

Construire un système urbain d'abris d'urgence face aux risques couplés multi-aléas : le cas de Pékin

Auteurs

LI Xiang, XIA Chenhong, WANG Wei

Résumé

Avec la fréquence croissante des catastrophes extrêmes et la complexification des systèmes spatiaux urbains, les systèmes d'abris d'urgence sont confrontés à plusieurs défis dans des contextes de risques couplés multi-aléas : adaptabilité structurelle insuffisante, faible coordination fonctionnelle et mécanismes de réponse tardifs. Les recherches existantes portent souvent sur des scénarios mono-aléa et sur le choix des sites, mais elles analysent encore insuffisamment les mécanismes de pression propres aux chaînes de catastrophes, les logiques de réponse spatiale et les trajectoires systémiques de construction. En suivant la séquence analytique « identification du risque - diagnostic structurel - reconstruction du système », cette étude élabore un cadre intégré d'analyse des systèmes d'abris d'urgence dans des scénarios de perturbations multi-aléas et prend Pékin comme cas empirique. Elle identifie les mécanismes d'enchaînement des aléas et les formes hétérogènes de pression qu'ils produisent dans l'espace urbain ; elle diagnostique les inadéquations fonctionnelles et les déséquilibres de réponse du système actuel d'abris en matière de typologie, de configuration hiérarchique et de mécanismes opérationnels ; elle propose enfin une trajectoire de reconstruction fondée sur la refonte des types d'abris, la coordination des implantations spatiales et la mise en place de mécanismes opérationnels résilients. Ces stratégies sont ensuite articulées aux normes de planification et aux pratiques locales de Pékin. L'étude vise à fournir un appui théorique et des stratégies de gouvernance spatiale aux mégapoles confrontées à l'évolution complexe des chaînes de catastrophes, et à favoriser la transition des systèmes d'abris d'urgence d'une configuration statique d'équipements vers une structure dynamique et résiliente.

Mots-clés

risque couplé multi-aléas ; système d'abris d'urgence ; mécanisme de réponse structurelle ; trajectoire de reconstruction systémique

Introduction

Dans un contexte marqué par l'intensification du changement climatique et par la densification de l'espace urbain, les catastrophes extrêmes deviennent plus fréquentes, plus composites dans leur nature et plus susceptibles de se transmettre en chaîne. Elles reconfigurent les modèles traditionnels de sécurité urbaine. Les effets de déclenchement entre aléas se renforcent, rendant leurs impacts plus incertains et spatialement hétérogènes. Dans les villes de premier rang, fortement mixtes et densément peuplées, la « pression » des catastrophes tend à se concentrer dans les zones structurellement vulnérables, mettant à l'épreuve la capacité de tolérance et de régulation des systèmes urbains. Les systèmes d'abris d'urgence, qui relient la réponse aux catastrophes, l'évacuation des populations et le rétablissement de l'ordre, deviennent ainsi un support essentiel de la résilience urbaine.

Ces dernières années, les autorités nationales et locales chinoises ont publié une série de documents politiques et techniques, notamment les Orientations sur le renforcement de la construction des abris d'urgence émises par 12 ministères et commissions, la norme nationale Classification et gradation des abris d'urgence (GB/T 44013-2024) et la norme locale de Pékin Classification et gradation des abris

d'urgence (DB11/T 2141-2023). Ces textes définissent la logique des abris d'urgence, de courte durée et de longue durée à partir de la durée d'hébergement et de la coordination spatiale, favorisant le passage d'une fourniture statique d'équipements à des systèmes d'abris à objectifs multiples. Toutefois, dans les conditions réelles d'enchaînement des catastrophes, de forte complexité spatiale et de mécanismes de gouvernance différenciés, les systèmes actuels présentent encore une coordination de réponse insuffisante, une faible adéquation spatiale et une capacité limitée de couplage structurel. Des recherches systémiques, prospectives et orientées vers la pratique sont donc nécessaires.

Le système des espaces d'abri est progressivement devenu un thème central des recherches sur la ville résiliente. Wei et al. [1] ainsi que Hung et al. [2] soutiennent que la résilience ne se limite pas à la capacité d'absorption et de rétablissement d'un système, mais implique aussi transformation structurelle et adaptation fonctionnelle ; les espaces d'urgence doivent donc être considérés comme des unités clés dotées de propriétés de réponse dynamique. Liu et al. [3] proposent de configurer les abris par un couplage dynamique entre distribution de la population, itinéraires d'accès et capacité d'évacuation, en introduisant des modèles de simulation d'évacuation et d'accessibilité de réseau pour optimiser l'espace. Ahmed et Guyton [4], dans une perspective de risque systémique, soulignent que l'état de pression et l'inadéquation fonctionnelle des structures d'abris devraient être au coeur des préoccupations de gouvernance. Ran et al. [5] construisent un système de zonage de prévention des catastrophes fondé sur les niveaux de service et les rayons d'implantation ; Wang et al. [6] proposent une conversion imbriquée entre fonctions ordinaires et fonctions d'urgence ; Zhu et al. [7] tentent d'évaluer dynamiquement la capacité des abris par la simulation de scénarios de catastrophe et l'analyse de données massives. Ces travaux offrent une base solide pour la théorie, les méthodes et l'analyse empirique, mais trois lacunes demeurent.

Premièrement, les recherches existantes privilégient généralement la réponse à un aléa unique ou la configuration statique, et manquent d'une analyse intégrée de la relation « pression - réponse - régulation » dans les systèmes urbains soumis à des chaînes de catastrophes [8]. Deuxièmement, l'attention reste centrée sur le choix des sites et l'évaluation de la capacité d'accueil, tandis que les déséquilibres structurels internes, les inadéquations fonctionnelles et la fragmentation des mécanismes sont insuffisamment modélisés. Troisièmement, les systèmes d'abris ne sont pas encore véritablement intégrés aux cadres de gouvernance de la résilience et manquent donc de logiques organisationnelles d'adaptation aux perturbations complexes et à l'évolution des structures spatiales.

Dans ce contexte, l'étude se concentre sur Pékin. Depuis la création, en 2003, du premier abri d'urgence de Chine - l'abri sismique du parc des ruines de l'enceinte de Yuandadu -, Pékin a développé plus de 1 810 abris d'urgence de niveaux et de types variés. L'ampleur du système est importante, mais les problèmes demeurent sensibles. En tant que mégapole située sur l'aile nord de la ceinture sismique de Chine du Nord, Pékin est exposée de longue date à des risques naturels, notamment les séismes et les catastrophes météorologiques. La complexité et la vulnérabilité du fonctionnement urbain peuvent aggraver les pertes et les dommages lorsque plusieurs catastrophes se superposent. Pékin doit donc planifier et optimiser de manière globale son système d'abris d'urgence à partir d'une perspective systémique et résiliente.

Cet article propose un cadre intégré combinant l'identification des liens entre catastrophes, le diagnostic de la structure spatiale et la reconstruction du système. Il cherche à faire évoluer les systèmes d'abris d'urgence d'une logique de fourniture statique d'équipements vers des systèmes de résilience

dynamiques capables de faire face à des perturbations complexes. En suivant le fil directeur de « l'orientation vers les risques couplés multi-aléas », l'analyse s'organise autour de trois logiques : identification du risque, diagnostic structurel et reconstruction du système. Elle identifie d'abord les mécanismes de liaison entre des aléas tels que les séismes et les pluies torrentielles, ainsi que les formes hétérogènes de pression qu'ils produisent dans l'espace urbain. Elle diagnostique ensuite les goulets d'étranglement dans les types d'abris, les relations hiérarchiques et les mécanismes opérationnels, en tenant compte de la sensibilité des populations et de l'adaptabilité spatiale. Elle propose enfin une trajectoire de reconstruction couvrant la refonte du système typologique, la coordination de l'implantation spatiale et l'optimisation des mécanismes d'exploitation, formant ainsi un schéma de reconstruction adapté aux scénarios de risques couplés multi-aléas.

1. Logique d'identification du risque dans les systèmes d'abris sous scénarios couplés multi-aléas

Sous l'effet combiné de la superposition de plusieurs aléas et des perturbations composites, les systèmes urbains d'abris d'urgence font face à une structure de pression à plusieurs niveaux, produite par des moteurs externes de risque, des réponses structurelles internes et des défaillances systémiques. Pékin, mégapole typique, présente une morphologie spatiale complexe, des zones fonctionnelles fortement couplées et des types d'aléas variés ; son système d'abris est donc représentatif et démonstratif à l'échelle nationale. À partir des mécanismes de catastrophe, cette section analyse d'abord la manière dont différents aléas affectent le système spatial et génèrent des pressions. Elle examine ensuite le couplage entre structure spatiale et caractéristiques démographiques afin de révéler la logique de formation de l'exposition systémique. Elle identifie enfin les formes de déséquilibre d'exposition et d'inadéquation fonctionnelle dans le système d'abris, fournissant ainsi la base problématique et structurelle des stratégies ultérieures.

1.1 Identifier les chaînes de catastrophes multi-aléas et leurs mécanismes d'action

Avec la fréquence croissante des événements climatiques extrêmes et le couplage accru des fonctions urbaines, l'évolution liée de plusieurs aléas est devenue une variable importante de la stabilité des systèmes de sécurité urbaine. À la différence des modèles traditionnels mono-aléa, les risques couplés multi-aléas se caractérisent par une forte transmission en chaîne : superposition d'aléas physiques, perturbations interconnectées des systèmes fonctionnels et effets d'amplification dans les systèmes sociaux [9]. Pékin présente une structure géologique complexe et a historiquement connu des séismes, des pluies torrentielles, des crues de montagne et des catastrophes secondaires. Ses zones bâties sont concentrées et les espaces souterrains y sont intensivement utilisés, ce qui rend les chaînes de catastrophes fortement corrélées dans les dimensions spatiales verticale et horizontale.

À partir d'un modèle matriciel du risque évaluant les aléas selon leur intensité et leur fréquence, l'étude organise neuf grands types d'aléas : séismes, inondations, aléas géologiques, incendies, météorologie extrême, produits chimiques dangereux, accidents miniers, incidents de sécurité sociale et épidémies. Elle construit ensuite un réseau de propagation multi-aléas [10] et, par une revue de la littérature et le principe de la chaîne d'événements, identifie leurs trajectoires d'action dans l'espace (figure 1). Du point de vue de l'interaction entre aléas, les séismes peuvent provoquer des effondrements de bâtiments, des interruptions de trafic et des catastrophes secondaires liées aux incendies ; les inondations peuvent paralyser les installations souterraines et accroître les risques de concentration de foule ; les épidémies renforcent la vulnérabilité des lieux publics. Dans la structure urbaine dense de Pékin, les interactions

entre aléas sont plus susceptibles de se superposer et de s'amplifier dans le centre-ville et le sous-centre, formant un processus typique de propagation en chaîne à l'échelle urbaine.

Les aléas multiples peuvent ainsi survenir simultanément ou s'accumuler par phases, produisant des perturbations non linéaires dans les structures spatiales urbaines. Ces mécanismes composites se diffusent dans l'espace par des voies de transmission du risque et forment des « zones de risque à haute pression » centrées sur les fonctions urbaines denses, les noeuds d'infrastructure et les lieux de concentration des populations [11]. Dans ce processus, les différents aléas, en raison de leurs facteurs causaux, de leurs rythmes d'action et de leurs structures de propagation, sont projetés dans un référentiel spatial commun à travers les différences de poids des facteurs, d'intensité de cooccurrence et de modes d'enchaînement. Cela produit des réponses spatiales comparables et donne aux caractéristiques des aléas une expression intégrée endogène dans le cadre du risque composite.

L'identification des liens multi-aléas peut donc être traduite en une procédure de superposition de couches spatiales et d'analyse de chaînes, permettant d'abstraire les mécanismes d'action communs et d'extraire le modèle général de réponse de Pékin ainsi qu'une carte hétérogène du risque composite. Pour construire cette carte, l'étude utilise ArcGIS afin de superposer les couches spatiales et d'analyser les chaînes. Elle sélectionne d'abord des données historiques relatives aux principaux aléas - séismes, inondations, incendies, météorologie extrême et accidents impliquant des produits chimiques dangereux -, ainsi que des facteurs d'impact tels que la pente du terrain, la densité bâtie, la distribution des espaces souterrains, la densité de population, la densité des noeuds d'infrastructure et l'exposition socio-économique. Ces données servent à générer des couches d'intensité des aléas. L'étude applique ensuite une analyse de réseau de cooccurrence des catastrophes fondée sur des données multi-sources et une modélisation de la transmission en chaîne. Par fouille textuelle et statistiques de cooccurrence, elle identifie les fréquences de cooccurrence et les associations sémantiques entre aléas, construit une matrice quantitative d'interaction, puis utilise la centralité de degré pondérée et la centralité d'intermédiarité pour déterminer les aléas déclencheurs et les voies de propagation clés [12]. Sur la base de seuils de probabilité de cooccurrence, les associations sont classées en faibles fréquences (<10 %), fréquences moyennes (10 %-30 %) et hautes fréquences (>30 %). Une analyse par superposition pondérée permet ensuite de produire une carte de distribution spatiale du risque composite multi-aléas.

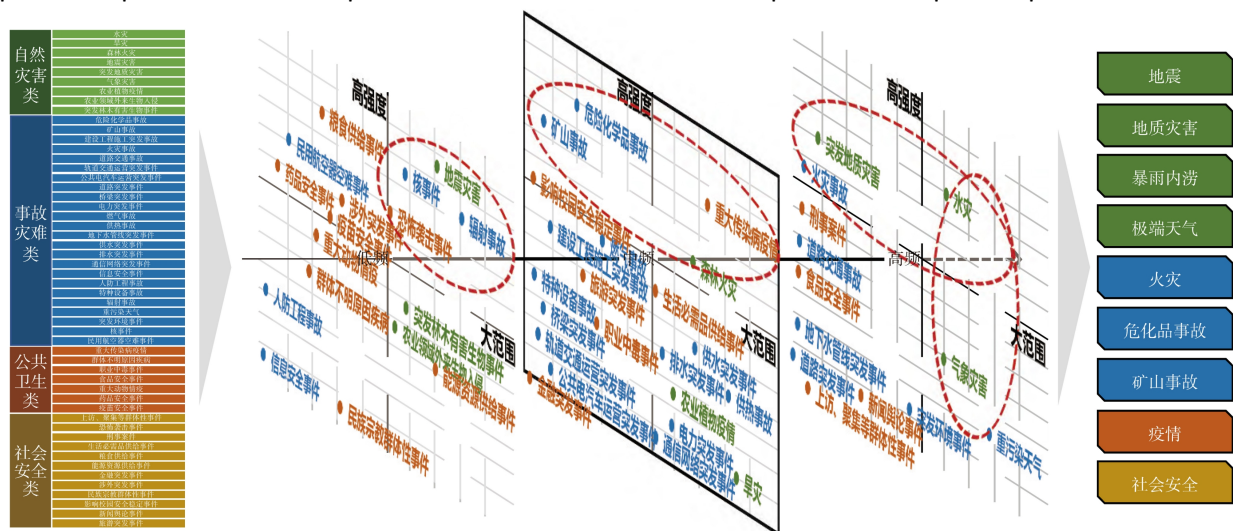


Figure 1. Stades de réaction en chaîne et structure d'impact systémique selon les types de catastrophes

La figure classe les catastrophes naturelles, les accidents, les événements de santé publique et les événements de sécurité sociale, en les reliant à des aléas représentatifs : inondations, sécheresses, feux de forêt, séismes, aléas géologiques, météorologie extrême, produits chimiques dangereux, accidents miniers, défaillances des transports et des réseaux, grandes maladies infectieuses, incidents de sécurité alimentaire et pharmaceutique, terrorisme, incidents collectifs et autres risques de sécurité urbaine.

1.2 Sensibilité de la population urbaine et analyse de la demande d'abris

Les populations urbaines sont les porteuses directes des impacts des catastrophes. Leur distribution spatiale et leurs attributs sociaux constituent la base centrale de la pression de réponse exercée sur les systèmes d'abris. Dans les scénarios couplés multi-aléas, la demande d'abris n'est plus déterminée par la seule taille ou densité de la population. Elle résulte plutôt d'une interaction systémique entre causalité du risque, sensibilité de la population et efficacité du secours [13] (figure 2). La distribution des sources de risque détermine l'intensité et le périmètre des aléas ; la sensibilité démographique détermine le degré de vulnérabilité des individus ; l'efficacité du secours conditionne l'arrivée en temps utile des ressources et l'activation précise des fonctions.

Afin de garantir une modélisation scientifique et reproductible, les indicateurs des trois dimensions sont issus de la base de données des événements catastrophiques historiques de Pékin, du septième recensement national de la population et des données spatiales d'infrastructures. Après normalisation et tests de significativité, l'étude utilise l'analyse en composantes principales pour extraire les facteurs composites principaux et déterminer leurs poids, puis applique un modèle de coordination de couplage afin de révéler les interactions entre exposition aux catastrophes, sensibilité démographique et efficacité du secours. Elle construit ainsi un modèle quantitatif intégré de la demande urbaine d'abris.

Compte tenu des différences marquées entre aléas quant à l'ampleur des pertes, aux mécanismes d'action et aux modes de refuge, l'étude traite le type d'aléa comme une contrainte préalable dans l'identification de la demande. Elle utilise des scénarios multi-aléas pour différencier et corriger les impacts composites de différents aléas, évitant les omissions de scénarios qui résulteraient d'une dépendance exclusive aux données démographiques et infrastructurelles. Les séismes, inondations, incendies et accidents chimiques diffèrent par l'intensité de déclenchement de l'abri, le mode de refuge et les conditions spatiales. Des coefficients de demande fondés sur les scénarios peuvent donc être introduits pour corriger les résultats et refléter les différences d'échelle d'accueil, de durée de refuge et d'adaptabilité spatiale (tableau 1).

À Pékin, la distribution de la population et la sensibilité sociale présentent une nette différenciation spatiale. Le centre-ville compte de nombreux quartiers résidentiels anciens et de nombreux habitants âgés, avec un indice de vulnérabilité sociale relativement élevé. Les nouveaux secteurs fonctionnels, tels que Tongzhou et Yizhuang, sont dominés par des populations flottantes et des groupes d'emploi intensif, ce qui concentre la pression de réponse sur les abris. Les villes nouvelles de plaine et les zones de conservation écologique ont une densité plus faible mais une accessibilité de transport plus limitée, ce qui renforce les contraintes d'accès aux abris. Sur la base de données spatiales relatives à la population réelle de Pékin, à la population flottante et aux groupes hautement vulnérables - personnes âgées, enfants et ménages à faible revenu -, l'étude construit un modèle d'évaluation de la sensibilité démographique. Les résultats montrent que les personnes âgées se concentrent dans les quartiers

anciens et les districts centraux, tandis que les populations flottantes se regroupent le long des corridors ferroviaires et dans les marges urbaines. Il en résulte plusieurs zones de pression caractérisées par « forte densité - forte sensibilité - faible sécurité ». La superposition de la sensibilité démographique et de l’espace fonctionnel urbain donne à Pékin un profil typique : forte pression au coeur et demande fluctuante en périphérie.

En combinant ces caractéristiques démographiques avec les propriétés des séismes, incendies, inondations et épidémies, l’étude construit une matrice bidimensionnelle « type d’aléa x cycle de refuge » afin d’identifier la structure spatiale et la temporalité de réponse des différentes demandes d’abris. Les calculs montrent que, dans des scénarios extrêmes, la population maximale à abriter à Pékin pourrait représenter environ 30 % de la population desservie, avec une distribution spatiale marquée par une « forte pression au coeur et une fluctuation en périphérie ». Cette carte de la demande peut fournir un appui quantitatif pour identifier les zones prioritaires, affiner les standards de configuration des équipements et élaborer des stratégies de répartition des ressources.

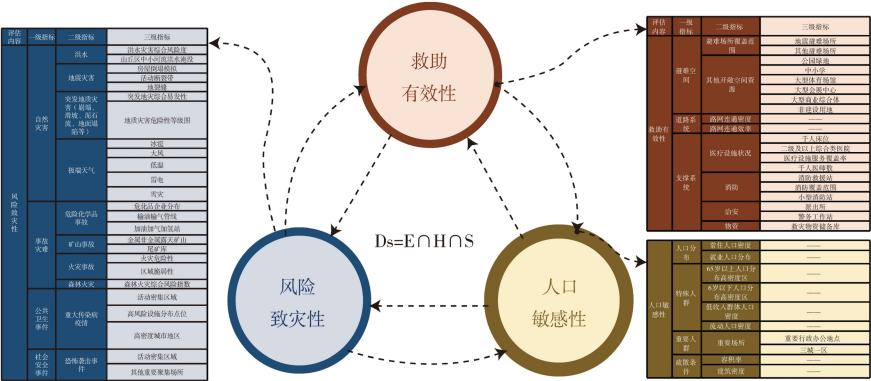


Figure 2. Modèle couplé tridimensionnel pour l’identification de la demande urbaine d’abris

Le modèle comprend trois dimensions : causalité du risque, sensibilité de la population et efficacité du secours. La causalité du risque couvre les inondations, séismes, aléas géologiques, phénomènes météorologiques extrêmes, produits chimiques dangereux, accidents miniers, incendies, feux de forêt, événements de santé publique et incidents de sécurité sociale. La sensibilité de la population inclut la population résidente, la population active, les personnes âgées, les enfants, les groupes à faible revenu, la population flottante, les lieux importants, le coefficient d’occupation du sol et la densité bâtie. L’efficacité du secours inclut la couverture des abris, les ressources d’espace ouvert, la connectivité et l’efficacité du réseau routier, les équipements médicaux, les secours incendie, la police et les réserves de matériel de secours.

Tableau 1. Seuils différenciés de déclenchement de l’évacuation et exigences spatiales pour les principaux types de catastrophes

Type de catastrophe	Intensité de déclenchement de l’abri	Caractéristiques clés de la demande spatiale	Orientation de correction
Séisme	Élevée	Espace de rassemblement ouvert et sûr.	Pondération de la demande.

Inondation	Moyenne	Éviter les terrains bas ; garantir une altitude sûre et une capacité de drainage.	Validité locale dans les zones touchées.
Incendie	Faible (locale)	Distance coupe-feu et isolement des fumées.	Correction locale.
Accident chimique dangereux	Moyenne (locale)	Distance d'isolement sûre et confinement selon la direction du vent.	Correction locale.
Météorologie extrême, par exemple chaleur ou pollution de l'air	Faible	Refuge intérieur et systèmes de ventilation.	Ne génère généralement pas une demande d'abris centralisés à grande échelle.

1.3 Capacité de réponse du système d'abris et diagnostic spatial de l'offre et de la demande

La capacité de réponse des systèmes d'abris d'urgence dépend non seulement du nombre et de la densité des équipements, mais surtout de leur adéquation spatiale avec la distribution de la population, les caractéristiques des aléas et les noeuds fonctionnels. Les abris existants de Pékin sont principalement construits sur des équipements publics tels que les espaces verts, les parcs et les écoles, formant un réseau de réponse à trois niveaux - municipal, district et sous-district. Dans les scénarios multi-aléas, le système demeure toutefois confronté à des inadéquations structurelles et à des déséquilibres entre offre et demande.

Pour révéler ces différences spatiales, l'étude construit un « indice d'appariement entre l'offre et la demande d'abris » fondé sur le rayon de service des abris, la densité de population et la capacité des équipements. Les résultats montrent des différences significatives du ratio offre-demande dans l'ensemble de Pékin (figure 3). La zone fonctionnelle centrale de la capitale présente un ratio de 1:0,6, indiquant une offre suffisante et même une certaine redondance des ressources. Le centre-ville présente un ratio de 1:1,8, traduisant une forte pression liée à la densité démographique. Le sous-centre urbain présente un ratio de 1:1,4, signalant une situation modérément tendue. Les villes nouvelles de plaine présentent un ratio de 1:1,3, indiquant un équilibre relatif. La zone de conservation écologique présente un ratio de 1:1, correspondant à un appariement de base entre offre et demande. Dans l'ensemble, le système d'abris de Pékin dessine un schéma spatial de « redondance du coeur - tension du sous-centre - équilibre des plaines - capacité périphérique modérée ». Ce schéma révèle des différences structurelles dans la distribution des ressources entre zones fonctionnelles et régions, et appelle une implantation plus rationnelle ainsi que des mécanismes de réponse multi-niveaux pour corriger les déséquilibres.

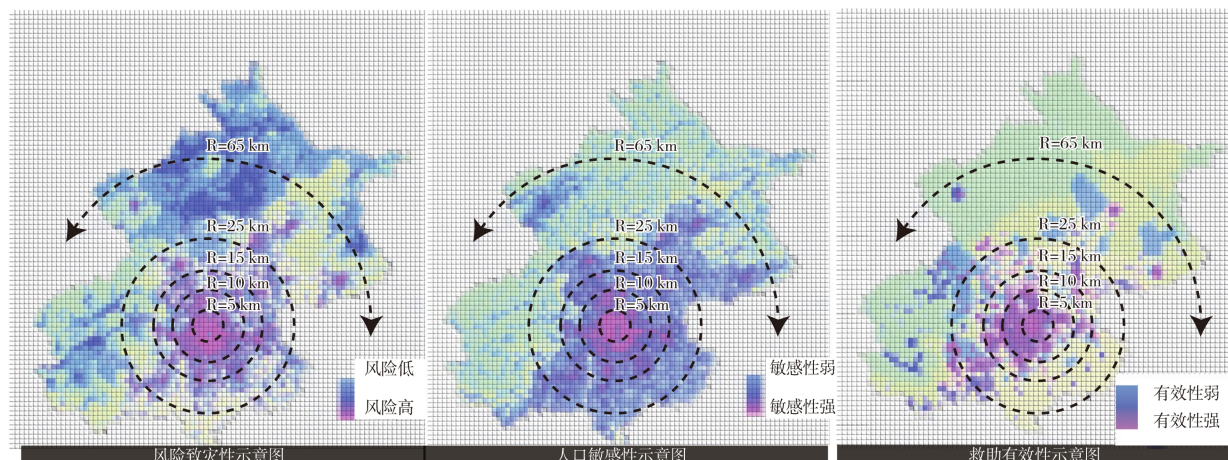


Figure 3. Hétérogénéité spatiale du système d'abris d'urgence à Pékin

La figure compare trois couches spatiales : causalité du risque, sensibilité de la population et efficacité du secours. Elle illustre la pression différenciée exercée sur les abris par la superposition des risques, des populations sensibles et des conditions de ressources de secours dans l'ensemble de Pékin.

2. Mécanismes de réponse structurelle des systèmes d'abris sous scénarios couplés multi-aléas

Face aux effets superposés de plusieurs aléas et à la concentration à haute densité de l'espace urbain, le système d'abris de Pékin, en tant que composante d'un centre politique national et d'une mégapole typique, révèle de multiples contraintes structurelles dans la définition des types, l'implantation spatiale et les mécanismes opérationnels. Ces contraintes limitent sa capacité à soutenir une réponse rapide et un transfert sûr des populations dans des scénarios dynamiques. Pour identifier les contraintes et les goulots d'étranglement, l'analyse doit porter sur trois dimensions : l'adaptation des fonctions aux demandes des aléas, la couverture des zones clés par l'implantation et la capacité des mécanismes à soutenir une coordination efficace. Elle fournit ainsi un appui ciblé à la reconstruction du système.

2.1 Adéquation fonctionnelle de la structure typologique des abris

Dans un contexte de risques composites fréquents et de demandes d'abris diversifiées, le système existant de Pékin repose principalement sur trois types d'espaces : refuge d'urgence, relogement temporaire et relogement transitoire. Ensemble, ils forment un système fonctionnel couvrant l'ensemble du processus de catastrophe. Cependant, en raison de la diversité des aléas et de la complexité des chaînes de catastrophes à Pékin, les différents types d'abris présentent encore des lacunes évidentes en matière de stratification fonctionnelle et de correspondance avec les aléas. Les aléas soudains, tels que les séismes et les incendies, exigent une forte rapidité et une grande accessibilité, tandis que les aléas à évolution lente, comme les inondations et les épidémies, dépendent davantage d'espaces protecteurs et durables. Ces deux ensembles de demandes sont souvent difficiles à concilier dans l'espace urbain.

Dans le centre-ville de Pékin, par exemple, les quartiers résidentiels anciens manquent d'espaces d'abri suffisants, et certaines écoles ou certains parcs, construits précocement et dotés d'infrastructures faibles, ne satisfont pas aux doubles exigences de protection sismique et de drainage des crues. Dans les nouveaux secteurs fonctionnels tels que Tongzhou et Yizhuang, de nombreux espaces verts publics et abris polyvalents ont été construits, mais la conversion des équipements et l'appui matériel restent insuffisamment conçus pour une réponse composite à plusieurs aléas. Il en résulte une situation dans

laquelle les abris sont visibles comme sites, mais absents comme fonctions lorsque surviennent différents scénarios de catastrophe. La structure typologique doit donc passer d'une classification administrative à une logique intégrée de réponse « aléa - cycle - fonction », afin de renforcer l'adaptation fonctionnelle du système à plusieurs scénarios.

2.2 Coordination spatiale de la structure d'implantation des abris

L'implantation des abris porte les fonctions d'évacuation des populations et d'agrégation des ressources dans différents secteurs urbains durant les catastrophes. Sa rationalité structurelle affecte directement la capacité de charge et le niveau de réponse coordonnée de l'ensemble du système. La structure spatiale de Pékin présente une organisation nette en anneaux et en radiales. La plaine de piémont, les zones fonctionnelles à haute densité et les zones périphériques de conservation écologique forment ensemble une structure urbaine typique « multi-anneaux, multi-contraintes ». Dans cette structure, la distribution, l'équilibre et l'accessibilité des abris sont soumis à de multiples contraintes naturelles et sociales.

La superposition de la prévision de population à abriter et de l'évaluation de la capacité de service montre un déséquilibre spatial marqué du système d'abris de Pékin. Le centre-ville présente une forte densité d'abris, mais une capacité d'accueil limitée et une forte pression d'évacuation. Le sous-centre de Tongzhou et les villes nouvelles de plaine connaissent une agrégation rapide des populations à abriter, alors que l'offre d'équipements est en retard. Les zones périphériques telles que Fangshan et Miyun présentent une faible accessibilité aux abris en raison des barrières topographiques et des conditions de transport. Ce schéma « forte pression au centre - réponse différée en périphérie » constitue un problème spatial typique de Pékin. Il reflète le développement inégal des systèmes d'abris entre le noyau urbain et les zones périphériques, en particulier dans les franges urbaines-rurales, les secteurs fonctionnels clés et les intersections de corridors de transport, où la fragmentation de l'implantation, la faiblesse des itinéraires d'accès et la mono-fonctionnalité des sites rendent difficiles le rassemblement rapide et la réponse en cas de catastrophe. Globalement, la distribution actuelle des abris à Pékin suit un modèle de « centre dense et périphérie clairsemée », avec une faible correspondance entre distribution de la population, niveaux de risque et conditions d'accessibilité.

2.3 Réponse mécanistique dans l'exploitation des abris

La structure opérationnelle des systèmes d'abris constitue la base pratique de l'activation des espaces, de la répartition des ressources et du transfert des populations. Le caractère systémique et coordonné des mécanismes de réponse détermine directement l'efficacité de l'action en temps de catastrophe. Pékin a initialement établi un mécanisme d'exploitation à trois niveaux - municipal, district et sous-district -, mais les chevauchements fonctionnels, la fragmentation des systèmes d'information et les retards de coordination interservices restent fréquents. Ces problèmes rendent difficile la réponse aux besoins de conversion rapide lors de l'évolution des chaînes de catastrophes.

En tant que capitale, Pékin doit également prendre en compte la sécurité politique, la sécurité publique et la stabilité sociale dans l'exploitation des abris, ce qui rend la conception des mécanismes plus complexe que dans d'autres villes. Lors de grands événements, d'épisodes météorologiques extrêmes ou d'urgences de santé publique, par exemple, le système d'abris doit à la fois évacuer les personnes et garantir la fluidité des transports et la sécurité des zones clés, produisant un problème typique de réponse coordonnée à objectifs multiples. Il convient donc d'établir un système de responsabilités guidé par l'état du scénario, ainsi qu'un mécanisme organisationnel intégrant les opérations ordinaires et

d'urgence. Les plateformes numériques doivent servir à construire une boucle intégrée « détection - répartition - coordination ». En fixant des coefficients de soutien de service pour les abris d'urgence, de courte durée et de longue durée, et en connectant dynamiquement les données météorologiques, hydrologiques, de transport et d'énergie, le système d'abris peut fournir un appui de réponse efficace, sûr et intelligent dans des conditions de catastrophe complexes.

3. Trajectoires de reconstruction des systèmes d'abris orientées vers les caractéristiques de risque des mégapoles

Dans le contexte des catastrophes composites, le système d'abris d'urgence de Pékin présente des insuffisances d'adaptation et des barrières organisationnelles. En tant que mégapole typique et centre politique national, Pékin combine relief complexe, forte densité de population et diversité d'aléas ; la construction de son système d'abris est donc à la fois représentative et complexe. Sur la base de l'identification des problèmes et du diagnostic de réponse précédents, cette section propose une trajectoire intégrée de reconstruction portant sur le type, l'espace et le mécanisme. Elle se concentre sur trois aspects : reconstruire les systèmes typologiques adaptés aux caractéristiques multi-aléas, optimiser les réseaux spatiaux selon les conditions locales et remodeler les mécanismes à partir d'une orientation par scénarios. L'objectif est d'explorer une trajectoire de transformation résiliente ancrée dans la pratique pékinoise et potentiellement transférable à l'échelle nationale [14-15].

3.1 Reconstruction adaptative des systèmes typologiques d'abris pour les caractéristiques multi-aléas

Les différents aléas varient fortement selon la formation des chaînes de catastrophes, l'étendue spatiale et les trajectoires de refuge des populations. Cela entraîne une différenciation structurelle des comportements d'abri et de la demande spatiale. Les séismes, par exemple, provoquent souvent des dommages structurels régionaux et une demande d'évacuation d'urgence centralisée à grande échelle. Les inondations sont sensibles à l'altitude et fluctuent sur de courtes périodes, produisant souvent des transferts temporaires dispersés dépendant des différences topographiques. Les incendies et les accidents chimiques relèvent principalement d'une diffusion locale et nécessitent généralement une isolation rapide et un transfert spatial de courte durée. Il est donc nécessaire de construire un système de classification typologique fondé sur le type de risque, le cycle de réponse et la fonction de service, et de traiter les scénarios de catastrophe comme une base essentielle de la reconstruction des types d'abris.

Premièrement, le système de gradation et de classification des abris doit être reconstruit selon la relation tridimensionnelle « type d'aléa - durée de réponse - demande fonctionnelle ». Les abris d'urgence répondent principalement à des événements soudains de forte intensité et doivent privilégier l'évacuation locale de proximité, de courte durée et à forte réactivité. Les abris d'urgence de courte durée correspondent à des catastrophes régionales d'intensité moyenne et assurent des tâches par étapes, telles que le transfert de population, le relogement centralisé et l'agrégation des ressources. Les abris d'urgence de longue durée servent le rétablissement et la relocalisation post-catastrophe, et doivent offrir des capacités intégrées de soutien à la vie, de services médicaux et d'approvisionnement matériel. Compte tenu de la triple structure spatiale de Pékin - zones bâties de forte densité, vastes plaines et zones écologiques de piémont -, des pondérations de zonage géographique doivent être introduites dans la stratification des types. Le centre-ville devrait donner la priorité aux espaces de réponse rapide, tandis que les plaines et les zones de montagne devraient renforcer les fonctions de

relocalisation et de réserve, formant un système multi-niveaux de réponse progressive, d'escalade fonctionnelle graduelle et de liaison spatio-temporelle.

Deuxièmement, le cadre de classification doit être élargi en une structure composite d'abris « généraux - spécialisés - spécifiques ». Les différents secteurs de Pékin font face à des aléas différents. Les abris d'urgence généraux doivent d'abord répondre aux séismes, tout en couvrant les accidents chimiques dangereux, les incendies, les accidents miniers, les attaques terroristes et d'autres événements. Les abris d'urgence spécialisés peuvent être classés selon les demandes spécifiques de refuge pendant les catastrophes, notamment la lutte contre les inondations, les phénomènes météorologiques extrêmes, les aléas géologiques soudains, les feux de forêt et les grandes épidémies infectieuses. Les abris spécifiques renvoient aux espaces destinés aux personnes âgées, aux nourrissons, aux femmes enceintes, aux personnes handicapées ainsi qu'aux blessés et malades. Ils doivent satisfaire aux exigences de conception sans obstacle et refléter l'inclusivité sociale de la capitale ainsi que sa capacité de service précis.

Enfin, un système de couplage dynamique entre hiérarchie typologique et mécanismes opérationnels doit être établi. Pékin dispose d'une base solide en matière d'exercices de prévention des catastrophes, de simulation et de réserves matérielles. Sa plateforme de « cerveau urbain » devrait être utilisée pour assurer une correspondance dynamique entre types d'abris et conditions de catastrophe, formant une logique opérationnelle de préparation ordinaire, de conversion en temps de catastrophe et de réutilisation post-catastrophe. La pré-configuration des ressources et les exercices fondés sur des scénarios peuvent améliorer la capacité de conversion d'urgence et l'élasticité de réponse des différents espaces d'abri. Les normes juridiques, guides techniques et mécanismes d'évaluation doivent soutenir une exploitation institutionnalisée et une réponse conforme aux règles.

Dans l'ensemble, la reconstruction adaptative des types d'abris doit se concentrer sur les différences entre profils de risque urbain et besoins des populations. À partir de la différenciation fonctionnelle et de la dynamique des scénarios, le système d'abris doit passer de catégories larges à une classification fine, et d'une réponse mono-aléa à une adaptation multi-aléas, renforçant la coordination entre humains et espace ainsi que la résilience spatiale requise face aux catastrophes composites.

3.2 Optimiser l'implantation spatiale des abris par une coordination en réseau

Comme support central de la gouvernance de la résilience, les ressources actuelles d'abris de Pékin présentent un déséquilibre en anneau : concentration centrale et faiblesse périphérique. Ce schéma spatial est très typique des mégapoles. Pour construire un système spatial doté d'une capacité de répartition élastique et d'une coordination interdistricts, l'optimisation de l'implantation doit suivre trois dimensions : coordination en anneaux, articulation à double anneau et intégration urbain-rural. Elle peut ainsi faire évoluer le système d'une administration segmentée vers une mise en réseau.

Du point de vue de l'organisation en anneaux, il faut construire un système multi-niveaux de soutien aux abris selon la hiérarchie des zones fonctionnelles de la capitale. Il doit inclure le centre-ville, le sous-centre urbain de Pékin, les villes nouvelles de plaine et les zones transfrontalières. Dans la zone fonctionnelle centrale de la capitale, les abris d'urgence doivent être pleinement garantis selon le positionnement fonctionnel, la demande d'abris et les ressources disponibles. L'implantation doit être fondée sur 1,7 à 1,8 fois la population planifiée, tandis que les besoins de courte et longue durée qui ne peuvent être entièrement couverts par les ressources locales doivent être coordonnés à l'échelle du centre-ville. Dans le sous-centre urbain et les villes nouvelles de plaine, les responsabilités de transfert à

moyen terme et de relogement hors site doivent être clarifiées, et les effets tampons des pôles de transport et des ceintures vertes doivent être pleinement mobilisés. Dans les zones nodales transfrontalières telles que Tongzhou, Pinggu et Changping, des mécanismes de liaison régionale peuvent être coordonnés afin de former une structure de soutien tridimensionnelle composée de noeuds principaux et secondaires.

Du point de vue de la structure de réseau, les grands espaces verts, les corridors de transport et les noeuds d'urgence doivent être intégrés afin de construire un réseau de liaison des abris combinant corridors écologiques, axes de transport et noeuds d'urgence. Les première et deuxième ceintures vertes d'isolement peuvent fonctionner comme zones de transition de pression. Les noeuds de transport et les ceintures vertes de secteurs tels que Fengtai, Chaoyang et Changping peuvent être développés conjointement en corridors à double fonction écologique et d'urgence, avec des abris de longue durée interdistricts et des noeuds logistiques d'urgence. À travers les axes ferroviaires et routiers, il convient d'établir un corridor de réponse à trois niveaux - abri local, évacuation de proximité et relogement hors site -, afin de renforcer l'accessibilité spatiale et la capacité d'acheminement des ressources matérielles.

Du point de vue de la coordination spatiale urbain-rural, les abris d'urgence doivent s'étendre de manière ordonnée vers les franges urbaines-rurales, les noeuds de bourgs et villages et les vallées de montagne. Le relief de Pékin est caractérisé par « trois systèmes montagneux et cinq jardins entourant une ville » ; les zones montagneuses représentent environ deux tiers du territoire municipal et le gradient spatial urbain est net. Un système composite d'abris doit donc être construit pour le centre urbain, l'arrière-pays de plaine et la périphérie montagneuse. Le centre urbain doit renforcer l'abri local et l'évacuation rapide dans les zones bâties denses, en s'appuyant sur les espaces verts de quartier, les équipements culturels et sportifs et les espaces souterrains pour former un réseau de rassemblement efficace. L'arrière-pays de plaine doit utiliser les avantages de transport et d'espace de Tongzhou, Yizhuang et Shunyi, en adoptant des implantations groupées et intégrées en grille afin d'améliorer le relogement à moyen terme et les transferts hors site. La périphérie montagneuse, autour de Yanqing, Fangshan et Miyun, doit combiner les conditions topographiques et l'accessibilité routière avec des implantations distribuées pour garantir l'accessibilité de la réponse d'urgence dans les zones à haut risque.

Le rayon de service, le temps d'accès, la surface protégée par habitant et le nombre de corridors peuvent être intégrés à l'évaluation de l'optimisation spatiale, à la planification statutaire et aux procédures d'évaluation des risques. Cela favorisera le passage de la superposition statique au couplage dynamique, et de l'allocation administrative à la coordination fonctionnelle.

3.3 Reconstruction systémique des mécanismes d'exploitation des abris fondée sur la conversion par scénarios

Dans un contexte de perturbations multi-aléas fréquentes et de fonctionnement métropolitain sous forte pression, le mécanisme d'exploitation des abris d'urgence de Pékin doit passer d'un modèle « désignation statique - réponse unique » à un modèle « conversion dynamique - adaptation multiple ». L'étude propose un mécanisme hiérarchique de liaison fondé sur des scénarios multi-aléas et adapté aux conditions de Pékin. Il construit une logique opérationnelle en boucle fermée - perception, identification, réponse et rétroaction -, formant un système d'exploitation résilient porté par le numérique et la coopération interservices.

Premièrement, il convient d'améliorer un double mécanisme de fonctionnement normal et anormal afin de soutenir la conversion institutionnelle et le changement fonctionnel selon les scénarios (figure 4). En phase de fonctionnement normal, le système d'information de commandement d'urgence de Pékin et la plateforme de jumeau numérique urbain doivent être utilisés pour la gestion des réserves d'abris, la surveillance des risques, la répartition des ressources et les exercices. Les données multi-sources relatives à la météorologie, à l'hydrologie, au transport, à la population, à l'énergie et aux équipements d'abri doivent être intégrées. En clarifiant les normes d'activation, les règles de contrôle et les frontières de responsabilité, il est possible de réaliser une gestion dynamique de la surveillance des catastrophes et des réserves de ressources d'abri. En phase de fonctionnement anormal, la classification des niveaux de réponse, les procédures de répartition des itinéraires et les mécanismes de diffusion de l'information doivent être améliorés. Pendant les catastrophes, un mode de réponse à quatre niveaux - rouge, orange, jaune et bleu - peut être déclenché selon le type d'aléa et son périmètre d'impact. Des modules intelligents de déduction peuvent générer rapidement des plans d'évacuation et d'allocation des ressources, garantissant une activation rapide, des tâches en boucle fermée et des responsabilités claires lors de catastrophes soudaines.

Deuxièmement, l'intégration fonctionnelle des espaces intérieurs et extérieurs doit être renforcée. Dans le centre-ville, les espaces intérieurs sûrs - équipements culturels et sportifs, installations commerciales souterraines et passages de métro - doivent être activés en priorité pour renforcer la protection contre les séismes, pluies torrentielles, pollutions atmosphériques et autres aléas. Dans l'arrière-pays de plaine et les zones de conservation écologique, les espaces ouverts et semi-ouverts doivent remplir des fonctions de dérivation et de tampon, formant un modèle opérationnel de diversité spatiale et de complémentarité fonctionnelle. Les immeubles de grande hauteur et les systèmes de défense civile doivent renforcer la capacité de réponse tridimensionnelle lors de catastrophes extrêmes grâce à un mécanisme coordonné de refuge vertical et de tamponnement souterrain. La coopération entre régions peut permettre de construire un système spatial aux formes variées, adapté aux zones et fonctionnellement complémentaire, afin de répondre aux besoins de refuge lors de séismes, pluies torrentielles, vagues de chaleur et autres aléas. Parallèlement, les terminaux de détection de l'Internet des objets doivent surveiller en temps réel la densité de foule, l'approvisionnement énergétique et la fluidité des corridors, soutenant l'activation dynamique et la répartition automatique des espaces d'abri. Troisièmement, il faut établir un mécanisme de conversion des ressources publiques pour un usage ordinaire et d'urgence, afin de promouvoir la conversion d'urgence et l'extension fonctionnelle des ressources publiques existantes. Pour les lieux d'usage régulier tels que parcs, terrains scolaires et places communautaires, une liste en trois éléments - conditions de conversion, procédures d'activation et soutien en ressources - doit être élaborée. Elle garantit une conversion rapide d'identité et de fonction lorsque survient une catastrophe, permettant une réutilisation efficace selon le principe « service ordinaire aux habitants et refuge d'urgence en cas de catastrophe ». Le sous-centre urbain de Pékin et les villes nouvelles de plaine doivent en outre mobiliser leurs avantages de capacité spatiale pour améliorer les liaisons interdistricts et la réponse par partage temporel, formant un système de coordination multi-niveaux entre évacuation centrale, accueil par le sous-centre et soutien périphérique. Cela peut accroître la redondance et la capacité de répartition dynamique des ressources d'abris.

Enfin, les espaces refuges des immeubles de grande hauteur et les ouvrages de défense civile urbaine doivent être intégrés systématiquement afin de constituer un réseau tridimensionnel de soutien

d'urgence. Dans les zones fonctionnelles centrales et les districts à forte densité, les étages refuges et plateformes d'évacuation des immeubles de grande hauteur doivent être développés et reliés aux passages de métro ainsi qu'aux parkings souterrains de défense civile. Il devient ainsi possible de former un réseau tridimensionnel d'abris combinant rassemblement rapide en surface et tamponnement sûr en souterrain, ce qui améliore la redondance spatiale et la résilience opérationnelle dans les scénarios extrêmes de mégapole.

Dans l'ensemble, grâce à la liaison multidimensionnelle entre conversion normal-anormal, intégration intérieur-extérieur, double usage ordinaire-urgence, refuge en hauteur et défense civile, Pékin peut réaliser une répartition efficace des abris, un approvisionnement précis en ressources et des chaînes de réponse en boucle fermée dans les scénarios couplés multi-aléas. Cette évolution favorisera le passage de l'exploitation des abris d'une réponse d'urgence passive vers une gouvernance proactive.

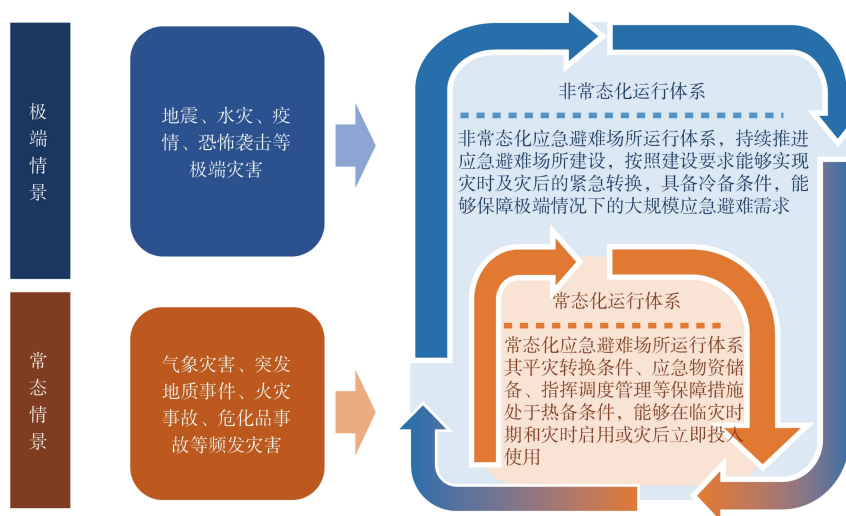


Figure 4. Mécanisme de conversion des espaces d'abri d'urgence du régime normal vers le régime d'urgence

La figure distingue les systèmes d'exploitation des abris d'urgence en régime anormal, qui doivent rester en veille froide et soutenir un refuge d'urgence à grande échelle dans des conditions extrêmes, des systèmes d'exploitation en régime normal, dont les conditions de conversion, les réserves matérielles et les mesures de commandement et de répartition doivent rester en veille chaude pour une utilisation immédiate avant, pendant et après les catastrophes.

4. Conclusions et perspectives

4.1 Principales conclusions

En prenant Pékin comme cas typique, cette étude examine la résilience de réponse des systèmes urbains d'abris d'urgence face au couplage de plusieurs aléas. Elle passe en revue de manière systématique les besoins logiques et les contraintes réelles des systèmes d'abris en matière d'adaptation aux aléas, de transfert de population et d'appariement des ressources, puis propose des trajectoires d'optimisation ciblées dans un cadre d'identification multidimensionnelle et de reconstruction des mécanismes. Les principales conclusions sont les suivantes.

Premièrement, la logique d'évolution des systèmes d'abris appelle de toute urgence une mise à jour de paradigme orientée vers l'adaptation multi-aléas. À mesure que les risques urbains deviennent plus

composites et extrêmes, les systèmes centrés sur des aléas uniques et des configurations statiques ne peuvent plus s'adapter à des environnements de perturbations fortes. En tant que mégapole, Pékin doit étendre son système d'abris d'une réponse post-catastrophe vers un dispositif couvrant l'ensemble du processus - préparation avant catastrophe, transfert pendant la catastrophe et rétablissement après catastrophe -, réalisant ainsi un passage de la classification typologique à la coordination des capacités.

Deuxièmement, la structure fonctionnelle du système d'abris présente des écarts évidents d'appariement. La configuration actuelle des types d'abris à Pékin couvre insuffisamment les fonctions spécifiques aux aléas et souffre de mécanismes faibles de conversion temporelle. Spatialement, elle se caractérise par une distribution inégale entre districts et par des angles morts marqués aux marges urbaines. Sur le plan opérationnel, elle fait face à des responsabilités fragmentées et à des boucles de réponse incomplètes. Ces trois dimensions centrales limitent conjointement la résilience globale du système d'abris.

Troisièmement, l'optimisation du système doit suivre une trajectoire intégrée « type - espace - mécanisme ». Fonctionnellement, les types d'abris doivent être remodelés selon l'adaptation multi-aléas afin de couvrir les cycles de réponse et de correspondre précisément aux groupes desservis. Spatialement, un système de couplage zonal fondé sur la coordination de l'implantation doit être construit pour renforcer l'intégration en réseau multi-échelle, multi-noeuds et interdistricts. Mécaniquement, la liaison coordonnée et la reconstruction résiliente doivent être avancées en améliorant les opérations dynamiques, avec responsabilités claires, partage des données et réponse en boucle fermée.

Quatrièmement, « identification de la structure - diagnostic de la réponse - refonte du système » constitue la logique centrale de recherche. En identifiant la structure de base du système urbain d'abris, en analysant ses difficultés de réponse face aux perturbations des catastrophes composites et en proposant des mesures de refonte systémique, d'optimisation spatiale et de reconstruction des mécanismes, l'étude forme une chaîne complète allant de l'identification du problème à la reconception du système. Elle possède ainsi une forte portée théorique et une réelle adaptabilité pratique.

4.2 Perspectives de recherche

Cette étude développe un cadre analytique pour les systèmes urbains d'abris d'urgence dans les scénarios couplés multi-aléas et propose des trajectoires ciblées. Toutefois, en raison des limites de disponibilité des données et de vérification pratique, plusieurs questions nécessitent des recherches ultérieures.

Premièrement, le couplage profond de la logique de réponse entre aléas doit être approfondi. Les relations de transmission entre aléas, leurs mécanismes de superposition et leurs effets sur la mobilisation des ressources d'abris restent insuffisamment modélisés. Les recherches futures pourront introduire des modèles d'évolution des chaînes de catastrophes et des technologies de simulation dynamique urbaine afin de passer de l'analyse des perturbations composites à la simulation des stratégies.

Deuxièmement, le mécanisme de répartition dynamique des ressources d'abris demeure immature. Cet article aborde surtout l'optimisation de l'implantation à partir de schémas spatiaux statiques. Les travaux futurs devraient combiner la distribution de la population en temps réel, l'accessibilité des transports et les données de prévision des catastrophes afin de construire une plateforme

d'appariement des ressources d'abris dotée d'une capacité de répartition en temps réel, permettant une réponse élastique et l'évolution dynamique des espaces d'abri.

Troisièmement, les mécanismes de gouvernance collaborative impliquant de multiples acteurs requièrent une vérification empirique plus poussée. Dans l'exploitation réelle, les systèmes d'abris supposent la coopération des gouvernements, bureaux de sous-district, communautés, entreprises, institutions publiques et autres acteurs. L'intégration de mécanismes opérationnels de co-construction, co-gouvernance et co-gestion dans le design institutionnel constitue un enjeu clé pour la mise en oeuvre future des systèmes d'abris et un élément important de la construction de villes résilientes.

Notes

[1] Le texte source marque à cet endroit le principe de la chaîne d'événements par le symbole de note ①, mais aucune note explicative distincte n'apparaît dans le texte extrait du PDF.

Références

- [1] WEI Y X, JIN L Z, XU M W, et al. Instructions pour la planification des abris d'urgence et des espaces ouverts en Chine : enseignements tirés des expériences et expertises internationales[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2020, 51: 101813.
- [2] HUNG C H, HUNG H C, HSU M C. Articuler l'interaction entre résilience, vulnérabilité et adaptation aux transformations de long terme des espaces métropolitains pour la gestion des risques de catastrophes liés au climat[J]. Climate Risk Management, 2024, 44: 100618.
- [3] LIU B, LI Y B, ZHANG Y, et al. Méthode d'aide multicritère à la décision pour le choix de sites d'abris d'urgence tenant compte du risque d'inondation : le cas de Zhuhai, Chine[J]. Cleaner Engineering and Technology, 2025, 24: 100892.
- [4] AHMED I, GUYTON S T. La trajectoire de récupération du logement des survivants du typhon Yolanda : revue critique de synthèse[J]. Progress in Disaster Science, 2024, 24: 100378.
- [5] RAN Jing, LIU Xiangyi, HE Lei, et al. Zonage de prévention des catastrophes dans les zones urbaines centrales fondé sur le cercle de vie communautaire : le cas du comté de Huayuan, province du Hunan[J]. Planners, 2024, 40(9): 98-106.
- [6] WANG Yixin, ZHANG Shuo, LIU Delin. Zonage spatial des abris urbains à double usage ordinaire-urgence : le cas de la zone urbaine principale de Luoyang[J]. City and Disaster Reduction, 2025(3): 42-50.
- [7] ZHU Anfeng, FAN Xiufang, DU Wenrui, et al. Évaluation globale de la capacité de prévention et de réduction des catastrophes des abris d'urgence dans une perspective de résilience : le cas du district d'Ouhai, Wenzhou[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(5): 223-230.
- [8] DAI Shenzhi, LIU Tingting, GAO Xiaoyu, et al. Système d'élaboration et mécanisme de mise en oeuvre de la planification territoriale et spatiale de prévention et réduction des catastrophes[J]. Urban Planning Forum, 2023(1): 48-53.
- [9] WANG Wei, XIA Chenhong, MA Donghui, et al. Méthode d'évaluation globale des risques multi-aléas sous mécanisme d'incitation couplé[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(3): 161-167.
- [10] WANG Wei, QU Zinuo, GUO Xiaodong, et al. Cadre et méthode de construction des réseaux de corrélation et de chaînes urbaines multi-aléas[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, 19(11): 5-12.

- [11] WANG Wei, ZHUANG Yuanyuan, ZHANG Luemiao, et al. Implantation optimisée des abris urbains d'urgence dans les scénarios de catastrophes composites[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2025, 51(4): 375-385.
- [12] YANG Bing, HE Yong, ZHAO Dan. Évaluation globale des risques urbains multi-aléas : le cas de Pékin[C]//Partage et qualité : actes de la Conférence nationale annuelle de planification 2018 (01 Sécurité urbaine et planification de la prévention des catastrophes). Urban Planning Society of China; Hangzhou Municipal People's Government, 2018.
- [13] WEI Miling, WANG Wei, RONG Qingwen, et al. Modèle d'évaluation du risque d'évacuation vers les abris lors de catastrophes composites en tenant compte de l'incertitude[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(7): 203-212.
- [14] YANG Xuanmei. Résilience spatiale territoriale : cadre conceptuel et trajectoires de mise en oeuvre[J]. Urban Planning Forum, 2021(3): 112-118.
- [15] PENG Chong, ZUO Peiwen, LI Yuewen, et al. Couplage multi-risques dans l'espace urbain et réponses de planification résiliente[J]. Urban Planning Forum, 2024(5): 88-97.

Traduction assistée par IA