbaine concernait les risques durables, c'est-à-dire la capacité à faire face à des pressions internes de long terme telles que les changements de végétation et la dégradation écologique. Il s'agissait d'événements de type « rhinocéros gris », relativement prévisibles. La phase 2.0 a porté l'attention sur les événements extrêmes ou les risques soudains, qualifiés de « cygnes noirs », notamment les catastrophes naturelles telles que les pluies extrêmes et les aléas géologiques, ainsi que les catastrophes d'origine humaine comme les incendies urbains et les accidents impliquant des substances dangereuses. La Chine est désormais entrée dans la phase 3.0, caractérisée par la normalisation des risques. Dans l'ère post-pandémique, la densification urbaine s'accroît et fait coexister pressions durables et perturbations soudaines. Leur fréquence temporelle se normalise tandis que leurs types spatiaux deviennent de plus en plus couplés. Les risques multiples et incertains produisent

des réactions en chaîne complexes : l'interaction entre les facteurs de risque peut transformer un danger isolé en dommage systémique et cyclique, entraînant des pertes nettement plus graves.

Plusieurs questions scientifiques exigent donc une attention soutenue dans la planification spatiale actuelle et future. Premièrement, quelles sont les spécificités des caractéristiques et régularités du couplage multirisque dans l'espace urbain ? Deuxièmement, quels effets spatiaux et mécanismes ce couplage génère-t-il ? Troisièmement, quels sont les principaux éléments théoriques des réponses résilientes ? Quatrièmement, comment le système actuel de planification spatiale peut-il définir les priorités et orientations techniques de la résilience ? Suivant la démarche « fondements de la recherche sur le couplage multirisque – théorie de la résilience urbaine face aux risques couplés – planification spatiale résiliente et orientations techniques », cet article passe en revue les concepts, scénarios, effets spatiaux, mécanismes et pratiques de planification, puis propose des éléments théoriques et des réponses planificatrices préliminaires pour la recherche et la pratique futures.



Figure 1. Trois phases du développement des risques urbains et défis correspondants pour la résilience

1 Fondements théoriques et expériences de planification relatifs au couplage multirisque dans l'espace urbain

1.1 Caractéristiques conceptuelles et scénarios du couplage multirisque

Le concept le plus étroitement associé au risque est celui d'aléa, mais la littérature ne s'accorde pas pleinement sur la distinction entre les deux. Un aléa urbain est une perturbation provoquée par un facteur dangereux et entraînant des pertes physiques dans un cadre spatio-temporel déterminé. Le risque urbain désigne, quant à lui, la probabilité que les relations complexes de couplage entre l'environnement naturel, la structure fonctionnelle, la société humaine et les autres systèmes urbains produisent des événements dommageables [1]. L'aléa se concentre ainsi sur l'événement, son évolution et les pertes qui en résultent ; le risque porte sur l'incertitude des pertes et peut, dans une certaine mesure, être quantifié [2-3].

Les chercheurs ont depuis longtemps observé la coexistence de risques multiples dans certains territoires et certaines périodes [4]. Le multirisque spatial urbain décrit une situation dans laquelle plusieurs sources d'aléa et plusieurs éléments vulnérables se superposent dans le temps ou l'espace [5-6]. Il se caractérise par une diversité des domaines et une coexistence temporelle (tableau 1). La diversité des domaines comprend les risques naturels, technologiques, économiques, sociaux et politiques ; la coexistence temporelle englobe les pressions de long terme et les perturbations soudaines [7].

Les interactions entre risques multiples ont suscité une attention soutenue au cours de la dernière décennie, et des progrès considérables ont été accomplis dans l'analyse de l'évolution et des caractéristiques des chaînes de catastrophes typiques [15-17]. En Chine, les réactions en chaîne fréquentes comprennent « typhon – fortes pluies – engorgement/inondation », « séisme – glissement de terrain/coulée de débris », « forte chaleur – sécheresse – dégradation des sols/ravageurs et maladies » et « vague de froid – catastrophe neigeuse/gel biologique ». Du point de vue spatial, l'environnement urbain

détermine largement les trajectoires de transmission et les formes de couplage des risques, amplifiant ainsi les effets potentiels des catastrophes [18-19]. Les villes diffèrent par leur exposition aux aléas et par la sensibilité de leur environnement spatial ; l'évolution dynamique des risques varie donc également. Les chaînes de catastrophes, la coïncidence d'aléas, les effets en cascade, les effets induits et les effets domino sont autant de manifestations du couplage multirisque [18,20-23]. Ils traduisent des relations d'influence et de dépendance entre facteurs de risque au sein d'un système complexe, susceptibles d'intensifier l'évolution du risque et les pertes potentielles.

Selon le mode de déclenchement, le couplage multirisque peut être cumulatif ou soudain. Selon le type de risque, il peut relever d'interactions entre risques naturels, entre risques anthropiques, ou entre risques naturels et anthropiques. Les recherches sur ces dernières interactions restent relativement peu nombreuses, bien que les risques naturels-technologiques (Natech) et les risques naturels-sociaux soient fortement interdépendants et puissent engendrer des pertes secondaires très graves [18]. Des facteurs de risque pris séparément ne sont pas nécessairement extrêmes ; c'est leur interaction qui peut produire un événement extrême. Les situations dans lesquelles plusieurs événements surviennent simultanément ou successivement sont appelées événements extrêmes composés. En raison du couplage intrinsèque des risques, leurs effets spatiaux dépassent souvent la simple addition d'événements extrêmes séparés et menacent davantage les différents sous-systèmes vitaux de la ville [24-26].

Tableau 1. Concepts et significations liés au multirisque

Concept	Définition	Sources
Aléa	Phénomène physique causant des dommages à l'économie urbaine, aux infrastructures, à la vie des habitants, aux services sociaux ou à l'environnement écologique.	UNISDR, 2009 ; IPCC, 2012 ; Gallina et al., 2016.
Risque	Expression quantitative des conséquences potentielles d'un événement dangereux pour l'espace urbain, formulée en termes probabilistes ou semi-quantitatifs.	IPCC, 2012 ; Gallina et al., 2016.
Multialéa	Événements dangereux menaçant les mêmes éléments exposés et interagissant de différentes manières ; aléas associés au même espace, survenant simultanément ou se succédant dans un bref intervalle.	Saارين et al., 1973 ; Carpignano et al., 2009 ; Marzocchi et al., 2012 ; Komendantova et al., 2014 ; Terzi et al., 2019.
Risque multialéa	Risque généré par plusieurs facteurs dangereux, généralement sans prise en compte des corrélations entre niveaux de vulnérabilité.	Kappes et al., 2012 ; Ward et al., 2022.
Multirisque	Risque généré par des facteurs dangereux indépendants ou interdépendants et par plusieurs éléments vulnérables se superposant dans le temps et l'espace. Un risque modifie la probabilité, la fréquence ou l'ampleur d'un autre, et les corrélations entre niveaux de vulnérabilité sont généralement prises en compte.	Carpignano et al., 2009 ; Kappes et al., 2012 ; Marzocchi et al., 2012 ; de Ruiter et al., 2020 ; Ward et al., 2022.

Source : compilation d'après les références [5-6, 8-14].

1.2 Pratiques de planification face aux risques multiples

Le couplage multirisque a été pris en compte dans la planification spatiale de plusieurs villes à l'étranger. Des stratégies de mise en œuvre ont été proposées à travers les plateformes d'information, la construction de communautés résilientes, les infrastructures urbaines et d'autres dimensions. Certains

plans, notamment ceux de Los Angeles et de Londres, distinguent les pressions de long terme des chocs soudains et organisent la prévention en conséquence. Dans l'ensemble, toutefois, les théories et méthodes d'évaluation et de gestion multirisques restent insuffisantes, et les plans spatiaux existants abordent rarement en profondeur les effets de couplage (tableau 2).

Depuis 2015, les programmes pilotes de villes-éponge et de villes adaptées au changement climatique ont encouragé en Chine le développement progressif d'une planification spatiale orientée vers la résilience. La plupart des villes considèrent désormais la sécurité résiliente comme un enjeu majeur du plan directeur. Le Plan spatial spécialisé de Beijing pour une ville résiliente (2022-2035), par exemple, intègre des réponses à plusieurs risques. La pratique de planification face aux risques couplés demeure néanmoins exploratoire (tableau 3).

Tableau 2. Pratiques représentatives de planification spatiale face aux risques multiples dans le monde

Ville	Politique de résilience	Année	Risques typiques	Objectifs et domaines prioritaires	Réponse multirisque
Rotterdam	Stratégie de résilience de Rotterdam	2017	Élévation du niveau de la mer, inondations, pluies extrêmes	Mettre en place des systèmes de protection contre les inondations et de drainage ; améliorer le partage sécurisé des données urbaines ; favoriser l'innovation sociale et la participation.	Met l'accent sur les aléas naturels liés à l'eau, en particulier les inondations, et sur l'adaptation climatique.
Los Angeles	Resilient Los Angeles	2018	Séismes, incendies, coulées de débris, vagues de chaleur	Leadership et participation du public ; préparation et rétablissement après catastrophe ; sécurité économique ; adaptation climatique ; modernisation des infrastructures.	Construit une plateforme d'information multialéas destinée aux habitants ; réforme la coopération gouvernementale ; renforce et protège les communautés afin de faire face aux catastrophes inattendues et aux pressions latentes de long terme.
New York	OneNYC 2050 : construire une ville forte et équitable	2019	Réchauffement climatique, inondations, surcotes, élévation du niveau de la mer, chaleur urbaine	Faire face au changement climatique à long terme ; éliminer la dépendance aux combustibles fossiles ; alimenter les bâtiments, les transports et l'économie par des énergies renouvelables.	Analyse les risques urbains composés, notamment la crise climatique, les risques économiques et les pressions sociales.
Londres	Stratégie de résilience urbaine de Londres 2020	2020	Inondations persistantes, sécheresse, chaleur extrême	Prendre en compte les catastrophes soudaines et développer une capacité urbaine plus large et plus durable de	Examine les risques à court et à long terme ; identifie chocs et pressions. Le changement climatique constitue le principal choc,

Ville	Politique de résilience	Année	Risques typiques	Objectifs et domaines prioritaires	Réponse multirisque
				résistance aux risques.	tandis que les inégalités et le manque d'intégration sociale sont des pressions majeures.
Singapour	Singapore Green Plan 2030	2021	Pluies extrêmes, sécheresse, épidémies	Cinq piliers : ville dans la nature, transition énergétique, mode de vie durable, économie verte et avenir résilient.	Renforce la résilience aux changements environnementaux et aux pluies/inondations par les espaces verts et des mesures comme le programme Cooling Singapore.
Chicago	Chicago Climate Action Plan	2022	Étés très chauds, hivers extrêmes, brouillard, inondations, pluies intenses, tornades	Réduire les effets de l'incertitude future et s'adapter durablement et équitablement au changement climatique.	Identifie les risques avec des partenaires au-delà des frontières municipales et élabore des plans adaptés aux inondations, aux hivers extrêmes, aux tornades et à d'autres aléas naturels.
Tokyo	Plan fondamental de résilience nationale	2023	Séismes, tsunamis, typhons, inondations, incendies, épidémies	Protéger les personnes ; maintenir les fonctions vitales ; réduire les pertes de biens nationaux et d'équipements publics ; restaurer et reconstruire rapidement.	Renforce la prévention locale, applique activement les technologies numériques et autres innovations, et améliore à la fois la réponse aux catastrophes naturelles et l'exécution de la politique nationale de résilience.

Source : compilation d'après des informations publiques disponibles en ligne.

Tableau 3. Exemples de pratiques chinoises de planification spatiale face aux risques multiples

Ville	Politique de planification	Année	Risques typiques	Objectifs et domaines prioritaires	Réponse multirisque
Beijing	Plan directeur de Beijing (2016-2030)	2016	Inondations, incendies de forêt, aléas géologiques	Propose des voies de construction d'une ville résiliente du point de vue du système urbain et de la gestion de la résilience.	Établit un système unifié d'évaluation, de suivi et d'alerte précoce des risques de catastrophe.
Beijing	Avis directeurs sur l'accélération de la construction d'une ville résiliente	2021	Inondations, incendies de forêt, aléas géologiques	Coordonne l'extension de la résilience spatiale, renforce la résilience technique, améliore la résilience de la gestion urbaine et cultive la résilience sociale.	Renforce l'analyse des aléas simultanés et des chaînes de catastrophe et améliore les cartes de risques urbains.
Beijing	Plan spatial spécialisé de Beijing pour une	2024	Inondations, incendies de forêt, aléas	Construit un système spatial de gouvernance de la capitale sûr, fiable,	Répond aux risques extrêmes complexes, promeut les équipements à

Ville	Politique de planification	Année	Risques typiques	Objectifs et domaines prioritaires	Réponse multirisque
	ville résiliente (2022-2035)		géologiques	convertible, rapidement récupérable, organiquement organisé et adapté à l'avenir.	usage ordinaire et d'urgence, et utilise les simulations de catastrophe pour anticiper les mesures spatiales possibles.
Shanghai	Plan directeur de Shanghai (2017-2035)	2018	Typhons, chaleur, inondations	Construit une ville écologique plus durable et résiliente.	Améliore les mécanismes de suivi et d'alerte précoce concernant les multiples aléas urbains.
Shenzhen	Plan spatial d'évacuation et de secours d'urgence de Shenzhen (2021-2035)	2023	Pluies extrêmes, typhons, séismes, aléas géologiques	Analyse systématiquement les risques liés aux catastrophes naturelles, aux accidents, aux urgences sanitaires et aux incidents de sécurité sociale.	Intègre les besoins ordinaires et d'urgence, prend en compte plusieurs aléas et développe des réponses multialéas globales.
Hong Kong	Hong Kong 2030+ : vers une vision et une stratégie de planification au-delà de 2030	2021	Typhons, chaleur extrême, inondations	Renforce les systèmes de ressources bleues et vertes afin de créer une métropole naturelle adaptée au changement climatique et à la biodiversité.	Prend pleinement en compte le changement climatique, la biodiversité et les facteurs environnementaux connexes, et intègre la conception adaptative et résistante au climat dans les nouveaux projets et le renouvellement urbain.

Source : compilation d'après des informations publiques disponibles en ligne.

2 Éléments théoriques de la résilience urbaine face au couplage multirisque

Le terme résilience signifiait initialement « revenir à l'état d'origine ». Il renvoie fondamentalement à la capacité de répondre à une crise, de se rétablir et de poursuivre un développement durable [27-28]. La résilience urbaine étend cette notion aux villes et désigne la capacité d'un système urbain à absorber les perturbations extérieures tout en conservant ses caractéristiques, sa structure et ses fonctions essentielles [29]. Avec l'évolution du concept, l'objectif est passé du « retour à l'état stable » à la « construction d'un état stable », puis à l'« adaptation continue » [30]. Dans la phase 3.0 des risques, l'enjeu central est l'adaptation continue à des risques normalisés. Sur la base de la discussion précédente, cette section identifie les principaux éléments théoriques de la résilience urbaine face aux risques couplés (figure 2).

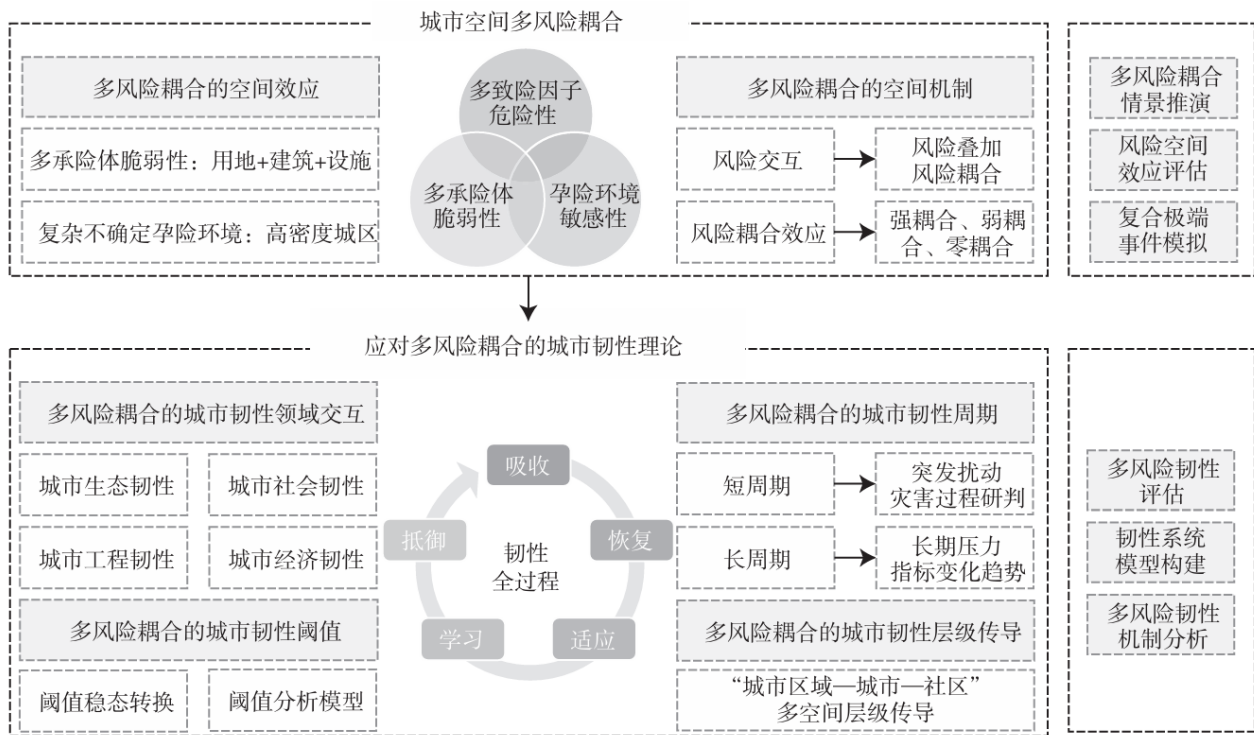


Figure 2. Éléments théoriques de la résilience urbaine face au couplage multirisque

2.1 Effets spatiaux et mécanismes de résilience du couplage multirisque

Le système urbain exposé au risque peut être compris comme trois sous-systèmes spatiaux : les usages du sol, les bâtiments et les équipements. Tous sont soumis aux impacts de risques multiples. Les effets spatiaux du couplage correspondent aux conséquences dommageables produites par l'interaction entre l'intensité des aléas et la vulnérabilité des éléments exposés au sein d'un environnement générateur de risques, par exemple l'effondrement de bâtiments, l'interruption des transports ou la dégradation des infrastructures. Les quartiers d'affaires, les centres-villes et les tissus urbains anciens [31-33] constituent des objets d'étude majeurs, car les zones denses sont des espaces typiques de couplage. La forte densité peut amplifier l'interaction entre risques et aggraver leurs conséquences spatiales.

La diversité des facteurs de risque interagit avec la complexité et l'incertitude des systèmes spatiaux urbains et engendre différents mécanismes composés, notamment la superposition et le couplage. La superposition correspond à l'impact cumulé de plusieurs risques lorsqu'il n'existe pas de relation claire entre les aléas, ou lorsque les relations entre leurs processus peuvent être négligées. Les recherches en planification se sont surtout concentrées sur l'analyse de superpositions multirisques dans des cadres spatio-temporels déterminés. Du point de vue du système de risque, le couplage comprend à la fois l'interaction entre les éléments constitutifs du risque et celle entre les processus d'évolution [21]. Les facteurs appartenant à différents systèmes peuvent accroître, réduire ou annuler les pertes potentielles [34-36], produisant un couplage fort, faible ou nul. Ces relations peuvent être représentées dans une matrice de risques (figure 3). Le mécanisme interne du couplage réside dans l'interdépendance spatio-temporelle entre facteurs dangereux, environnements générateurs de risques et éléments exposés, qui oriente conjointement l'évolution du risque et peut entraîner des pertes plus lourdes [18,37].

La résilience s'exprime tout au long du processus « avant – pendant – après la catastrophe » par la résistance, l'absorption, le rétablissement, l'adaptation et l'apprentissage [38]. Elle est étroitement liée à l'approche du cycle de vie et à la gouvernance de l'ensemble du processus dans la gestion des urgences. Avant la catastrophe, la ville doit réduire la probabilité de survenue ou les pertes potentielles ; pendant la catastrophe, elle doit maintenir la stabilité de son fonctionnement et absorber ou atténuer les chocs ;

après la catastrophe, elle doit se rétablir rapidement et utiliser l'adaptation et l'apprentissage pour renforcer sa capacité à faire face aux risques futurs.

Dans un contexte de couplage multirisque, la résilience urbaine peut être analysée selon trois dimensions : l'intensité des aléas, la sensibilité de l'environnement générateur de risques et la vulnérabilité des éléments exposés (figure 4). La complexité et l'incertitude des systèmes spatiaux urbains rendent certains événements plus susceptibles de se produire dans des environnements particuliers. Le couplage entre intensités d'aléas peut amplifier les menaces pesant sur l'espace urbain, tandis que les éléments exposés, selon leurs profils de vulnérabilité, subissent des effets de couplage différenciés. La résilience face au couplage multirisque concerne donc à la fois la multiplicité des aléas et la vulnérabilité de plusieurs systèmes exposés.

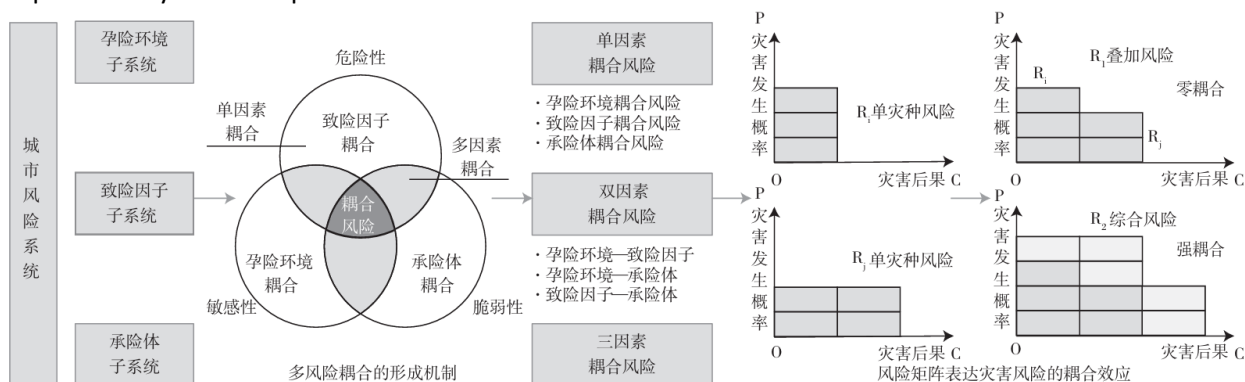


Figure 3. Effets internes des risques urbains couplés

Source : redessiné d'après les références [34-36].

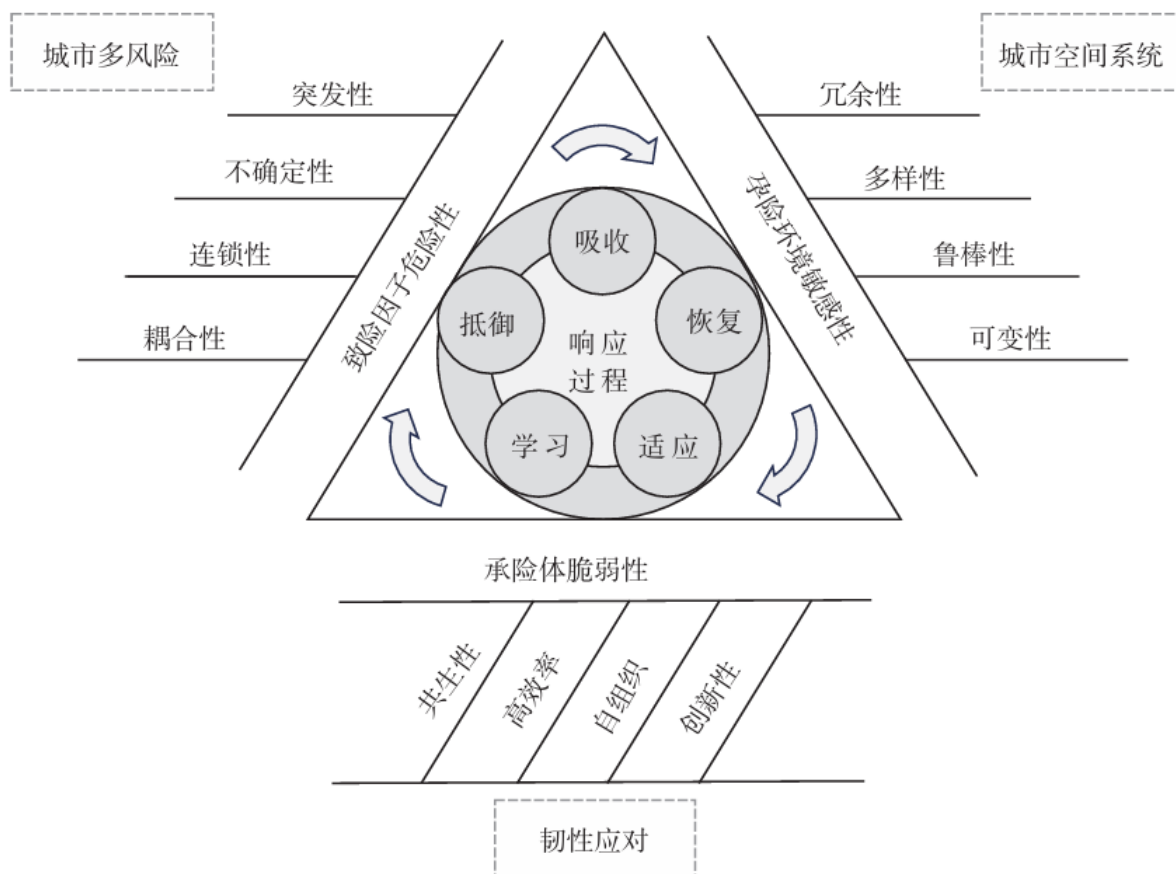


Figure 4. Caractéristiques de la résilience urbaine dans un contexte de couplage multirisque

2.2 Domaines et interactions de la résilience face au couplage multirisque

Les recherches sur la résilience urbaine en planification ont commencé par la seule résilience écologique avant de s'étendre à quatre grands domaines : écologie, société, ingénierie et économie [39]. Dans le domaine écologique, les risques normalisés liés à l'urbanisation et au changement climatique exercent une pression sur les écosystèmes urbains et réduisent leur capacité à fournir des services essentiels. Le couplage multirisque peut provoquer une dégradation écologique, affaiblir le soutien et les rétroactions des écosystèmes à l'activité humaine, et réduire leurs fonctions de régulation en matière d'inondation, de microclimat, d'émissions et de puits de carbone. La restauration des fonctions écologiques et le maintien de la structure urbaine sous risques récurrents sont donc au cœur de la résilience écologique [40-41].

Dans le domaine social, les systèmes humains doivent accroître leur capacité à résister aux risques couplés, tandis que les communautés et les habitants doivent s'adapter aux risques normalisés. La résilience sociale met l'accent sur l'auto-organisation et l'apprentissage, le renforcement des réseaux sociaux, la participation communautaire, l'identité culturelle, l'équité sociale et le bien-être [42-43]. Dans le domaine technique, l'évaluation de la résilience des infrastructures urbaines doit intégrer explicitement le couplage multirisque. La redondance des réseaux vitaux peut améliorer la capacité à faire face aux événements extrêmes composés ; le renforcement de la réactivité des infrastructures vertes est particulièrement important pour réduire les effets spatiaux [44-46]. Dans le domaine économique, les perturbations soudaines exigent des structures productives diversifiées, des réseaux de facteurs connectés et des chaînes industrielles, logistiques et d'innovation sûres et fiables. Sous les pressions de long terme, la résilience dépend de la capacité à répondre aux crises financières ou autres et de structures flexibles favorisant la reprise économique [7,47].

Les différents risques et leurs interactions affectent non seulement la résilience de chaque domaine, mais aussi les relations entre domaines. Leur interaction temporelle et spatiale peut provoquer deux types de dommages : des atteintes localisées dans un domaine donné et une détérioration intersectorielle amplifiée par le couplage. Les éléments internes aux quatre domaines s'influencent à des degrés variables et façonnent conjointement l'évolution de la résilience urbaine. L'accessibilité des transports, par exemple, constitue un facteur déterminant de la résilience technique. Elle influence directement les structures spatiales et industrielles, modifie les directions et formes du développement urbain, puis affecte la division du travail et la coopération entre industries. Elle est donc fondamentale pour maintenir un fonctionnement coordonné et durable face aux risques multiples et pour préserver la dynamique endogène de la résilience. À l'inverse, une expansion spatiale excessive et une forte densité peuvent accroître l'instabilité sociale et renforcer les exigences de maintien de l'ordre et de prévention des troubles. Puisque les facteurs dominants diffèrent selon les domaines, la planification de la résilience doit non seulement renforcer chacun d'eux en interne, mais aussi identifier les relations transversales essentielles et optimiser les synergies, afin de former un système spatial urbain mutuellement soutenu et efficace face aux risques couplés.

2.3 Cycles et seuils de résilience sous couplage multirisque

La résilience urbaine évolue de manière cyclique [48-50]. Le modèle du cycle adaptatif constitue une explication classique des cycles de résilience [51-52] : les systèmes urbains se régénèrent et innovent à travers plusieurs phases aux caractéristiques distinctes, produisant une évolution cyclique en spirale. Dans la phase 3.0, les villes sont continuellement soumises à des pressions de long terme et à des perturbations soudaines, tandis que leur résilience évolue simultanément. L'analyse doit donc adopter une perspective à double cycle : un cycle long répondant aux pressions durables et un cycle court répondant aux chocs soudains.

Les changements de cycle court peuvent être observés en identifiant les événements soudains de risques couplés et en interprétant les processus de catastrophe. L'évolution à court terme ne se réduit pas

à la somme d'événements isolés ; elle doit intégrer les effets du couplage. Un cycle court comprend une phase de contraction pendant l'impact et une phase d'expansion pendant le rétablissement. La résistance domine la contraction et atténue les effets spatiaux des risques multiples. La récupération et l'adaptation dominent l'expansion et favorisent le rétablissement, voire une transformation du développement. Toutefois, l'approche par cycles courts peut négliger les changements de long terme à travers plusieurs événements. Le cycle long représente l'expression statistique combinée de nombreux épisodes de risques couplés. Il peut être mesuré par les changements de plusieurs indicateurs sur une longue période, généralement annuelle, afin d'identifier les tendances du niveau et de la croissance de la résilience, de résumer les régularités de long terme et de soutenir la simulation et la prévision. Les cycles courts évaluent la résistance, la récupération et l'adaptation avant et après des chocs particuliers ; les cycles longs utilisent des systèmes d'indicateurs pour mesurer la résilience d'un domaine ou de la ville dans son ensemble. Leur combinaison permet une analyse plus complète de l'évolution spatio-temporelle.

Le seuil de résilience constitue une notion critique pour le couplage multirisque dans l'espace urbain. Les villes sont des systèmes complexes dont la structure, les fonctions et l'état sont façonnés conjointement par de nombreux facteurs. Lorsque certains indicateurs dépassent une plage donnée, le système peut se déséquilibrer, s'effondrer ou se dégrader et ne plus conserver son état antérieur [53]. Du point de vue de la dynamique des systèmes, les fonctions urbaines ne reviennent pas nécessairement à leur état initial ; elles peuvent se stabiliser à un niveau inférieur ou supérieur. À l'image des changements de régime [54-55], une perturbation multirisque fait fluctuer le système de résilience ; lorsque son intensité dépasse un seuil, la ville quitte son état stable actuel et passe à un autre. L'évolution des seuils sous l'effet de risques multiples correspond donc à un changement de régime.

Le couplage peut également écartier les seuils de résilience de l'état initial du système et provoquer des oscillations. Dans une perspective à double cycle, les perturbations soudaines comme les pressions durables peuvent franchir le seuil. À court terme, l'incertitude est forte et les variables rapides peuvent produire un choc puissant modifiant presque instantanément l'état du système. À long terme, le couplage agit plus lentement, mais la pression persistante des variables lentes peut modifier directement le système dès que le seuil est dépassé. Le seuil peut ainsi être défini comme le niveau minimal de résilience permettant le fonctionnement normal de la ville pendant les cycles longs et courts, ou comme l'événement multirisque maximal que le système peut absorber. Les environnements urbains particuliers influencent les conséquences spatiales en modifiant ce seuil. La figure 5 illustre trois résultats possibles du couplage de deux événements : amélioration de la résilience par apprentissage, baisse par dommage ou passage à un état instable.

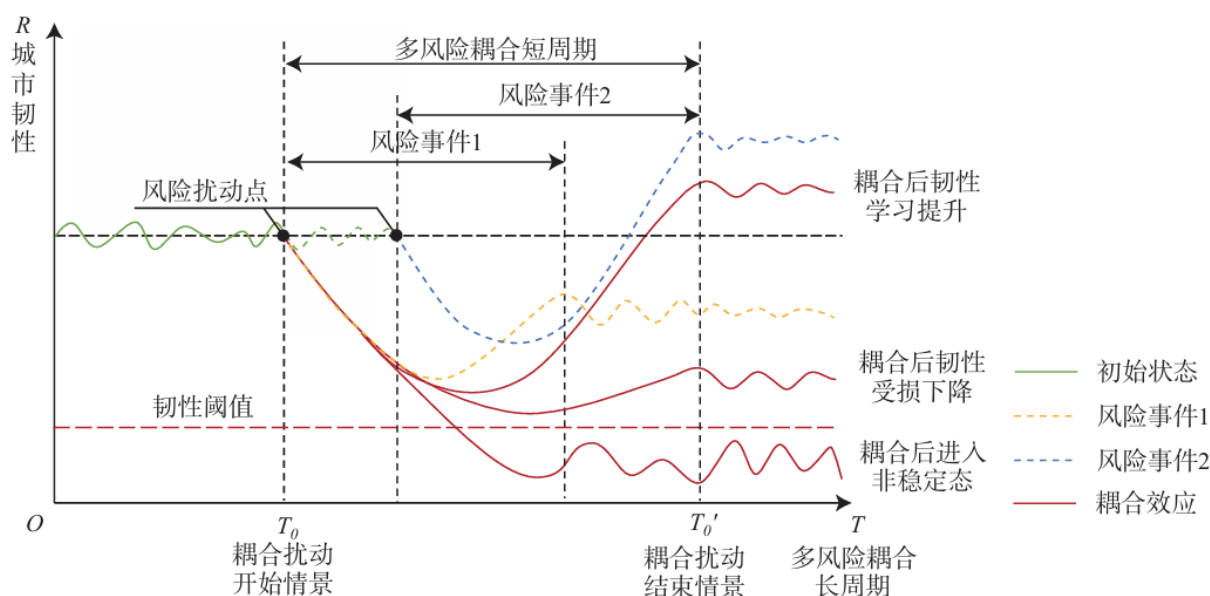


Figure 5. Modèle théorique des cycles de résilience face aux risques multiples

2.4 Niveaux de résilience et transmission interscalaire face au couplage multirisque

La résilience urbaine couvre plusieurs niveaux spatiaux : la région urbaine (agglomération ou aire métropolitaine), la ville et la communauté. Chaque niveau présente des risques, des caractéristiques de résilience et des stratégies de réponse propres, et les interactions entre niveaux sont complexes. Les réseaux de transport et de logistique externes à l'échelle régionale permettent, par exemple, aux villes de répondre efficacement aux risques multiples. À l'échelle urbaine, les abris d'urgence et les réseaux médicaux soutiennent les communautés. Les communautés résilientes peuvent mobiliser leurs organisations et leurs ressources pour aider les secteurs voisins et ainsi améliorer la résilience de l'ensemble de la ville. Ces relations d'influence et de soutien au sein et entre les niveaux forment le fondement de la résilience systémique.

La transmission de la résilience désigne son déplacement et sa diffusion à l'intérieur d'un niveau ou entre différents niveaux. Sur le plan spatial, elle est interscalaire, multidirectionnelle, systémique et interconnectée. Dans une perspective de systèmes complexes, les interdépendances entre niveaux évoluent avec les dynamiques urbaines de long et de court terme face aux événements couplés. La transmission assure soutien et amortissement : lorsqu'un niveau subit un choc, les autres peuvent lui fournir les ressources nécessaires et accélérer son rétablissement. Parce que la résilience multirisque concerne des échelles allant du macro au micro, l'analyse doit prendre en compte les caractéristiques et relations de chaque niveau et la manière dont elles contribuent ensemble à la résilience globale. La planification spatiale peut l'améliorer en identifiant et renforçant systématiquement les capacités propres à chaque échelle et en favorisant coopération et soutien mutuel.

3 Élaboration de plans spatiaux résilients face au couplage multirisque

La théorie de la résilience urbaine face aux risques couplés fournit des orientations à la planification spatiale résiliente. Il importe donc d'examiner comment le principe de sécurité et de résilience multirisque peut être intégré au système chinois de planification territoriale à « cinq niveaux et trois types de plans ». La figure 6 propose un cadre préliminaire.

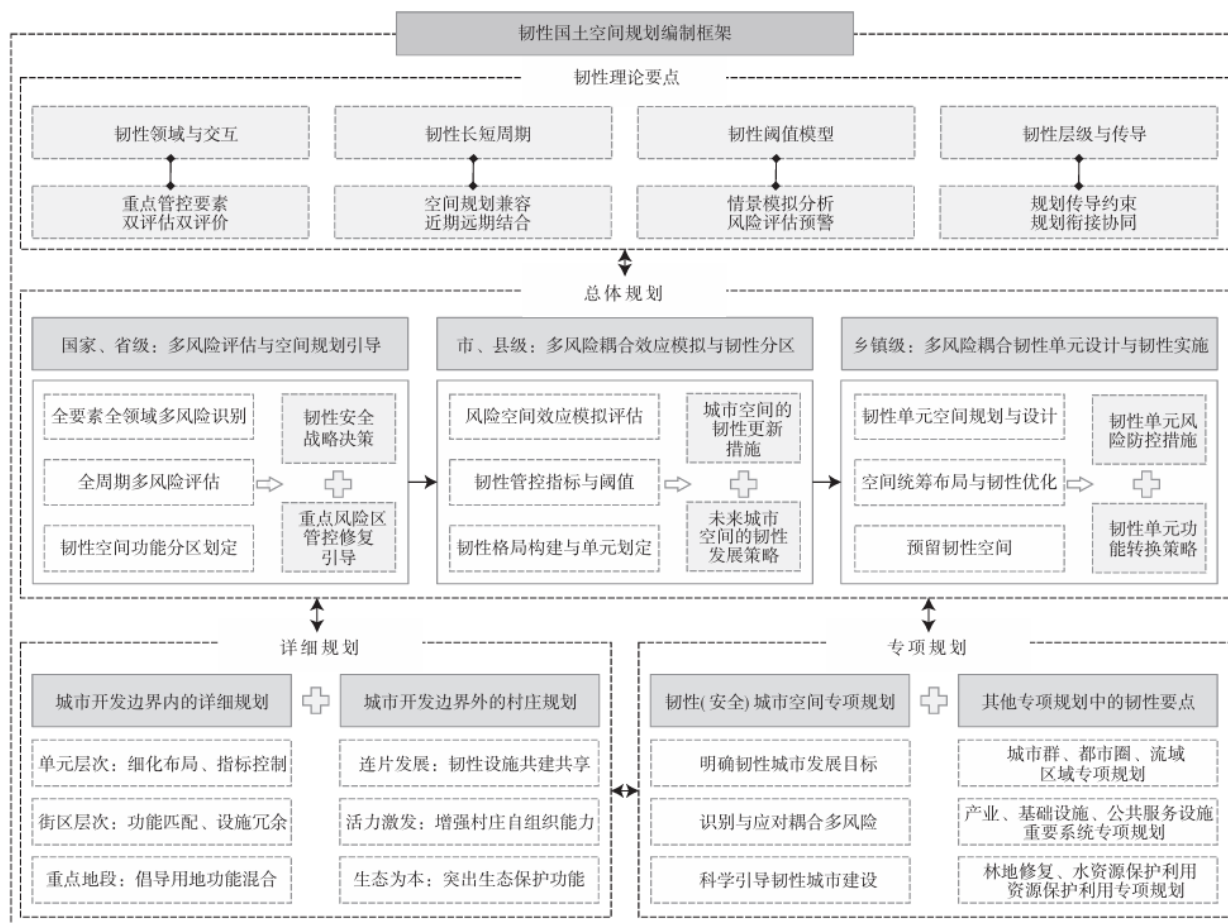


Figure 6. Cadre d'élaboration de la planification territoriale résiliente

3.1 Priorités de résilience dans les plans directeurs

La construction d'un espace territorial résilient face aux risques normalisés est devenue un principe majeur de la planification urbaine. Les plans directeurs nationaux et provinciaux fournissent une orientation stratégique au développement spatial résilient. En coordination avec les stratégies nationales de sécurité et de résilience, les plans provinciaux doivent identifier les risques spatiaux et mener la double évaluation de la capacité de support des ressources et de l'environnement et de l'aptitude au développement. Ils doivent établir une structure régionale résiliente, délimiter des zones fonctionnelles de sécurité territoriale et fournir des orientations générales pour la maîtrise des risques et la restauration écologique, notamment dans les zones prioritaires.

Les plans directeurs municipaux, de district et de canton doivent traduire les stratégies supérieures en mise en œuvre. Aux niveaux municipal et de district, la ville résiliente peut être étudiée comme thème spécifique lorsque cela est nécessaire. Les plans doivent identifier le couplage multirisque et évaluer la résilience sur l'ensemble des éléments, domaines et cycles ; élaborer une carte de base de la sécurité urbaine ; préciser les contraintes minimales et les fonctions de contrôle des indicateurs ; établir des structures polycentriques et en réseau pour le développement et la protection de l'espace ; créer des systèmes écologiques ouverts, continus et connectés ; et délimiter des unités de résilience. Ils doivent identifier les espaces naturels capables d'absorber les catastrophes, promouvoir la restauration écologique, améliorer les fonctions de régulation des écosystèmes et absorber ou atténuer les effets des risques [56]. Ils doivent également renforcer la capacité des équipements à faire face aux risques multiples, améliorer l'adaptabilité et l'efficacité des infrastructures, et formuler des stratégies de renouvellement résilient des espaces existants et de développement résilient des espaces futurs. À l'échelle des cantons, la planification et la conception doivent s'organiser autour d'unités de résilience,

améliorer l'organisation des systèmes spatiaux, accroître l'efficacité des ressources, coordonner les espaces de production, de vie et d'écologie, réserver des espaces flexibles et prévoir des mesures de prévention en temps normal ainsi que des stratégies de conversion fonctionnelle en situation d'urgence. L'ensemble doit former un système de résilience multiniveau et réticulé.

3.2 Priorités de résilience dans les plans détaillés

En 2023, le ministère des Ressources naturelles a publié l'Avis sur le renforcement de la planification détaillée de l'espace territorial, formulant de nouvelles exigences en matière de réforme et de pratique. Les plans détaillés approfondissent et mettent en œuvre les plans directeurs en organisant directement les usages du sol et la localisation des équipements urbains. Ils constituent donc un moyen essentiel de traduire la ville résiliente dans le système spatial urbain. Les environnements et caractéristiques de résilience diffèrent fortement à l'intérieur et à l'extérieur des limites de développement urbain ; les priorités varient donc face aux risques normalisés.

À l'intérieur des limites de développement urbain, la planification à l'échelle de l'unité doit utiliser l'évaluation des risques couplés pour repérer les zones exposées et les points critiques, préciser la localisation des abris, ouvrages de défense civile et autres équipements résilients, et définir les indicateurs de contrôle. À l'échelle de l'îlot, elle doit maintenir un rapport adapté entre population, intensité de construction et forme urbaine ; garantir les infrastructures, les équipements de gestion et de service public, les espaces verts et les places ; accroître raisonnablement la redondance des équipements de résilience ; et assurer la mise en place des infrastructures d'urgence. Dans les secteurs clés, il convient de renforcer la diversité et la transformabilité de l'espace et de promouvoir la mixité fonctionnelle dans les zones de renouvellement urbain, les centres d'activités publiques ainsi que les paysages de montagne ou de bord d'eau.

À l'extérieur des limites de développement urbain, les territoires ruraux constituent des maillons relativement faibles de l'espace résilient. Une planification portant sur plusieurs villages peut encourager la construction et le partage conjoints des équipements et renforcer la transmission horizontale entre territoires de même niveau. Les villages destinés à l'agglomération, à la modernisation ou à l'intégration périurbaine doivent stimuler leur vitalité par la transformation industrielle et l'amélioration environnementale, renforcer leur auto-organisation et réserver des espaces flexibles. Les villages relevant de la protection patrimoniale ou de la relocalisation-consolidation doivent privilégier la conservation écologique et l'amélioration du cadre de vie. Les parcs nationaux, réserves naturelles, zones de captage, terres agricoles et autres espaces écologiques ou productifs soumis à des plans détaillés doivent faire l'objet d'un dépistage des risques d'incendie, géologiques et sismiques, en veillant en priorité à préserver l'intégrité des services écosystémiques.

3.3 Priorités de résilience dans les plans spécialisés

En Chine, les idées de résilience face au couplage multirisque sont aujourd'hui dispersées dans les plans spécialisés relatifs aux villes-éponge, à la prévention et à la réduction intégrées des catastrophes [57], aux équipements publics, aux transports, aux systèmes verts et à d'autres domaines. À la nouvelle étape du développement de la résilience, celle-ci fournit un cadre théorique et des instruments techniques pour traiter les enjeux de sécurité. Une approche couvrant l'ensemble du processus, plusieurs domaines et différentes échelles peut être intégrée à la prévention urbaine grâce à un plan spatial spécialisé pour une ville résiliente ou sûre. La figure 7 présente un cadre initial inspiré des expériences de Beijing et d'autres villes.

Un plan spatial spécialisé pour une ville résiliente doit répondre aux questions communes de la phase 3.0 : quels sont les objectifs de développement d'une ville résiliente ? Comment gérer les risques normalisés afin d'améliorer la résilience ? Comment guider sa structure spatiale ? Le plan peut comprendre cinq tâches : (1) intégrer les données de risque de plusieurs administrations, identifier

systématiquement les risques urbains potentiels, évaluer la résilience et préciser les maillons faibles ; (2) formuler des objectifs prospectifs fondés sur les besoins de long terme en matière de développement et de sécurité, afin de s'adapter aux couplages futurs incertains ; (3) allouer les ressources de manière rationnelle, améliorer la structure, la disposition et le zonage de la ville résiliente, coordonner les infrastructures publiques à usage ordinaire et d'urgence, et constituer un système spatial organiquement intégré ; (4) proposer des mesures fines dans les domaines écologique, social, technique et économique, et préciser les stratégies adaptées aux différents scénarios ; et (5) établir un calendrier d'application et des responsabilités claires, évaluer régulièrement l'efficacité et actualiser le contenu du plan.

Les villes chinoises diffèrent fortement par leur géographie et leur taille ; les plans doivent donc être contextualisés. Sur le plan géographique, il convient d'identifier les principaux types de couplage, par exemple les risques typhon-pluie dans les villes côtières du Sud-Est ou séisme-aléas géologiques dans les zones sismiques, et de formuler des mesures spécialisées conciliant usages ordinaires et urgences et permettant une conversion rapide. Les petites et moyennes villes et les chefs-lieux de district présentent des environnements et profils d'aléa relativement simples ; leur priorité consiste à réduire les effets potentiels des couplages fréquents et à renforcer la résilience communautaire. Les grandes villes sont plus complexes et doivent repérer les unités spatiales prioritaires et simuler plusieurs scénarios, avec une orientation à plusieurs niveaux : « territoire entier – centre urbain – unité spatiale clé – communauté ». Dans les mégapoles et très grandes villes, les populations et activités sont fortement concentrées au centre. Il est donc nécessaire de renforcer la co-construction et la co-gouvernance à l'échelle régionale, d'améliorer la transmission de la résilience grâce à la coordination entre agglomérations et aires métropolitaines, de se préparer aux interactions complexes entre événements climatiques extrêmes et urgences graves, d'organiser la conversion des fonctions spatiales et les flux de ressources dans les scénarios extrêmes, et d'utiliser les jumeaux numériques et d'autres technologies pour renforcer la perception, la réponse et la gouvernance face aux pressions durables comme aux chocs soudains.

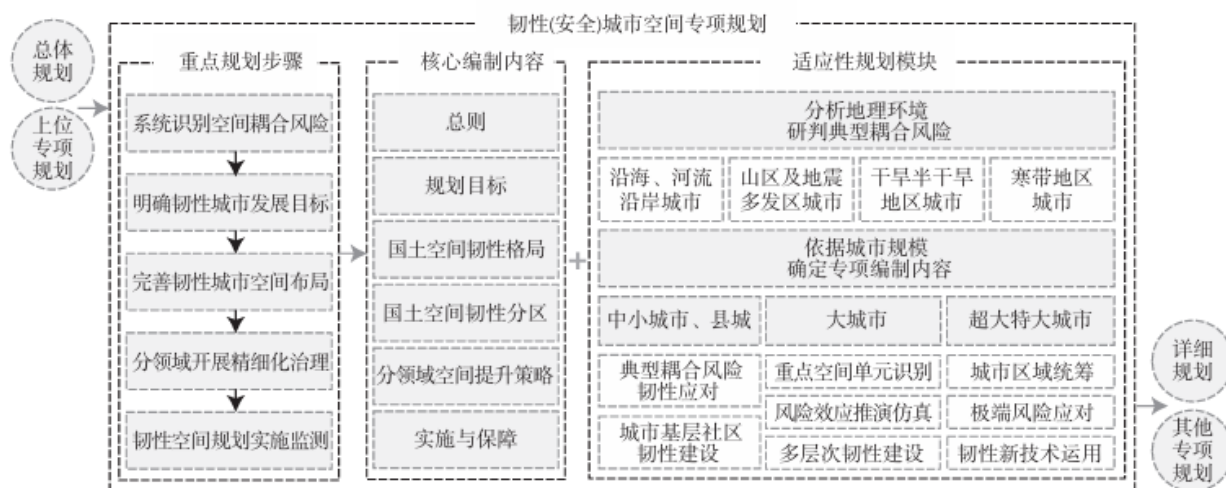


Figure 7. Cadre préliminaire d'un plan spatial spécialisé pour une ville résiliente (sûre)

4 Orientations techniques de l'élaboration des plans spatiaux résilients

L'analyse des priorités précédentes montre que l'ensemble du processus de planification exige la collecte de données urbaines multisources, la révélation des risques complexes et la simulation de leurs effets grâce aux technologies de l'information et à l'intelligence artificielle. Wu Zhiqiang et ses collègues [58] soulignent que l'IA rend la planification intelligente sous de multiples angles, tout en générant de nouveaux défis dans les relations entre IA et ville. Peng Zhongren et ses collègues [59] envisagent quatre phases du développement de l'IA appliquée à la planification urbaine : assistance, augmentation, automatisation et autonomie. Les orientations techniques clés de la planification résiliente comprennent

la collecte et le traitement de l'information spatiale, l'évaluation de la superposition et du couplage des risques, la déduction et la simulation de scénarios, ainsi que la planification intelligente et le suivi de la mise en œuvre.

4.1 Collecte et traitement de l'information spatiale

La télédétection, l'Internet des objets et Internet sont largement utilisés pour collecter et traiter les données spatiales et de risque. La diffusion de données urbaines de flux diversifiées et l'amélioration de leur qualité élargiront considérablement les dimensions de la recherche sur la résilience multirisque et accroîtront l'efficacité de la préparation des plans. L'intelligence artificielle présente des avantages importants pour l'exploration des mégadonnées urbaines, et la participation des nouvelles technologies à l'analyse urbaine devient une tendance majeure. Les algorithmes d'apprentissage automatique peuvent mettre en relation, fusionner et intégrer les données historiques et en temps réel, et soutenir la construction automatisée de modèles urbains [58]. L'autonomisation numérique de la planification résiliente doit donc insister sur l'extension des applications de mégadonnées, l'amélioration de leur qualité, l'exploration approfondie et l'intégration multisource. L'IA peut appuyer le traitement automatisé de l'information, la génération de textes et de graphiques et la construction de modèles pour les systèmes urbains complexes, améliorant l'efficacité et la qualité de la planification et favorisant une résilience urbaine pilotée par les données et intelligente.

4.2 Évaluation de la superposition et du couplage des risques

L'évaluation de la superposition et du couplage des risques constitue un axe important de la recherche sur les catastrophes et un élément essentiel de la planification spatiale résiliente. Les techniques passent de « l'évaluation d'un aléa unique » et de « l'intégration multifactorielle » au « couplage multirisque » dans les systèmes urbains complexes. Des modèles ont été développés à partir de la théorie des systèmes de catastrophe, des règles de déclenchement, du cadre pression-état-réponse, de modèles multi-agents et d'autres approches [17,60-62]. Selon leurs résultats, les techniques actuelles peuvent être classées en deux catégories : l'évaluation des niveaux multirisques, qui classe les indices pour révéler la distribution spatiale ; et l'évaluation probabiliste, qui analyse en profondeur les relations de couplage et calcule les probabilités et pertes à l'échelle de l'événement.

À mesure que l'urbanisation accroît la complexité des systèmes spatiaux, une évaluation centrée sur les risques individuels et négligeant leurs relations ne répondra plus aux besoins futurs et pourra sous-estimer le risque réel. Il faut approfondir l'identification et l'évaluation des effets spatiaux dans l'environnement urbain. Les évaluations futures pourront associer télédétection et informations spatiales enrichies afin de produire des cartes de haute précision et d'identifier les points critiques. L'apprentissage automatique et profond peut soutenir des modèles mathématiques de couplage et des modèles de réseaux urbains, permettant des évaluations plus fines, voire dynamiques, l'identification de configurations de risque, l'analyse des relations complexes et de leurs mécanismes de formation, ainsi que l'évaluation de la sensibilité et de la vulnérabilité de l'espace territorial.

4.3 Déduction de scénarios et simulation

La planification face au couplage multirisque doit conduire des déductions de scénarios pour les risques urbains typiques. À partir de données variées, elle doit construire des systèmes d'éléments de risque, déterminer les scénarios clés de couplage, élaborer des modèles d'évolution par l'évaluation probabiliste et identifier l'état fonctionnel des éléments spatiaux. Selon les régularités d'évolution, des modèles de langage naturel peuvent être utilisés pour construire des graphes de connaissances, élaborer des scénarios, analyser les processus multirisques et extraire facteurs d'influence et éléments spatiaux. Les réseaux bayésiens, les réseaux de Petri, les modèles hydrodynamiques et d'autres méthodes peuvent

ensuite soutenir la déduction spatio-temporelle [63-66], identifier les espaces susceptibles de subir des dommages et évaluer les effets sur les éléments exposés.

Les mécanismes de résilience peuvent être étudiés par des modèles et simulations de dynamique des systèmes, capables de saisir les interactions complexes entre risques et d'expliquer les relations entre facteurs d'influence. À l'avenir, la simulation urbaine pourra mobiliser des méthodes intelligentes pour construire des modèles multirisques et repérer les effets de seuil dans l'évolution spatiale [58]. La réalité virtuelle, les jumeaux numériques et les technologies connexes permettront d'explorer davantage les relations entre risques et régularités spatiales, de simuler des scénarios multiples de couplage et de sélectionner des politiques et mesures de résilience réellement efficaces.

4.4 Planification intelligente et suivi de la mise en œuvre

Les technologies intelligentes apportent déjà un soutien concret à la génération, à l'application et au suivi des plans. Les algorithmes génétiques peuvent simuler la sélection naturelle et les mutations afin d'identifier des solutions optimales pour les structures spatiales résilientes. La reconnaissance intelligente d'images peut analyser les données urbaines issues de la télédétection et de l'Internet des objets, suivre la mise en œuvre et fournir un retour spatial. Le traitement automatique du langage naturel peut surveiller et analyser les textes des réseaux sociaux pendant les urgences, évaluer les effets des plans et fournir un retour social sur leur application.

L'intelligence artificielle rend également possible une planification dynamique et adaptative. L'IA générative permet aux planificateurs de prendre des décisions de conception résiliente assistées et de produire rapidement des textes et images de haute qualité [58,67]. Des chercheurs chinois ont proposé l'utilisation de l'apprentissage profond par renforcement dans la planification spatiale des communautés urbaines [68], permettant l'ajustement et l'actualisation dynamiques des plans. À l'avenir, des orientations adaptatives intelligentes pourront soutenir la mise en œuvre dans des environnements urbains incertains et changeants.

5 Conclusion

Alors que la gestion des risques urbains entre dans la phase 3.0, la théorie de la résilience urbaine face au couplage multirisque doit être approfondie. La planification pour des risques normalisés et couplés constitue une orientation inévitable de la nouvelle ère et un moyen important de renforcer la résilience tout en coordonnant les fonctions ordinaires et d'urgence. Partant des défis du développement urbain futur, cet article a passé en revue les fondements et les pratiques de planification du couplage multirisque dans l'espace urbain, exploré les théories et applications de la résilience correspondantes, et identifié les priorités de la planification spatiale résiliente et de son évolution technique.

Trois questions méritent une attention particulière. Premièrement, du point de vue du risque lui-même, il faut préciser les caractéristiques et régularités des risques urbains typiques, en se concentrant sur leurs couplages. Deuxièmement, dans la relation entre risque et ville, la recherche doit examiner les effets spatiaux et leurs mécanismes, déterminer comment les systèmes d'usage du sol, d'équipements et de bâtiments réagissent aux risques multiples, et étudier les mécanismes de résilience à partir des interactions homme-territoire. Troisièmement, dans la relation entre risque et planification, les plans spatiaux résilients doivent intégrer l'analyse de scénarios de couplage propres à des objets multirisques spécifiques et formuler sur cette base des mesures ciblées de planification et de conception. L'étude vise à fournir des références théoriques et des orientations méthodologiques pour la planification et la construction de villes sûres et résilientes dans la phase 3.0 des risques.

Références

- [1] Zhou Shutian, Zhai Guofang, Shi Yijun, et al. Revue des recherches sur l'évaluation des risques de catastrophes naturelles urbaines. *Journal of Catastrophology*, 2020, 35(4) : 180-186. [en chinois]

- [2] Ni Changjian, Wang Jie. Réexamen de la définition du risque de catastrophe naturelle. *Journal of Catastrophology*, 2012, 27(3) : 1-5. [en chinois]
- [3] Zhai Guofang. Réponses résilientes aux risques urbains de pluies torrentielles et d'inondation dans le contexte du changement climatique, du point de vue de la planification : concepts clés, principes fondamentaux et cadre général. *Urban Planning Forum*, 2024(1) : 29-37. [en chinois]
- [4] Shi Peijun. Cinquième réflexion sur la théorie et la pratique de la recherche sur les systèmes de catastrophe. *Journal of Natural Disasters*, 2009, 18(5) : 1-9. [en chinois]
- [5] Carpignano A., Golia E., Di Mauro C., et al. Approche méthodologique pour définir des cartes multirisques à l'échelle régionale : première application. *Journal of Risk Research*, 2009, 12(3-4) : 513-534.
- [6] Gallina V., Torresan S., Critto A., et al. Revue des méthodologies multirisques appliquées aux aléas naturels : conséquences et défis pour l'évaluation des impacts du changement climatique. *Journal of Environmental Management*, 2016, 168 : 123-132.
- [7] Pendall R., Foster K. A., Cowell M. Résilience et régions : approfondir la compréhension de la métaphore. *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, 2010, 3(1) : 71-84.
- [8] Saarinen T., Hewitt K., Burton I. Le caractère dangereux d'un lieu : écologie régionale des événements dommageables. *Geographical Review*, 1973, 63 : 134.
- [9] Komendantova N., Mrzyglocki R., Mignan A., et al. Outils d'aide à la décision multialéas et multirisques dans la gouvernance participative des risques : retour d'expérience des acteurs de la protection civile. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2014, 8 : 50-67.
- [10] Marzocchi W., Garcia-Aristizabal A., Gasparini P., et al. Principes fondamentaux de l'évaluation multirisque : étude de cas en Italie. *Natural Hazards*, 2012, 62(2) : 551-573.
- [11] Kappes M. S., Keiler M., von Elverfeldt K., et al. Défis de l'analyse des risques multialéas : une revue. *Natural Hazards*, 2012, 64(2) : 1925-1958.
- [12] de Ruiter M. C., Couasnon A., van den Homberg M. J. C., et al. Pourquoi les catastrophes successives ne peuvent plus être ignorées. *Earth's Future*, 2020, 8(3) : e2019EF001425.
- [13] Terzi S., Torresan S., Schneiderbauer S., et al. Évaluation multirisque dans les régions montagneuses : revue des approches de modélisation pour l'adaptation au changement climatique. *Journal of Environmental Management*, 2019, 232 : 759-771.
- [14] Ward P. J., Daniell J., Duncan M., et al. Perspectives invitées : programme de recherche sur les trajectoires de gestion des risques de catastrophe dans l'évaluation multirisque et multialéas. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2022, 22(4) : 1487-1497.
- [15] He Jinping, Li Shuangshuang. Construction de réseaux de couplage spatio-temporel multialéas : du réseau multidimensionnel au réseau à sommet unique. *Geographical Research*, 2021, 40(8) : 2314-2330. [en chinois]
- [16] Guo Rui, Wang Qing, Zhang Huan, et al. Mécanismes de réponse et stratégies d'aménagement des environnements urbains-ruraux face aux catastrophes en cascade provoquées par les typhons : étude de Hongqiao à Yueqing. *Urban Planning Forum*, 2024(2) : 110-118. [en chinois]
- [17] Lu Ying, Hou Yunyue, Guo Liangjie, et al. Évaluation préliminaire du risque couplé multialéas dans les villes côtières : le cas de Quanzhou, Fujian. *Journal of Catastrophology*, 2015, 30(1) : 211-216. [en chinois]
- [18] Wei Jiuchang. Couplage et cascade des risques : causes complexes de l'évolution des nouveaux risques sociaux. *Xuehai*, 2019(4) : 125-134. [en chinois]
- [19] Liu H., Wang J., Liu J., et al. Effets combinés et différés des épidémies et des événements météorologiques extrêmes sur la reprise de la mobilité urbaine. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 99 : 104872.

- [20] Zhang B., Li X., Wang S. Nouvelle méthode d'adaptation de cas fondée sur un algorithme génétique intégré amélioré pour les urgences liées aux tempêtes de vent sur les réseaux électriques. *Expert Systems with Applications*, 2015, 42(21) : 7812-7824.
- [21] Kong Feng. Effets de couplage des catastrophes du point de vue des systèmes de catastrophe. *Journal of Catastrophology*, 2024, 39(1) : 1-5. [en chinois]
- [22] Shi Peijun, Lü Lili, Wang Ming, et al. Systèmes de catastrophe : groupes, chaînes et rencontres d'aléas. *Journal of Natural Disasters*, 2014, 23(6) : 1-12. [en chinois]
- [23] Pescaroli G., Alexander D. Comprendre les risques composés, interconnectés, interactifs et en cascade : un cadre holistique. *Risk Analysis*, 2018, 38(11) : 2245-2257.
- [24] Zscheischler J., Westra S., van den Hurk B. J. J. M., et al. Risques climatiques futurs liés aux événements composés. *Nature Climate Change*, 2018, 8(6) : 469-477.
- [25] Zscheischler J., Martius O., Westra S., et al. Typologie des événements météorologiques et climatiques composés. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1(7) : 333-347.
- [26] Hao Z. Événements composés et impacts associés en Chine. *iScience*, 2022, 25(8) : 104689.
- [27] Folke C. Résilience : émergence d'une perspective pour l'analyse des systèmes socio-écologiques. *Global Environmental Change*, 2006, 16(3) : 253-267.
- [28] Meerow S., Newell J. P., Stults M. Définir la résilience urbaine : une revue. *Landscape and Urban Planning*, 2016, 147 : 38-49.
- [29] Shao Yiwen, Xu Jiang. Résilience urbaine : interprétation conceptuelle à partir d'une revue internationale de la littérature. *Urban Planning International*, 2015, 30(2) : 48-54. [en chinois]
- [30] Yan Wentao, Li Zihao, Jian Tianyu, et al. Renouvellement écologique des quartiers anciens orienté vers la santé de l'environnement atmosphérique : cadre théorique et pratique de cas. *Urban Development Studies*, 2022, 29(1) : 121-132. [en chinois]
- [31] Kondo T., Lizarralde G. Maladaptation, fragmentation et autres effets secondaires de la planification urbaine centralisée après catastrophe : le cas de la catastrophe « en cascade » de 2011 au Japon. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2021, 58 : 102219.
- [32] Zeng Jian, Zuo Chang'an. Stratégies de prévention et de réduction des catastrophes dans la planification et la conception spatiales des quartiers d'affaires. *Architectural Journal*, 2010(11) : 75-79. [en chinois]
- [33] Lin Zhanpeng. Planification des parcs et espaces verts de prévention des catastrophes dans les villes à forte densité : le cas de Hong Kong. *Chinese Landscape Architecture*, 2008(9) : 37-42. [en chinois]
- [34] Xue Ye, Liu Yaolong, Zhang Taotao. Mécanismes de formation des risques de catastrophe couplés. *Journal of Natural Disasters*, 2013, 22(2) : 44-50. [en chinois]
- [35] Chen Weike, Zhang Xin. Dynamique du couplage multifactoriel des incendies et explosions lors du stockage et du transport de matières dangereuses. *China Safety Science Journal*, 2017, 27(6) : 49-54. [en chinois]
- [36] Li Hongnan, Li Gang, Zheng Xiaowei, et al. Progrès de la recherche sur les structures d'ingénierie soumises à l'action couplée de plusieurs aléas. *China Civil Engineering Journal*, 2021, 54(5) : 1-14. [en chinois]
- [37] Acemoglu D., Ozdaglar A., Tahbaz-Salehi A. Risque systémique et stabilité dans les réseaux financiers. *American Economic Review*, 2015, 105(2) : 564-608.
- [38] Peng Chong, Guo Zuyuan, Peng Zhongren. Progrès théoriques et pratiques de la résilience communautaire à l'étranger. *Urban Planning International*, 2017, 32(4) : 60-66. [en chinois]
- [39] Cai Jianming, Guo Hua, Wang Degen. Revue des recherches internationales sur les villes résilientes. *Progress in Geography*, 2012, 31(10) : 1245-1255. [en chinois]
- [40] Alberti M., Marzluff J. M. Résilience écologique dans les écosystèmes urbains : relier les formes urbaines aux fonctions humaines et écologiques. *Urban Ecosystems*, 2004, 7(3) : 241-265.

- [41] Jabareen Y. Planifier la ville résiliente : concepts et stratégies pour faire face au changement climatique et aux risques environnementaux. *Cities*, 2013, 31 : 220-229.
- [42] Adger W. N. Résilience sociale et écologique : sont-elles liées ? *Progress in Human Geography*, 2000, 24(3) : 347-364.
- [43] Adger W. N., Safra de Campos R., Siddiqui T., et al. Commentaire : inégalités, précarité et écosystèmes durables comme composantes de la résilience urbaine. *Urban Studies*, 2020, 57(7) : 1588-1595.
- [44] Bruneau M., Chang S. E., Eguchi R. T., et al. Cadre d'évaluation quantitative et d'amélioration de la résilience sismique des communautés. *Earthquake Spectra*, 2003, 19(4) : 733-752.
- [45] Lovell S. T., Taylor J. R. Fourniture de services écosystémiques urbains par des infrastructures vertes multifonctionnelles aux États-Unis. *Landscape Ecology*, 2013, 28(8) : 1447-1463.
- [46] Meerow S., Newell J. P. Planification spatiale d'infrastructures vertes multifonctionnelles : renforcer la résilience à Detroit. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 159 : 62-75.
- [47] Martin R., Sunley P. Sur la notion de résilience économique régionale : conceptualisation et explication. *Journal of Economic Geography*, 2015, 15(1) : 1-42.
- [48] Yang L., Yang H., Zhao X., et al. Étude de la résilience urbaine du point de vue de la théorie des systèmes adaptatifs complexes : le cas de l'agglomération Lanzhou-Xining. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(20) : 13667.
- [49] Simmie J., Martin R. Résilience économique des régions : vers une approche évolutionniste. *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, 2010, 3(1) : 27-43.
- [50] Chen Mengyuan. Progrès de la recherche internationale sur la résilience économique régionale : présentation d'un cadre théorique évolutionniste. *Progress in Geography*, 2017, 36(11) : 1435-1444. [en chinois]
- [51] Xie W., Sun C., Lin Z. Évolution spatio-temporelle de la résilience de la forme urbaine aux perturbations climatiques dans le cycle adaptatif : le cas de Changchun. *Urban Climate*, 2023, 49 : 101461.
- [52] Zheng Yan, Zhai Jianqing, Wu Zhanyun, et al. Classification et évaluation des villes résilientes fondées sur le cycle adaptatif : programmes pilotes chinois de villes-éponge et de villes adaptées au climat. *China Population, Resources and Environment*, 2018, 28(3) : 31-38. [en chinois]
- [53] Zhu Jinxia, Pan Yi, Zhang Yanbin, et al. Seuils critiques des effets du changement des types de culture sur la résilience des systèmes de terres cultivées. *China Land Science*, 2022, 36(4) : 49-58. [en chinois]
- [54] Folke C., Carpenter S., Walker B., et al. Changements de régime, résilience et biodiversité dans la gestion des écosystèmes. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2004, 35(1) : 557-581.
- [55] Tang Haiping, Chen Jiao, Xue Haili. Seuils écologiques : concepts, méthodes et perspectives de recherche. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(9) : 932-940. [en chinois]
- [56] Yan Wentao, Ren Jie, Zhang Shangwu, et al. Planification de la ville résiliente à Shanghai : enjeux clés, cadre général et stratégies. *Urban Planning Forum*, 2022(3) : 19-28. [en chinois]
- [57] Dai Shenzhi, Liu Tingting, Gao Xiaoyu, et al. Système d'élaboration et mécanismes de mise en œuvre de la planification territoriale de prévention et de réduction des catastrophes. *Urban Planning Forum*, 2023(1) : 48-53. [en chinois]
- [58] Herzog O., Pan Haixiao, Deng Zhituan, et al. Intelligence artificielle de nouvelle génération au service de la planification urbaine : opportunités et défis. *Urban Planning Forum*, 2023(4) : 1-11. [en chinois]
- [59] Peng Z. R., Lu K. F., Liu Y., et al. Trajectoire de l'intelligence artificielle en planification urbaine : du soutien à la planification à l'élaboration des plans. *Journal of Planning Education and Research*, 2023, 0(0) : 0739456X231180568.
- [60] Xue Ye, Chen Baozhang, Huang Chongfu, et al. Modèle hiérarchique souple d'évaluation intégrée des risques multialéas. *Progress in Geography*, 2012, 31(3) : 353-360. [en chinois]

- [61] Niu Yanhe, Jiao Sheng, Cao Tingting, et al. Évaluation des risques urbains multialéas et réponses de planification fondées sur le modèle PSR. *Urban Development Studies*, 2022, 29(4) : 39-48. [en chinois]
- [62] Wang Fei, Yin Zhan'e, Wen Jiahong. Modèle multi-agents pour l'évaluation dynamique des risques de catastrophe naturelle. *Geography and Geo-Information Science*, 2009, 25(2) : 85-88. [en chinois]
- [63] Rao Wenli, Luo Nianxue. Construction de scénarios et déduction spatio-temporelle des surcotes de tempête provoquées par les typhons. *Journal of Geo-Information Science*, 2020, 22(2) : 187-197. [en chinois]
- [64] Li Siyu, Liang Da, Wei Yanfang, et al. Modélisation quantitative de la chaîne sécheresse-incendie de forêt fondée sur un réseau bayésien. *Journal of Natural Disasters*, 2023, 32(1) : 38-46. [en chinois]
- [65] Li Yongjian, Wang Xunqing, Qiao Xiaojiao. Modèle d'évolution des catastrophes secondaires après séisme fondé sur des réseaux de Petri stochastiques. *Operations Research and Management Science*, 2014, 23(4) : 264-273. [en chinois]
- [66] Chen Bilin, Li Yinglong. Évaluation planificatrice de la transformation adaptative des villes côtières à forte densité orientée vers la résilience aux inondations : le secteur de Mangrove Bay à Shenzhen. *Urban Planning Forum*, 2023(4) : 77-86. [en chinois]
- [67] Gan Wei, Wu Zhiqiang, Wang Yuankai, et al. Construction d'un modèle théorique de conception urbaine assistée par l'AIGC. *Urban Planning Forum*, 2023(2) : 12-18. [en chinois]
- [68] Zheng Y., Lin Y., Zhao L., et al. Planification spatiale des communautés urbaines par apprentissage profond par renforcement. *Nature Computational Science*, 2023, 3(9) : 748-762.

Révisé : juin 2024

Traduction assistée par IA