

Évaluation de la résilience des quartiers résidentiels urbains aux pluies d'orage et aux inondations à partir des perturbations des déplacements des habitants, et implications pour la planification : le cas de Shenzhen

Auteurs

CHENG Yulin, GAN Xinyue, YANG Xiaochun, GUO Renzhong

Résumé

Les quartiers résidentiels constituent des unités fondamentales pour analyser la résilience de la sécurité urbaine et sa différenciation spatiale. Les recherches existantes s'appuient principalement sur des données statiques pour des évaluations à l'échelle macroscopique et peinent donc à saisir l'évolution dynamique de la résilience urbaine à des échelles fines. Cette étude prend les perturbations spatio-temporelles de la mobilité des habitants pendant les catastrophes comme indicateur central de la résilience et construit un cadre d'évaluation, fondé sur les données, de la résilience des quartiers résidentiels face aux pluies d'orage et aux inondations. À partir de données de signalisation mobile, ce cadre est appliqué à 1 087 quartiers résidentiels de Shenzhen durant la période de précipitations concentrées de l'épisode pluvieux extrême « 9.7 » de 2023. Les résultats montrent que les quartiers de logements commerciaux présentent une résilience nettement plus élevée que les villages urbains, tandis que les quartiers construits à différentes périodes affichent une forte hétérogénéité de résilience pendant la catastrophe et après celle-ci. L'analyse de corrélation confirme que l'inondation des routes est un facteur important de perturbation des déplacements des habitants et valide l'efficacité du cadre pour identifier les différences spatiales de résilience entre quartiers. La validation démographique révèle en outre que l'utilisation de données de signalisation mobile pour l'évaluation micro-échelle de la résilience peut sous-estimer les risques réels auxquels sont exposés les quartiers vieillissants. Le cadre proposé fournit un appui quantitatif au suivi dynamique des catastrophes, à l'alerte précoce, au diagnostic de renouvellement urbain et à la planification durable.

Mots-clés

résilience des quartiers résidentiels aux pluies d'orage et aux inondations ; données de signalisation mobile ; perturbation des déplacements ; différenciation spatiale ; cadre d'évaluation

Introduction

Dans un contexte de dérèglement climatique mondial de plus en plus extrême, la résilience climatique urbaine est devenue un enjeu central de la recherche internationale et des pratiques de gouvernance. En tant qu'unité de base de la gouvernance urbaine, le quartier résidentiel est à la fois le support spatial de la vie quotidienne des habitants et une ligne de front de la gestion d'urgence en cas de catastrophe. Des métropoles internationales comme Londres et New York ont déjà intégré le renforcement de la capacité des quartiers à résister aux catastrophes naturelles dans leurs stratégies majeures d'adaptation climatique [1]. Toutefois, les mégapoles chinoises connaissent depuis quelques années des épisodes de pluies extrêmes de plus en plus fréquents. Les systèmes climatiques peuvent maintenir une circulation résiduelle active sous l'effet dit de « train », de sorte que des pluies intermittentes continuent de produire des impacts secondaires [2]. Ces événements entravent fortement le fonctionnement normal

des activités urbaines, notamment la production et la vie quotidienne des habitants, et ralentissent le processus de rétablissement après catastrophe.

Les recherches existantes évaluent souvent la résilience urbaine à grande échelle au moyen d'indicateurs statiques, ce qui rend difficile l'identification dynamique des différences de résilience à l'échelle du quartier sur l'ensemble du cycle de catastrophe. Cette étude introduit donc les caractéristiques spatio-temporelles des perturbations de déplacement des habitants et construit un cadre d'évaluation de la résilience des quartiers résidentiels urbains face aux pluies d'orage et aux inondations, fondé sur les données. Ce cadre est utilisé pour analyser l'épisode pluvieux extrême « 9.7 » survenu à Shenzhen en 2023. Il identifie l'hétérogénéité spatio-temporelle de la résilience selon les types de quartiers, valide le modèle au moyen de données réelles sur les routes inondées et révèle les biais potentiels de l'usage des mégadonnées dans l'évaluation de la résilience à l'échelle micro. La méthode vise à fournir un appui scientifique à la réponse d'urgence fine, au diagnostic de renouvellement des quartiers et à la planification adaptée au climat.

1. Revue des méthodes d'évaluation de la résilience urbaine aux pluies d'orage et aux inondations

La recherche sur la résilience urbaine a connu une transition paradigmatique de la vulnérabilité vers la résilience [3]. Les travaux antérieurs [4-6] héritaient pour l'essentiel du cadre traditionnel de la vulnérabilité fondé sur des systèmes d'indicateurs composites et se concentraient sur l'évaluation des attributs intrinsèques avant catastrophe. En raison des limites d'accès aux données, le choix des indicateurs et l'attribution des pondérations comportaient inévitablement des biais subjectifs. Après le développement, par Cutter et al. [7-9], de l'indice de vulnérabilité sociale et des indicateurs de base de résilience communautaire, l'attention de la recherche s'est déplacée de l'évaluation statique vers la réponse dynamique des systèmes. De nombreux chercheurs ont alors commencé à utiliser des données spatio-temporelles multi-sources pour saisir les caractéristiques processuelles de la résilience urbaine.

La résilience urbaine aux pluies d'orage et aux inondations désigne la capacité globale d'un système urbain à résister, absorber, s'adapter et se rétablir face aux impacts des catastrophes pluviales et hydrologiques [10-11]. Conformément au concept général de résilience, son contenu central comprend généralement trois dimensions : réduire efficacement la baisse de performance durant la catastrophe, se rétablir rapidement après la perturbation et atteindre un niveau de récupération relativement élevé [12-15]. Les échelles spatiales de ces travaux couvrent les individus ou les bâtiments, les communautés, les villes et les régions [16-18]. Qu'il s'agisse d'analyses de scénarios fondées sur des logiciels de simulation [19], de méthodes de dynamique des systèmes utilisant l'analyse des réseaux sociaux [20], d'analyses empiriques fondées sur les mégadonnées [21-24] ou de courbes de résilience [25], la quantification de la résilience est devenue un outil théorique largement mobilisé.

Les recherches fondées sur les courbes de résilience permettent de saisir de manière systématique la trajectoire temporelle de la performance d'un système avant et après une catastrophe. En extrayant des points clés, tels que le point d'impact, le point de récupération et le point de stabilisation, elles quantifient la surface totale de perturbation, le taux de perte maximal, la vitesse de récupération et la forme de la courbe [26-29]. Cette approche est devenue un paradigme central des études de résilience et a été appliquée à la description de la réponse dynamique de fonctions urbaines critiques, telles que les réseaux de transport, le drainage, l'alimentation électrique, les équipements médicaux et la production économique [30]. Les mégadonnées offrent un appui de haute précision à l'analyse des comportements spatio-temporels des populations urbaines et sont de plus en plus utilisées pour

modéliser les comportements en situation de catastrophe. Des travaux existants ont prolongé les cadres de courbes de résilience à l'aide de données issues des médias sociaux, de trajectoires GPS et de données de signalisation mobile. Certains emploient l'unité journalière pour identifier des perturbations macroscopiques de long terme et des modèles de récupération à double pic [22] ; d'autres recourent à l'unité horaire pour saisir l'impact de court terme de pluies extrêmes et montrent que le rétablissement du système peut être postérieur à la fin de l'événement [23], ou identifient des effets de récupération différée dans les flux de réseaux de mobilité [24]. Ces recherches révèlent les caractéristiques de perturbation des déplacements induites par les événements météorologiques extrêmes, mais elles restent insuffisantes dans le traitement des impacts multi-stades des catastrophes climatiques.

Les études existantes agrègent souvent l'impact durant la catastrophe et la récupération post-catastrophe en un seul indicateur de perturbation, ce qui rend difficile la distinction entre leurs mécanismes moteurs et leurs effets cumulatifs, et affaiblit la compréhension du mécanisme de catastrophe. En particulier, l'évaluation dynamique de la résilience à l'échelle du quartier manque encore de méthodes adaptées. Peu de travaux disposent de moyens efficaces pour quantifier les effets des pluies extrêmes sur les comportements de déplacement des habitants des quartiers à différentes étapes [31]. Pour combler cette lacune, cette étude construit, à l'échelle horaire, des courbes de fluctuation des déplacements des habitants avant et après la catastrophe [32]. Le moment de retrait des eaux est utilisé pour distinguer les étapes. Les phases traditionnelles de résistance et de récupération sont considérées comme l'étape de catastrophe afin de quantifier l'impact direct, tandis qu'une étape de perturbation différée est ajoutée comme phase post-catastrophe afin de mesurer les effets secondaires. Cette approche correspond aux caractéristiques climatiques multi-stades des pluies extrêmes, permet une évaluation dynamique de la résilience de différents types de quartiers urbains et soutient la traduction du diagnostic fin en gouvernance d'urgence et en implications de planification [33].

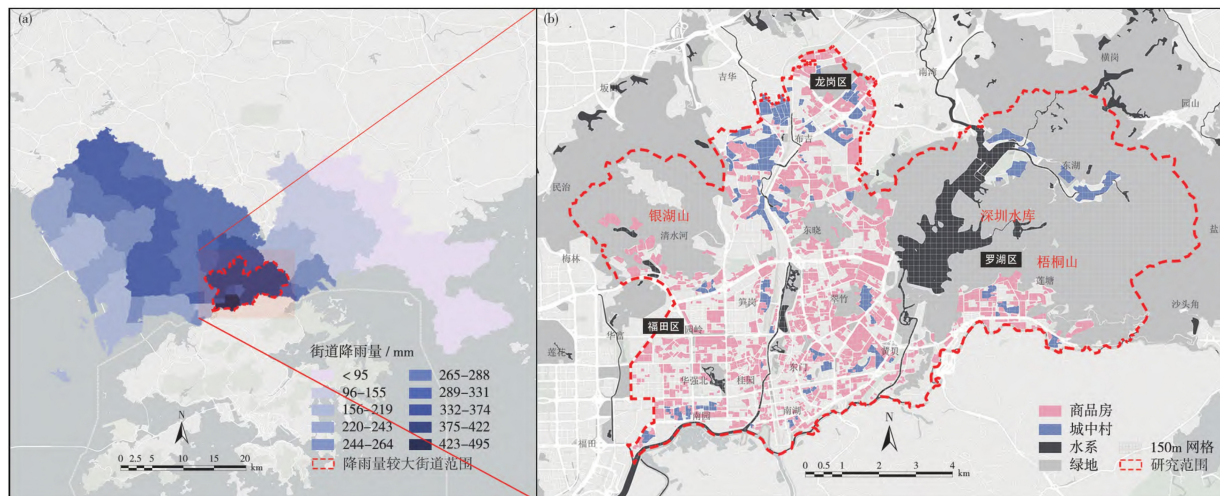
2. Zone d'étude empirique et méthodes de recherche

2.1 Zone d'étude, sources de données et traitement

Selon l'Observatoire météorologique de Shenzhen, entre 17 h le 7 septembre et 6 h le 8 septembre 2023, Shenzhen a connu un épisode de pluie extrême dépassant les records historiques. Le système convectif intense présentait un effet de « train » marqué, de sorte que des précipitations intermittentes ont continué d'affecter le processus de rétablissement. Cette étude retient 14 sous-districts où les précipitations ont été concentrées : l'ensemble du district de Luohu, les sous-districts de Yuangang, Huaqiangbei et Nanyuan dans le district de Futian, ainsi que le sous-district de Buji dans le district de Longgang (figure 1).

À partir des données AOI de quartiers résidentiels de Baidu Maps, combinées aux données OpenStreetMap, aux données vectorielles des bâtiments de Shenzhen en 2018 et aux coordonnées des logements commerciaux issues de la plateforme Anjuke, l'étude identifie et sélectionne 1 087 unités de quartiers résidentiels dans la zone d'étude, dont 103 villages urbains et 984 quartiers de logements commerciaux (figure 1(b)). Les caractéristiques de déplacement des habitants sont dérivées des données de signalisation mobile fournies par la plateforme China Unicom Smart Footprint DAAS. Le jeu de données comprend environ un million de trajectoires anonymisées d'appareils dans la zone d'étude avant et après la pluie extrême, entre le 2 et le 24 septembre 2023.

En outre, les informations sur les routes inondées pendant l'événement « 9.7 » de 2023, publiées par le Bureau des affaires hydrauliques de Shenzhen et le Bureau de gestion des urgences, ainsi que les données de structure démographique au niveau des sous-districts issues du septième recensement national de la population de 2020, sont utilisées pour valider la fiabilité de la méthode d'évaluation.



(a) 深圳“9.7”极端暴雨24h降雨量空间分布示意图

(b) 研究范围内住区空间单元分布图

Figure 1. Zone d'étude

La figure comprend une carte de la distribution spatiale des précipitations sur 24 heures durant l'épisode pluvieux extrême « 9.7 » de Shenzhen et une carte des unités spatiales de quartiers résidentiels dans la zone d'étude.

2.2 Méthodes de recherche

L'étude quantifie le degré d'impact des pluies extrêmes sur les quartiers résidentiels et leur capacité de rétablissement en calculant les variations du volume de déplacements des habitants pendant la catastrophe par rapport aux périodes sans catastrophe. Elle combine ensuite les données sur les routes inondées, les périmètres d'accessibilité piétonne, la connectivité externe du réseau viaire et la structure démographique des sous-districts pour procéder à une validation multidimensionnelle. Le processus d'évaluation comprend trois étapes clés (figure 2).

2.2.1 Construction de la base de données des déplacements

L'étude utilise le structured query language (SQL) sur la plateforme DAAS pour collecter des enregistrements spatio-temporels anonymisés, en garantissant l'usage légal des données et la protection stricte de la vie privée des utilisateurs. Les limites des quartiers résidentiels sont importées dans la plateforme, puis SQL est utilisé pour calculer le volume total horaire des déplacements des habitants de chaque quartier. Une base de données des déplacements des quartiers est ainsi constituée, couvrant les périodes pré-catastrophe, pendant la catastrophe et post-catastrophe.

Les variations du volume de déplacements entre le 6 et le 15 septembre 2023, soit une période continue de 10 jours, sont retenues comme base des courbes de fluctuation des déplacements. Cette période couvre la pluie extrême et une semaine ouvrée ultérieure, ce qui permet de saisir les tendances persistantes de mobilité après la catastrophe. Afin d'éviter l'influence des jours fériés, le 5 septembre, journée ensoleillée précédant l'alerte, et la moyenne horaire du 18 au 22 septembre après stabilisation de l'événement sont choisis comme ligne de base des jours ouvrés hors catastrophe. Les 2 et 3

septembre, puis les 23 et 24 septembre, servent à calculer les lignes de base du samedi et du dimanche hors catastrophe. Ces références forment ensemble trois lignes de base horaires pour chaque quartier : jour ouvré, samedi et dimanche.

Une moyenne mobile est utilisée pour générer les courbes de fluctuation des déplacements. La fenêtre est fixée à 7 heures afin de lisser le bruit tout en conservant les tendances de l'impact. L'analyse préliminaire montre que plus de 50 % des quartiers présentent un schéma de perturbation en deux temps : « impact pendant la catastrophe + perturbation différée ».

2.2.2 Évaluation et classification de la résilience des quartiers aux pluies d'orage et aux inondations

En suivant la logique centrale des courbes de résilience, l'étude mesure la performance du système face à un événement catastrophique sur une période continue. Elle analyse les changements du volume horaire de déplacements des habitants avant et après la pluie extrême, et représente inversement la résilience du quartier par le degré de perturbation des comportements de déplacement. La méthode est optimisée de manière adaptative selon les caractéristiques climatiques de l'épisode « 9.7 ».

Premièrement, une étape de perturbation différée est introduite afin de saisir les impacts secondaires des pluies extrêmes sur les déplacements des habitants. L'effet de ces événements sur la mobilité est souvent multi-stade : un impact initial directement lié aux précipitations est suivi d'effets différés dus à des pluies intermittentes, et les déplacements peuvent rester perturbés plusieurs jours après la fin des précipitations principales. Ainsi, contrairement aux études de résilience antérieures qui se concentrent surtout sur un choc unique, cette étude intègre la perturbation différée comme étape post-catastrophe dans le calcul des indicateurs de résilience, permettant de mieux décrire la résilience des quartiers aux différentes étapes de la pluie extrême et de ses effets secondaires.

Deuxièmement, l'intervalle de fluctuation des déplacements hors catastrophe est utilisé pour déterminer les points caractéristiques de l'événement. Les déplacements quotidiens des habitants varient naturellement ; par conséquent, le point d'impact et le point de stabilisation ne sont pas des points zéro, mais des intersections avec l'intervalle de fluctuation normal. L'étude définit la différence de volume de déplacements à l'heure t comme ΔSt , calcule l'écart type σ de la séquence de différences et utilise σ comme limite de référence de l'intervalle de fluctuation hors catastrophe.

Troisièmement, l'étude construit une mesure d'intensité de perturbation des déplacements par habitant qui renforce l'effet cumulatif de la durée. Selon l'intensité et la durée de la perturbation, celle-ci est divisée en deux types : forte intensité de courte durée et intensité moyenne de longue durée. Plus la durée est longue, plus les types d'activités de déplacement affectés sont nombreux, et plus la consommation cumulative de ressources et les pertes socio-économiques sont importantes. L'intensité de perturbation A est donc pondérée par le temps. L'indicateur composite met en évidence le coût cumulatif de la perturbation des déplacements sur l'ensemble du cycle de catastrophe [35] et est normalisé en « intensité de perturbation des déplacements par habitant » afin de permettre la comparaison entre quartiers (tableau 1). Par rapport aux indicateurs traditionnels, cette mesure est plus sensible aux différences de résilience entre petites unités spatiales.

Selon la synthèse du Bureau météorologique de Shenzhen [Note 1], 48 heures sont utilisées comme ligne de séparation entre les étapes pendant la catastrophe et après la catastrophe. La perturbation pendant la catastrophe correspond à la somme de toutes les perturbations de déplacement avant cette limite de 48 heures, et la perturbation post-catastrophe est calculée de la même manière après celle-ci. Si une perturbation traverse cette limite, elle est classée selon la surface la plus importante avant ou

après la ligne. Enfin, la méthode K-means est utilisée pour classer séparément la résilience pendant la catastrophe et après la catastrophe, tandis que la méthode du coude et le coefficient de silhouette déterminent le nombre optimal de classes.

Tableau 1. Algorithmes des indicateurs

Indicateur	Formule	Signification
Intervalle de fluctuation hors catastrophe	$\sigma = \sqrt{((1/N) * \sum_t (\Delta S_t - \text{mean}(\Delta S))^2)}$, $N = 24 \text{ h}$	Sigma est calculé à partir de la différence de volume de déplacements entre deux journées normales comparables dans une fenêtre de 24 heures. Il sert de limite de référence de la fluctuation des déplacements hors catastrophe.
Intensité de perturbation des déplacements par habitant	$V1 = A1 / (N_i - T1)$; $A1 = \int_{t0}^{t2} [\max(0, Q_{\max} - Q_t - \sigma)] dt$ ($t2 - t0$)	V1 désigne l'intensité de perturbation par habitant lors de la première fluctuation dans le quartier i ; N_i est la population totale du quartier ; A1 est l'intensité de la perturbation initiale et reflète l'effet cumulatif de la baisse des déplacements entre le point d'impact et le point de stabilisation ; T1 est la durée de la perturbation ; $Q_{\max}$ est la ligne de base des déplacements et Q_t le volume réel de déplacements des habitants.

2.2.3 Validation de la méthode d'évaluation

Pour vérifier l'applicabilité et la fiabilité de la méthode dans des situations réelles, l'étude introduit des variables externes multidimensionnelles pour une validation empirique.

Premièrement, elle analyse la proximité des routes inondées et la connectivité routière externe. Les habitants annulent souvent leurs déplacements lorsque les itinéraires sont bloqués par des routes inondées. Les quartiers proches de ces routes et disposant d'un faible choix d'itinéraires, opérationnalisés comme une faible connectivité externe, devraient supporter des pertes fonctionnelles et des contraintes de déplacement plus importantes en cas d'inondation pluviale. Pour tester cette hypothèse, l'étude construit des zones tampons d'accessibilité piétonne aux routes inondées selon des seuils de plus de 15 minutes, 10-15 minutes, 5-10 minutes et moins de 5 minutes. Un test du chi carré examine la significativité de l'association entre le niveau de résilience et la proximité des routes inondées. Sur la base de la syntaxe spatiale, la centralité d'intermédiation, qui représente l'importance structurelle du réseau viaire, et la profondeur angulaire moyenne, qui représente l'efficacité de l'organisation des itinéraires, sont utilisées pour caractériser la connectivité routière externe. Les quartiers sont divisés en groupes de faible et de forte connectivité, puis des tests du chi carré stratifiés sont menés afin d'analyser l'interaction entre la proximité des routes inondées et la connectivité externe.

Il convient de noter que l'altitude du quartier n'est pas retenue comme variable principale de validation. Bien qu'elle soit un facteur physique traditionnel de répartition des inondations, sa relation avec la profondeur de l'eau et les restrictions de déplacement dépend des systèmes de drainage, de la capacité

des réseaux de canalisations, de la microtopographie, de la perméabilité des sols et des dispositifs d'urgence. Il ne s'agit donc pas d'une relation simplement linéaire. De plus, l'altitude du quartier reflète surtout le risque que le quartier lui-même soit inondé, mais elle n'explique pas directement la manière dont les conditions d'inondation affectent les déplacements des habitants.

Deuxièmement, la structure démographique au niveau du sous-district est utilisée pour la validation. Afin de déterminer si les données de signalisation mobile comportent un biais de représentation à l'échelle du quartier pour les groupes vulnérables, tels que les personnes âgées, les enfants et une partie des populations flottantes à faible revenu, et afin d'explorer la portée explicative sociale de la méthode, l'étude introduit les données de structure démographique issues du septième recensement national de la population de Shenzhen. Elles comprennent la part des habitants âgés de 65 ans et plus, la part des enfants de 0 à 14 ans et le nombre moyen d'années d'éducation des habitants de 15 ans et plus. L'analyse de corrélation de rang de Spearman est utilisée pour tester la force et la significativité de la relation entre la résilience moyenne au niveau des rues et la structure démographique.

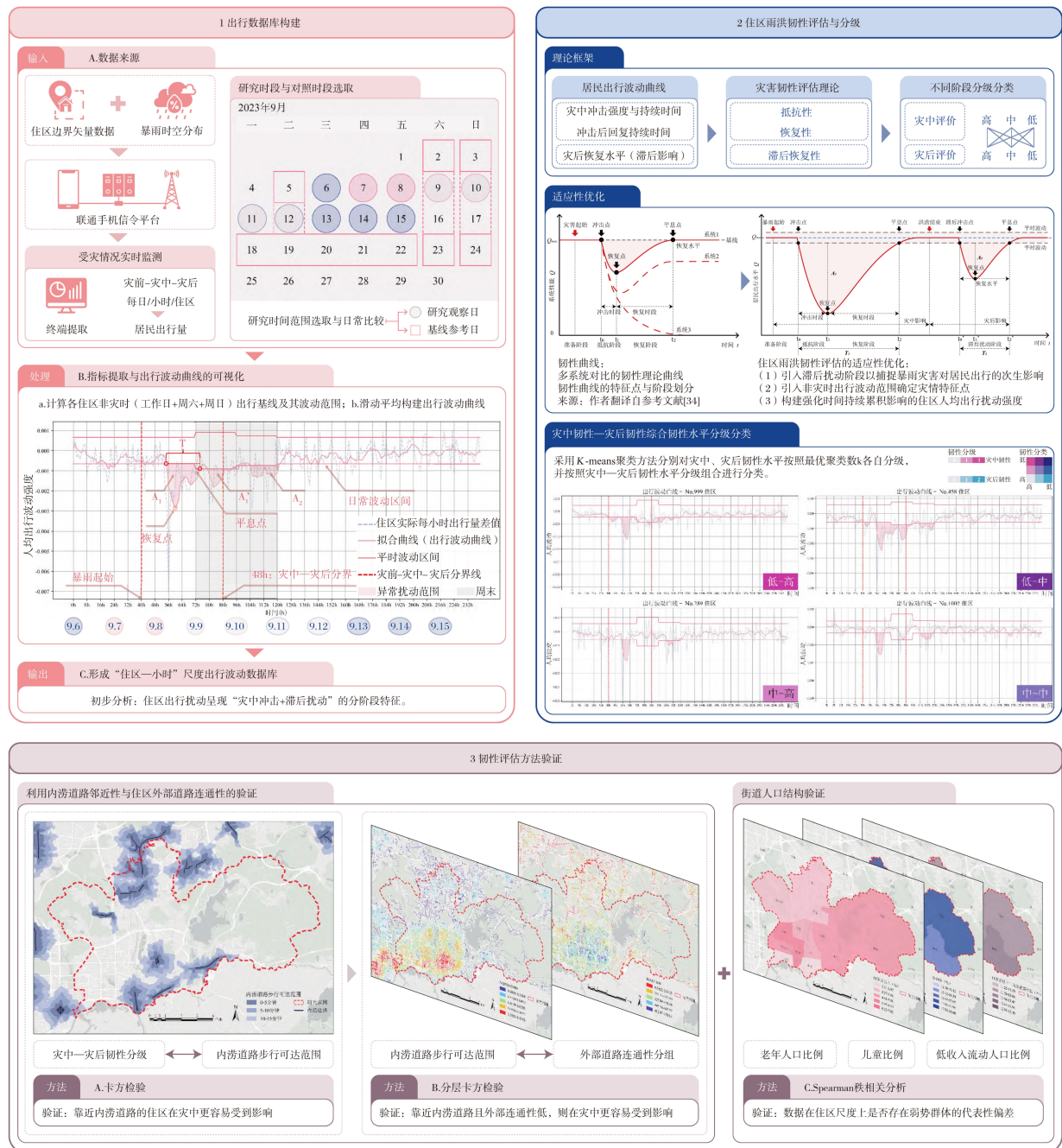


Figure 2. Méthodes de recherche

La méthode intègre trois modules : construction de la base de données des déplacements, évaluation et classification de la résilience des quartiers aux pluies d'orage et aux inondations, et validation de la méthode d'évaluation. Elle compare les courbes de déplacement pendant la catastrophe et hors catastrophe, distingue les étapes pendant et après la catastrophe, applique une classification K-means de la résilience et valide les résultats par les zones tampons des routes inondées, la connectivité routière externe et la structure démographique des sous-districts.

3. Résultats de recherche

3.1 Niveaux de résilience des quartiers pendant et après la catastrophe

Les résultats de clustering de l'intensité de perturbation des déplacements par habitant pendant et après la catastrophe montrent que les courbes de somme des carrés des erreurs présentent toutes un coude à $k = 3$, tandis que les coefficients de silhouette sont également relativement élevés. Les niveaux de résilience pendant et après la catastrophe sont donc chacun divisés en trois classes, notées 0, 1 et 2 pour représenter respectivement une résilience élevée, moyenne et faible ; les quartiers sont ensuite classés selon la combinaison des niveaux pendant et après la catastrophe.

Les cartes de résilience (figure 3) montrent que les quartiers de faible résilience présentent des configurations spatiales contiguës. Les quartiers de faible résilience pendant la catastrophe se concentrent principalement dans le sous-district de Liantang, dans le district de Luohu, ainsi qu'aux limites des sous-districts de Dongmen, Huangbei et Nanhu. Ces secteurs sont relativement bas, et leurs systèmes de drainage peuvent ne pas supporter des précipitations courtes mais très intenses, entraînant de graves inondations et des impacts directs sur les déplacements des habitants. Les nouveaux quartiers de faible résilience apparus après la catastrophe se concentrent principalement dans le sous-district de Guiyuan à Luohu et dans celui de Nanyuan à Futian. Ces secteurs sont proches de zones commerciales denses et peuvent subir les effets de la congestion du trafic et de l'intensité des activités socio-économiques, ce qui prolonge les perturbations après la pluie extrême. Les quartiers présentant une faible résilience à la fois pendant et après la catastrophe se concentrent dans le sous-district de Buji, dans le district de Longgang, où se trouvent de nombreux quartiers anciens et villages urbains. Le vieillissement des infrastructures et l'insuffisance des systèmes de drainage favorisent les inondations et intensifient les perturbations persistantes des déplacements pendant et après l'événement. En outre, des secteurs comme Sungang et Qingshuihe à Luohu montrent de petits regroupements contigus, tandis qu'un petit nombre de quartiers de faible résilience apparaissent de manière isolée. Ces configurations reflètent l'influence potentielle du niveau d'infrastructure, de l'efficacité de la gouvernance et des différences de relief sur la distribution de la résilience.

La comparaison entre zones montre en outre que les quartiers de faible résilience dans l'aire d'étude se concentrent principalement à Luohu et Longgang, tandis que Futian, où les conditions économiques sont meilleures, compte nettement moins de quartiers de faible résilience. Ce résultat reflète l'influence profonde de la forme spatiale urbaine, des infrastructures de l'environnement bâti et de l'allocation des ressources économiques sur la capacité de résistance des quartiers face aux catastrophes. La comparaison entre logements commerciaux et villages urbains montre que les quartiers de faible résilience sont principalement des villages urbains. Certains villages urbains présentent une résilience nettement inférieure à celle des quartiers de logements commerciaux voisins, ce qui révèle de graves déficits d'infrastructures dans une partie de l'environnement bâti des villages urbains et met en évidence leur désavantage de résilience dans des conditions géographiques similaires.

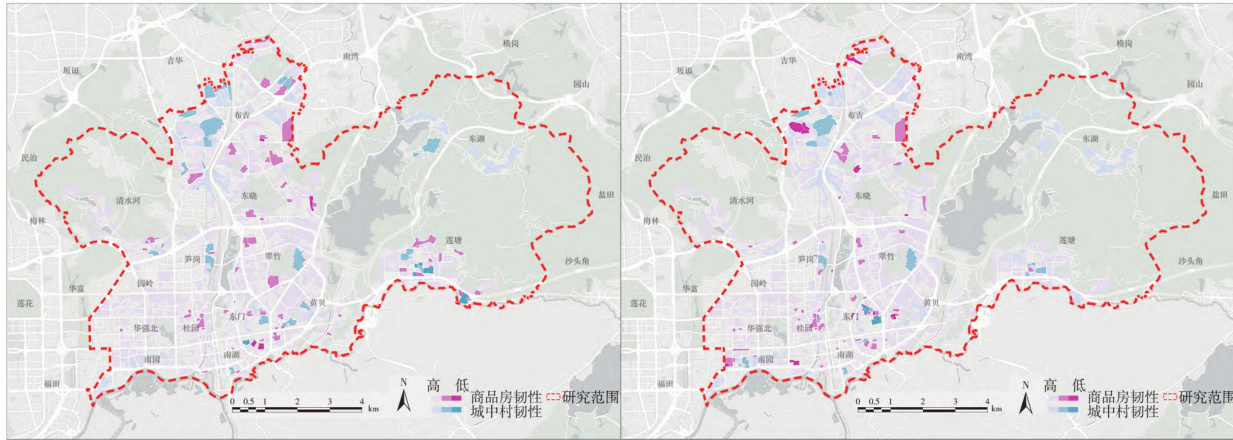


Figure 3. Cartes de résilience des quartiers résidentiels

La figure présente les cartes de résilience des quartiers pendant et après la catastrophe, en identifiant les zones contiguës de faible résilience et leurs différences entre Luohu, Futian et Longgang.

3.2 Différences de résilience pendant et après la catastrophe selon les types de quartiers

À partir des résultats de l'évaluation, l'étude produit des diagrammes en boîte et des distributions de points pour analyser les changements de résilience des différents types de quartiers pendant et après la catastrophe, et révéler leurs caractéristiques différenciées (figure 4).

Les villages urbains présentent globalement une résilience plus faible pendant et après la catastrophe. Le diagramme en boîte montre que la moustache supérieure de la perturbation pendant la catastrophe est fortement allongée, et plusieurs échantillons de perturbation extrêmement élevée élargissent la plage de distribution (figure 4(a)). Cela peut être attribué à l'insuffisance des infrastructures et au manque de ressources sociales, qui amplifient les impacts de la catastrophe. Bien que la perturbation post-catastrophe diminue, elle reste relativement élevée et se rapproche du niveau de perturbation des quartiers de logements commerciaux pendant la catastrophe, ce qui indique des effets différés plus importants au stade de récupération dans les villages urbains. À l'inverse, les quartiers de logements commerciaux présentent une médiane plus faible de perturbation pendant la catastrophe, même si la distribution de points révèle encore quelques échantillons de faible résilience. Leur perturbation post-catastrophe diminue fortement, probablement grâce à des infrastructures plus complètes et à un appui social suffisant, permettant une récupération plus efficace.

Le diagramme en boîte par période de construction (figure 4(b)) montre que les quartiers de logements commerciaux construits avant 2000 et ceux construits entre 2000 et 2010 présentent une résilience globale similaire. Cependant, la distribution de points révèle davantage d'échantillons de faible résilience parmi les quartiers antérieurs à 2000, probablement en raison du vieillissement des infrastructures et de l'insuffisance du soutien social. Les quartiers de logements commerciaux construits entre 2000 et 2010 se rétablissent plus rapidement après la catastrophe, bénéficiant de normes de planification améliorées et d'un environnement bâti progressivement mis à niveau. Les quartiers construits après 2010 présentent la médiane la plus élevée de perturbation des déplacements pendant la catastrophe et un intervalle interquartile plus important, mais ils comprennent le moins d'échantillons de faible résilience et se rétablissent le plus rapidement après la catastrophe. Ce schéma est cohérent avec une meilleure infrastructure et une allocation de ressources plus favorable.

Même si l'hypothèse traditionnelle suppose une corrélation positive entre période de construction, qualité du quartier et résilience, cette étude montre que les différences de résilience pendant la catastrophe révèlent une hétérogénéité non linéaire de la capacité de résistance et des mécanismes de réponse des populations sous l'impact d'une pluie extrême. De manière générale, l'évaluation de la résilience des quartiers doit dépasser les indicateurs uniques de l'environnement bâti et considérer les changements dynamiques de la résistance pendant la catastrophe et de la récupération après celle-ci. La faible résilience des villages urbains souligne l'importance des attributs socio-économiques et de l'allocation des ressources d'urgence, tandis que les différences entre périodes de construction des logements commerciaux révèlent l'influence de l'évolution des infrastructures.

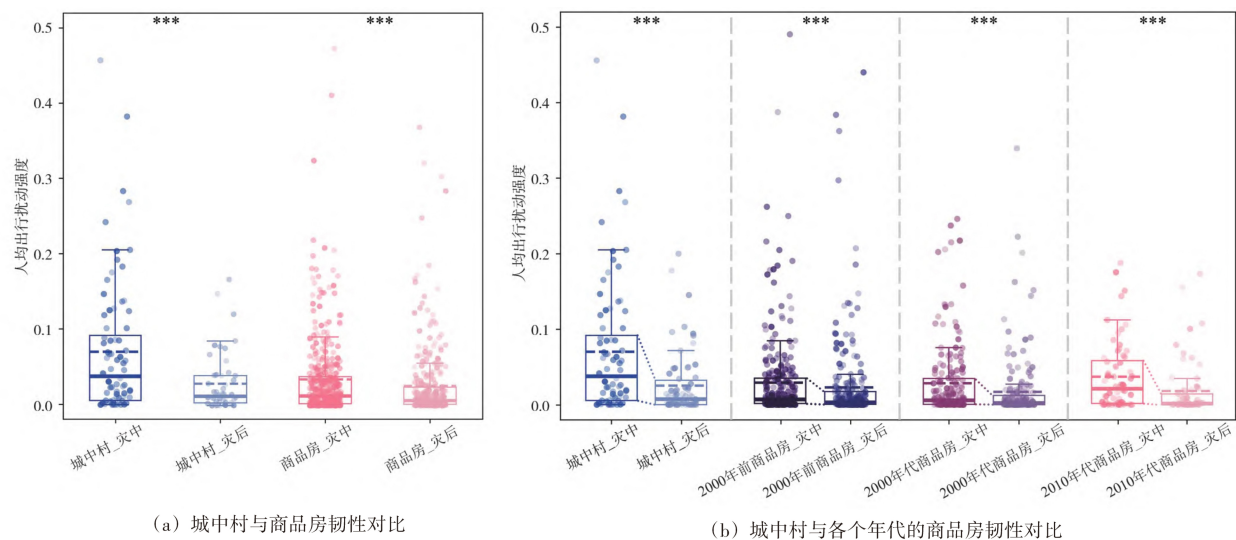


Figure 4. Diagrammes en boîte et distribution de points des niveaux de résilience des quartiers résidentiels

La figure compare la résilience entre villages urbains et quartiers de logements commerciaux, puis compare les villages urbains aux quartiers de logements commerciaux construits à différentes périodes.

3.3 Validation des résultats de l'évaluation de la résilience des quartiers

Les résultats du test du chi carré (figure 5) montrent que la résilience pendant la catastrophe est significativement associée à la distance de marche jusqu'aux routes inondées (chi-square = 14.5216, $P = 0.0243 < 0.05$). Plus un quartier est proche des routes inondées, plus la probabilité qu'il présente une faible résilience pendant la catastrophe est élevée. L'association entre la résilience post-catastrophe et la distance de marche jusqu'aux routes inondées n'est pas significative (chi-square = 12.0748, $P = 0.0603 > 0.05$), ne montrant qu'une tendance marginale. Ce résultat soutient la validité de la méthode d'évaluation : la résilience pendant la catastrophe est directement affectée par l'inondation des routes, tandis que la résilience post-catastrophe dépend d'autres facteurs.

Les tests du chi carré stratifiés divisent les quartiers en groupes de faible et de forte connectivité selon la médiane de la connectivité externe. Les résultats montrent que, dans le groupe de faible connectivité, la résilience pendant la catastrophe est significativement associée à la distance de marche jusqu'aux routes inondées (chi-square = 15.8262, $P = 0.01472 < 0.05$). Dans le groupe de forte connectivité, cette association n'est pas significative (chi-square = 9.0223, $P = 0.1723 > 0.05$), ce qui indique que l'impact de l'inondation est atténué lorsque la connectivité externe est élevée. Pour la résilience post-catastrophe,

ni le groupe de faible connectivité ($\chi^2 = 10.8070$, $P = 0.0945 > 0.05$) ni le groupe de forte connectivité ($\chi^2 = 7.3557$, $P = 0.2892 > 0.05$) ne présentent d'association significative avec la distance de marche jusqu'aux routes inondées. Ces résultats révèlent que la connectivité routière externe est un modérateur important de l'effet des routes inondées sur la résilience pendant la catastrophe. Les quartiers à faible connectivité sont plus susceptibles de connaître de fortes contraintes de déplacement lorsque les routes voisines sont inondées, tandis que les quartiers à forte connectivité peuvent réduire les impacts par des itinéraires alternatifs et des voies de drainage. L'ensemble des résultats montre que la méthode proposée saisit efficacement l'impact différencié des routes inondées sur la résilience des quartiers environnants pendant la catastrophe.

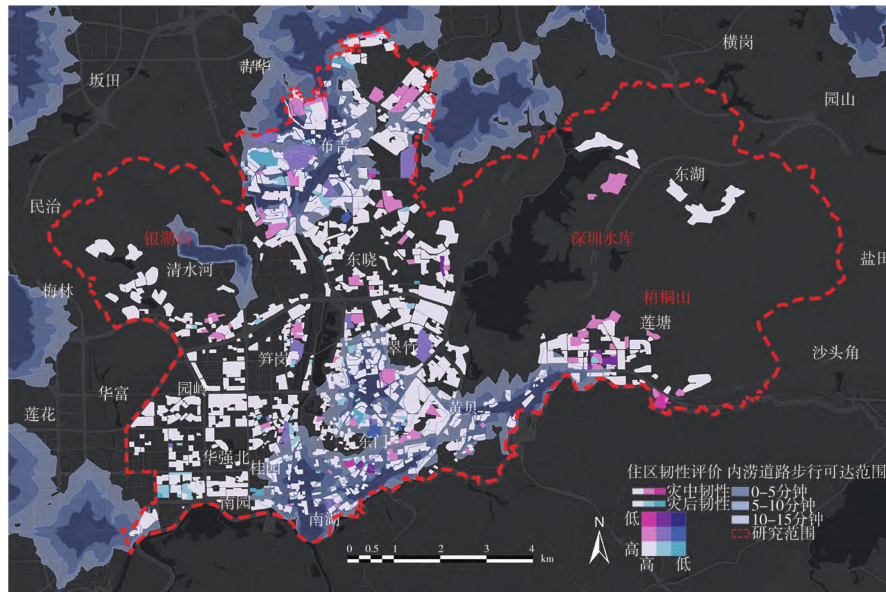


Figure 5. Validation au moyen de zones tampons stratifiées autour des routes inondées

La figure valide l'association entre la résilience des quartiers, la distance de marche jusqu'aux routes inondées et la connectivité routière externe pendant et après la catastrophe.

Les résultats de corrélation de rang de Spearman entre les indicateurs moyens de résilience au niveau des sous-districts et les variables de structure démographique sont présentés dans le tableau 2. L'indicateur de perturbation pendant la catastrophe présente des corrélations faibles et non significatives avec la part des personnes âgées, la part des enfants et le nombre moyen d'années d'éducation. Au stade post-catastrophe, l'intensité de perturbation présente des corrélations négatives significatives avec la part des personnes âgées et le nombre moyen d'années d'éducation, ainsi qu'une faible corrélation négative avec la part des enfants. Cela indique que, pendant la catastrophe, la perturbation des déplacements est moins sensible aux biais de structure démographique et est principalement entraînée par les blocages physiques soudains ; l'invisibilité des groupes vulnérables dans les données de déplacement n'est pas encore fortement amplifiée. Au stade post-catastrophe, les corrélations se renforcent, ce qui suggère que la méthode capte une sensibilité socio-économique plus forte dans le processus de récupération différée et peut en partie identifier les effets différenciés de la structure démographique sur la perturbation retardée. Par exemple, les rues où le niveau d'éducation est plus élevé, ce qui indique une moindre proportion de populations à faible revenu, présentent une résilience post-catastrophe plus élevée.

Cependant, la corrélation négative significative avec la part des personnes âgées révèle un certain biais de représentation des données de signalisation mobile à l'échelle du quartier. Les personnes âgées étant sous-représentées dans l'échantillon, la réduction de leurs déplacements dans certains quartiers, tels que Yuanling et Cuizhu, contribue faiblement à la perturbation totale de l'échantillon. Cela peut produire une illusion statistique selon laquelle les quartiers comptant davantage de personnes âgées apparaissent plus résilients. Autrement dit, le recours exclusif aux données de signalisation mobile peut sous-estimer les risques réels auxquels sont exposés les groupes vulnérables. Les recherches futures devraient intégrer des données de recensement ou d'enquête au niveau communautaire pour calibrer l'évaluation et la rendre plus inclusive.

Tableau 2. Analyse de corrélation entre la résilience moyenne au niveau des sous-districts et les variables de structure démographique selon les étapes

Variable de structure démographique	Intensité de perturbation des déplacements par habitant pendant la catastrophe	Intensité de perturbation des déplacements par habitant après la catastrophe
Part de la population âgée de 65 ans et plus	-0.152	-0.530*
Part des enfants âgés de 0 à 14 ans	-0.007	-0.380
Nombre moyen d'années d'éducation de la population âgée de 15 ans et plus	-0.099	-0.582*

Note : * indique une significativité au niveau 0.05 (test bilatéral).

4. Discussion et conclusions

4.1 Principales conclusions et valeur pratique

Cette étude construit un cadre d'évaluation de la résilience des quartiers aux pluies d'orage et aux inondations fondé sur les perturbations spatio-temporelles des déplacements des habitants pendant les pluies extrêmes, et le teste empiriquement à partir de l'épisode « 9.7 » de Shenzhen. En analysant les données de signalisation mobile d'environ un million d'appareils anonymisés, l'étude construit des courbes de fluctuation des déplacements avant et après la catastrophe, quantifie les niveaux de résilience pendant et après celle-ci, et produit des cartes de résilience des quartiers. La validité de la méthode est vérifiée au moyen de données réelles sur les routes inondées et de la structure démographique.

Les résultats montrent que les quartiers de logements commerciaux sont plus résilients que les villages urbains, et que les quartiers de logements commerciaux construits à différentes périodes présentent également une forte hétérogénéité de résilience. L'analyse fondée sur les routes inondées confirme que l'inondation des routes est un facteur important de perturbation des déplacements des habitants pendant les catastrophes, et valide l'efficacité du cadre dans l'identification des différences spatiales de résilience entre quartiers. Parallèlement, la validation démographique à partir de la structure de population au niveau des rues révèle que les données de signalisation mobile peuvent comporter des

biais intrinsèques lorsqu'elles sont utilisées dans l'évaluation micro-échelle de la résilience, avec un risque de sous-estimation des dangers réels des quartiers vieillissants.

La plupart des évaluations existantes de la résilience aux catastrophes se concentrent sur des évaluations statiques à l'échelle macroscopique. Cette étude permet un jugement plus fin à l'échelle du quartier et met en évidence les avantages d'une analyse dynamique et continue des séries temporelles fondée sur les caractéristiques de déplacement des habitants. Par rapport aux travaux existants qui utilisent les mégadonnées et les courbes de résilience, l'optimisation adaptative proposée offre une perspective plus éclairante pour comprendre l'hétérogénéité spatio-temporelle de la résilience urbaine aux pluies d'orage et aux inondations, et pour soutenir la gouvernance d'urgence. Contrairement à la simulation de scénarios dépendante de l'altitude, cette étude vérifie non seulement l'association significative entre la résilience pendant la catastrophe et la proximité des routes inondées, mais constate aussi que les quartiers de faible résilience ne se limitent pas à une distance fixe de ces routes (figure 5). Dans le même temps, bien que les quartiers de faible altitude soient traditionnellement considérés comme à haut risque, l'étude montre que cette hypothèse ne correspond pas toujours aux perturbations réelles des déplacements des habitants. Certains quartiers proches de versants, par exemple, présentent une altitude relativement élevée mais une faible résilience en raison d'un choix limité d'itinéraires. L'évaluation dynamique fondée sur la mobilité permet ainsi de saisir des effets plus complexes que les évaluations traditionnelles peuvent négliger.

Cette étude répond également à l'enjeu d'équité sociale dans la recherche sur la résilience urbaine. Des travaux existants [15] indiquent que les quartiers socio-économiquement défavorisés présentent souvent une résilience plus faible. En comparant les quartiers selon les périodes de construction et les types de propriété, cette étude confirme davantage la relation entre facteurs socio-économiques et résilience. Elle reflète les différences réelles de résilience des quartiers produites par les déficits d'infrastructure et l'allocation inégale des ressources dans les processus de résistance et de récupération. Les cartes de résilience au niveau des quartiers offrent également une représentation plus fine de la résilience urbaine à l'échelle micro.

4.2 Suggestions pour intégrer l'évaluation de la résilience à l'examen urbain à l'échelle des quartiers

Selon des documents de politique publique tels que les Directives techniques pour l'examen et l'évaluation urbains dans la planification territoriale et spatiale, l'examen urbain est devenu un outil institutionnel important pour promouvoir un développement urbain de haute qualité et combler les déficits de l'environnement résidentiel. La résilience constitue une dimension importante de l'examen urbain actuel. Face au manque de méthodes systématiques d'évaluation dynamique et fine de la résilience à l'échelle des quartiers, cette étude propose une procédure d'examen et d'évaluation de la résilience des quartiers aux pluies d'orage et aux inondations, fondée sur les données de signalisation mobile. Elle peut être expérimentée et promue dans le cadre de l'examen urbain.

Pour le renouvellement urbain et la gestion d'urgence des catastrophes dans les quartiers, la procédure comprend la collecte des données, la construction de la ligne de base, la division des étapes de catastrophe, la quantification de la perturbation et la validation externe. Les résultats du diagnostic peuvent être réinjectés dans les plateformes d'information de l'examen urbain, puis intégrés dans la préparation des plans de renouvellement urbain. Par exemple, les quartiers de faible résilience peuvent être incorporés dans les bases de projets de renouvellement et associés à des actions de micro-renouvellement progressif, au comblement des déficits d'infrastructures bleues et vertes, ainsi qu'à la

construction de mécanismes communautaires de coordination d'urgence. Un parcours de gouvernance en boucle fermée peut ainsi être formé : « examen et évaluation - identification diagnostique - rectification priorisée et ciblée - suivi dynamique », soutenant la surveillance régulière, l'alerte précoce et les décisions de planification durable fondées sur les données.

4.3 Limites de la recherche et perspectives futures

La baisse du volume de déplacements des habitants ne reflète pas uniquement une détérioration des fonctions du système de quartier. L'indicateur d'intensité de perturbation des déplacements utilisé dans cette étude ne distingue pas les déplacements obligatoires empêchés des déplacements flexibles volontairement évités, ce qui peut conduire à sous-estimer la résilience des quartiers dotés d'une forte capacité de gouvernance. Les recherches futures pourront développer des plateformes de fusion de données multi-sources intégrant points d'intérêt, usage du sol, télédétection satellitaire, signalisation mobile et médias sociaux. La prédiction de séries temporelles par LSTM ou les réseaux neuronaux de graphes pourront être utilisés pour regrouper les trajectoires de déplacement et quantifier séparément les fluctuations de mobilité obligatoire et flexible, afin de fournir un appui décisionnel plus ciblé à la gouvernance de la résilience.

L'indicateur central V1 est utile pour révéler la capacité cumulative des quartiers à supporter les perturbations dues aux pluies extrêmes, mais un indicateur unique ne peut pleinement équilibrer risque aigu et pertes cumulatives de long terme. Les recherches futures pourront construire des indicateurs composites intégrant le taux de perte maximal afin de saisir l'intensité destructive maximale et le risque aigu, et combiner pente de récupération et classification de forme de courbe pour améliorer la précision de l'évaluation tout en distinguant les mécanismes de résistance au risque aigu et les capacités de récupération de long terme entre quartiers.

Notes

[1] La plupart des points d'inondation ont été évacués en moins de 48 heures, et l'intensité de la réponse d'urgence a fortement diminué. L'approvisionnement en eau, l'électricité, les communications et les autres infrastructures critiques sont entièrement revenus à la normale en moins de 72 heures. Source : Bureau météorologique de Shenzhen (Observatoire), « Agir avec le vent, lutter contre le vent et la pluie, consolider la première ligne de défense urbaine contre les catastrophes : chronique de la réponse du Bureau météorologique de Shenzhen au typhon Saola et à l'épisode pluvieux extrême "9.7" ».

Références

- [1] CHEN Yi, CHEN Ruishan, GE Yi. Recherches et réflexions sur la vulnérabilité sociale et la résilience des communautés urbaines chinoises face aux inondations[J]. Urbanism and Architecture, 2018(35): 32-34.
- [2] CHEN Xunlai, XU Ting, WANG Rui, et al. Caractéristiques d'observation fine et causes de l'épisode pluvieux extrême « 9.7 » dans le delta de la rivière des Perles[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2024, 35(1): 1-16.
- [3] WEI Zongcai, LIN Yudong, WEN Xiaolan, et al. Progrès des recherches sur la résilience urbaine sous climat extrême en Chine et à l'étranger : cadres conceptuels, mesure et stratégies d'optimisation[J]. Planners, 2025, 41(7): 10-17.
- [4] CUTTER S L, FINCH C. Temporal and spatial changes in social vulnerability to natural hazards[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2008, 105(7): 2301-2306.

- [5] BALICA S F, WRIGHT N G, VAN DER MEULEN F. A flood vulnerability index for coastal cities and its use in assessing climate change impacts[J]. *Natural Hazards*, 2012, 64: 73-105.
- [6] ZHANG Xiaorui, ZHANG Linya, FANG Chuanglin. Concept, cadre et mesure : revue et prolongements des recherches sur la vulnérabilité urbaine[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2015, 31(4): 94-99.
- [7] CUTTER S L, BORUFF B J, SHIRLEY W L. Social vulnerability to environmental hazards[J]. *Social Science Quarterly*, 2003, 84(2): 242-261.
- [8] CUTTER S L, BURTON C G, EMRICH C T. Disaster resilience indicators for benchmarking baseline conditions[J]. *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, 2010, 7(1): 51.
- [9] CUTTER S L, ASH K D, EMRICH C T. The geographies of community disaster resilience[J]. *Global Environmental Change*, 2014, 29: 65-77.
- [10] TIMMERMAN P. Vulnerability, resilience and the collapse of society: a review of model's possible climatic applications[R]. Toronto: Institute for Environmental Studies, University of Toronto, 1981.
- [11] ZHAI Guofang. Réponses résilientes aux catastrophes urbaines de pluie et d'inondation sous l'angle de la planification dans le contexte du changement climatique : concepts clés, idées fondamentales et cadre général[J]. *Urban Planning Forum*, 2024(1): 29-37.
- [12] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4: 1-23.
- [13] ADGER W N. Social and ecological resilience: are they related?[J]. *Progress in Human Geography*, 2000, 24(3): 347-364.
- [14] FOLKE C, CARPENTER S, WALKER B, et al. Regime shifts, resilience, and biodiversity in ecosystem management[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2004, 35(1): 557-581.
- [15] SHARIFI A, YAMAGATA Y. Urban resilience assessment: multiple dimensions, criteria, and indicators[M]//YAMAGATA Y, SHARIFI A. *Urban resilience: a transformative approach*. Cham: Springer, 2016.
- [16] MEEROW S, NEWELL J P, STULTS M. Defining urban resilience: a review[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2016, 147: 38-49.
- [17] SPAANS M, WATERHOUT B. Building up resilience in cities worldwide: Rotterdam as participant in the 100 Resilient Cities Programme[J]. *Cities*, 2017, 61: 109-116.
- [18] GUO Renzhong, YANG Xiaochun, HONG Wuyang, et al. Logique fondamentale et cadre de la planification et du design des villes sûres et résilientes[J]. *Strategic Study of CAE*, 2025, 27(4): 28-42.
- [19] CHEN Bilin, LI Yinglong. Évaluation de la planification de la transformation adaptative des villes côtières denses orientée vers la résilience aux inondations : le cas du secteur de la mangrove de la baie de Shenzhen[J]. *Urban Planning Forum*, 2023(4): 77-86.
- [20] LIU C, XU F, GAO C, et al. Deep learning resilience inference for complex networked systems[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 9203.
- [21] FAN Yating, LI Yuefan, TU Wei, et al. Évaluation de la vulnérabilité des objets urbains exposés aux catastrophes à partir de données de médias sociaux : le cas des événements météorologiques extrêmes à Shenzhen[J]. *City Planning Review*, 2024, 48(08): 101-113.
- [22] HSU C W, MOSTAFAVI A. Dissecting resilience curve archetypes and properties in human systems facing weather hazards[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15(1): 11897.

- [23] ZHANG F, LI Z, LI N, et al. Assessment of urban human mobility perturbation under extreme weather events: a case study in Nanjing, China[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 50: 101671.
- [24] TANG J, ZHAO P, GONG Z, et al. Resilience patterns of human mobility in response to extreme urban floods[J]. *National Science Review*, 2023, 10(8): nwad097.
- [25] BRUNEAU M, CHANG S E, EGUCHI R T, et al. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities[J]. *Earthquake Spectra*, 2003, 19(4): 733-752.
- [26] HONG B, BONCZAK B J, GUPTA A, et al. Measuring inequality in community resilience to natural disasters using large-scale mobility data[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 1870.
- [27] OUYANG M, DUEÑAS-OSORIO L, MIN X. A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems[J]. *Structural Safety*, 2012, 36: 23-31.
- [28] REED D A, KAPUR K C, CHRISTIE R D. Methodology for assessing the resilience of networked infrastructure[J]. *IEEE Systems Journal*, 2009, 3(2): 174-180.
- [29] QIAN J, DU Y, LIANG F, et al. Measuring community resilience inequality to inland flooding using location aware big data[J]. *Cities*, 2024, 149: 104915.
- [30] YAN Wentao, REN Jie, ZHANG Shangwu, et al. Planification de Shanghai comme ville résiliente : enjeux clés, cadre général et stratégies de planification[J]. *Urban Planning Forum*, 2022(3): 19-28.
- [31] YANG Junyan, CAO Jun. Dynamique, statique, explicite et implicite : quatre modes d'application des mégadonnées dans le design urbain[J]. *Urban Planning Forum*, 2017(4): 39-46.
- [32] 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.
- [33] PAN Haixiao, DAI Shenzhi, ZHAO Yanjing, et al. Discussion académique sur « la résilience urbaine et la planification spatiale face au changement climatique »[J]. *Urban Planning Forum*, 2021(5): 1-10.
- [34] NAN C, SANSAVINI G. A quantitative method for assessing resilience of interdependent infrastructures[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2017, 157: 35-53.
- [35] POULIN C, KANE M B. Infrastructure resilience curves: performance measures and summary metrics[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2021, 216: 107926.

Traduction assistée par IA