

Échec des défaillances des systèmes d'infrastructures urbaines vers la résilience : examen et perspectives

ZHANG Changchun, HE Lei, FAN Tingjun

Résumé: La fréquence croissante des catastrophes extrêmes provoquées par le changement climatique mondial a mis en évidence les risques d'échec en cascade causés par les interdépendances complexes entre les systèmes d'infrastructure urbaine, ce qui en fait un défi crucial pour la planification urbaine résiliente aux catastrophes. Les études existantes demeurent limitées par trois limitations. L'identification des interdépendances de l'infrastructure est limitée par la disponibilité des données et les outils méthodologiques, produisant un ensemble restreint de catégories reconnues. L'identification raffinée des installations critiques laisse souvent de côté les systèmes sociaux et le comportement des résidents, ce qui entraîne des cadres de simulation incomplets. Les stratégies d'amélioration de la résilience continuent de se concentrer principalement sur les interventions à système unique et les contre-mesures d'urgence, tandis que la planification multisystème concertée reste sous-développée. Dans un contexte de progrès rapide de l'intelligence artificielle, cet article propose des orientations de recherche et des voies techniques : utilisation de données hétérogènes multisources et de grands modèles linguistiques pour améliorer la granularité et la précision de l'identification de l'interdépendance; mise au point de modèles de simulation cyberphysique couplés installation-société-population pour caractériser la vulnérabilité spatiale urbaine; formulation de stratégies de récupération collaborative intelligentes et multisystèmes pour accélérer le rétablissement de la capacité de service urbain. L'étude fournit des orientations théoriques et des approches techniques réalisables pour les questions clés de la planification résiliente en cas de catastrophe.

Mots-clés: infrastructures urbaines; défaillances en cascade; planification résiliente aux catastrophes; intelligence artificielle; revue de la littérature

Le changement climatique mondial a accru la fréquence et l'intensité des catastrophes météorologiques extrêmes, exposant ainsi les mégapoles chinoises à de graves inondations et à des inondations. De fortes tempêtes de pluie récentes à Zhengzhou, Pékin et Shenzhen ont causé des pertes importantes et des impacts sociaux et ont révélé la vulnérabilité des systèmes urbains. La tempête de pluie extraordinaire du 20 juillet à Zhengzhou est un cas typique : les défaillances en cascade provoquées par l'échec d'une seule infrastructure ont causé une paralysie fonctionnelle à grande échelle et la reprise des services publics a fortement ralenti [1]. En réponse, la Chine a accordé une importance croissante à la résilience aux catastrophes et au renouvellement des infrastructures. Au cours des cinq dernières années, une série de documents de politique nationale ont été publiés, notamment les avis sur la promotion de la construction de nouvelles infrastructures urbaines et la construction de villes résilientes publiés en décembre 2024. Ces documents exigent des autorités locales qu'elles renforcent la résilience aux catastrophes extrêmes et améliorent la capacité globale de prévention des catastrophes urbaines. Dans la pratique, l'aménagement durable de la ville de Beijing, la planification globale de la prévention et de la réduction des catastrophes à Shanghai et les procédures techniques nationales pour la planification globale de la prévention des catastrophes dans l'espace territorial ont tous des cadres, des processus et des éléments de base définis. Pourtant, la compréhension scientifique des interactions multi-systèmes et des techniques de régulation précises demeure insuffisante. À sa racine, l'environnement bâti contient des relations de couplage complexes entre plusieurs éléments. Ces relations créent les conditions et les voies de propagation des défaillances, permettant aux catastrophes secondaires déclenchées par les risques primaires de se propager et de se développer dans l'environnement bâti [2-3]. L'aménagement urbain et rural est un moyen essentiel de coordonner la configuration spatiale et les

séquences de construction dans l'environnement bâti, mais l'absence de recherche systématique et de réglementation précise pour les interactions multirisques et multisystèmes limite l'effet de la planification de la prévention des catastrophes [4-8]. Le présent document passe donc en revue les limites actuelles de la planification de la prévention des catastrophes, résume les études en cascade et en échec des infrastructures interconnectées à partir de l'identification de l'interdépendance, de la simulation des défaillances et de la stratégie de résilience et de rétablissement, et propose des perspectives et des voies d'innovation fondées sur les nouvelles technologies.

1 Le couplage des risques dans les systèmes d'infrastructure urbaine

La ville est un système dynamique qui dépend fortement des fonctions d'infrastructure pendant l'exploitation. Des systèmes apparemment indépendants forment un réseau de transmission fonctionnelle interdépendant qui soutient la vie quotidienne et les fonctions urbaines [9]. Comme le montre la figure 1, l'énergie, les communications, les transports, l'approvisionnement en eau et d'autres systèmes de survie ont des relations étroites entre l'approvisionnement interne et le soutien. Elles offrent également des garanties essentielles pour les services publics tels que les hôpitaux et les réserves matérielles. Ces installations, grâce aux réseaux d'infrastructure et aux systèmes de transport routier, répondent aux besoins quotidiens des résidents et stabilisent l'exploitation urbaine.

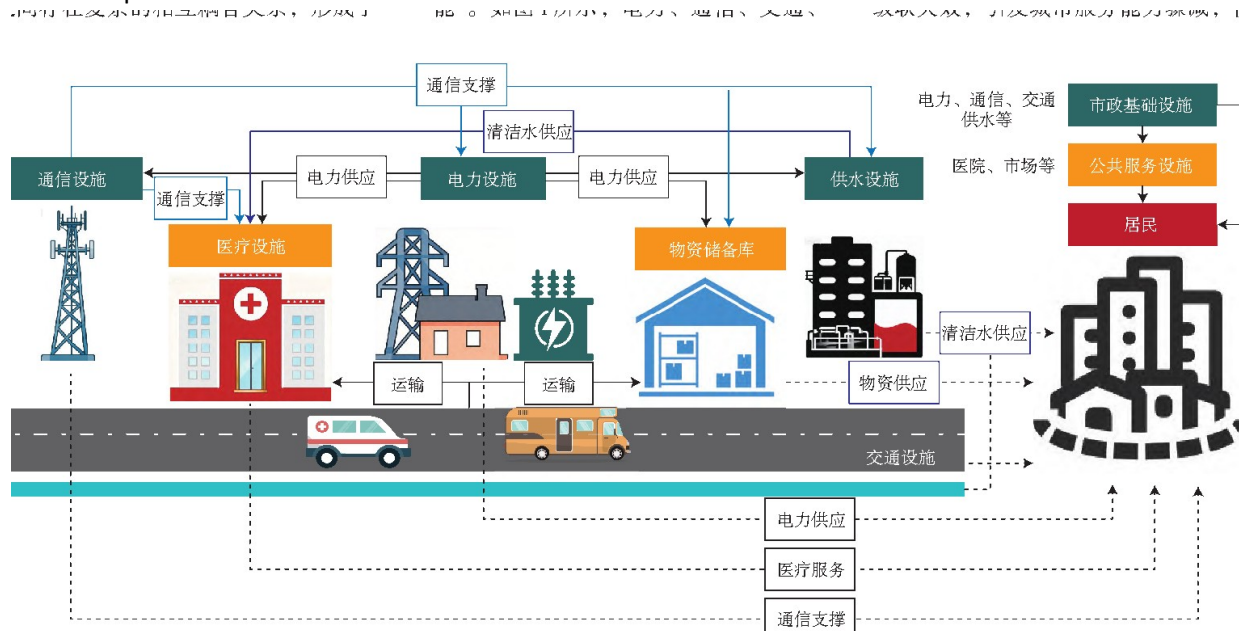


Figure 1 Interdépendances entre les sous-systèmes d'infrastructures urbaines.

Cette association est le fruit de la planification et de la conception. La forme et l'organisation de l'environnement bâti sont façonnées par les décisions de planification, et les relations d'interdépendance, la configuration spatiale et les liens fonctionnels entre les systèmes d'infrastructure sont conçus pour améliorer l'efficacité opérationnelle globale. À mesure que les connexions et la densité de couplage augmentent, l'efficacité du service s'améliore, mais la vulnérabilité systémique augmente également [10-11]. Lorsqu'un noeud critique ou un sous-système est perturbé, l'effet peut se propager rapidement par des chaînes de dépendance et causer une paralysie multi-système. Le blackout nord-américain de 2003 a provoqué des défaillances dans l'approvisionnement en eau, les transports et les communications; dans la tempête de pluie du 20 juillet 2021 à Zhengzhou, des dommages aux installations électriques ont causé des difficultés dans l'approvisionnement en eau et les communications [1].

Les interconnexions entre les systèmes d'infrastructure signifient que les dommages causés à une seule installation peuvent déclencher des défaillances en cascade, affaiblir la capacité des services urbains et causer des dommages à la chaîne de vie quotidienne des résidents et à l'économie urbaine. Dans le cadre des efforts intensifs déployés par la Chine pour construire des villes résilientes aux catastrophes, réduire les impacts en cascade, intervenir efficacement dans des installations, des parcelles et des systèmes limités et améliorer la capacité de services urbains sont des tâches essentielles pour la construction de villes résilientes.

2 Progrès de la recherche sur la planification de la prévention des catastrophes dans les infrastructures urbaines

La planification traditionnelle de la prévention des catastrophes autour des infrastructures urbaines s'est développée principalement dans deux directions. La première est l'optimisation des installations à système unique. Les études existantes mettent l'accent sur la conception optimisée d'installations uniques telles que les infrastructures routières, les réservoirs de retenue d'eau de pluie, les pipelines d'approvisionnement en eau, les infrastructures vertes et les stations de pompage, utilisant souvent des modèles physiques ou numériques pour minimiser les pertes après une catastrophe et améliorer l'efficacité des plans d'urgence [12-15]. Cette ligne de travail est utile pour l'optimisation de l'ingénierie locale, mais est généralement limitée à une seule installation et ne tient pas compte pleinement de la rétroaction entre plusieurs systèmes ou du couplage spatial.

La deuxième orientation est la protection et la planification du système. Du point de vue du système, les études identifient la résilience de l'infrastructure et proposent des stratégies dans des domaines tels que la gestion intégrée, le contrôle complet raffiné et l'entretien régulier [16-17]. Les travaux récents sur la résilience urbaine reconnaissent de plus en plus que les interdépendances entre les infrastructures déterminent la vulnérabilité urbaine et la vitesse de relèvement après une catastrophe. Les chercheurs ont proposé des directives sur la planification à partir du couplage des infrastructures municipales et des systèmes de prévention des catastrophes [18], ont appelé à l'intégration de l'exposition, de la vulnérabilité et de l'analyse des risques dans le système d'évaluation de la planification de la prévention des catastrophes [20], et ont fait valoir que la planification résiliente doit coordonner la robustesse d'un système unique avec la prévention des cas de catastrophe multisystème [19-21].

Dans l'ensemble, la planification de la prévention des catastrophes axée sur la résilience doit passer de l'expérience du génie au niveau des installations à la coordination entre les systèmes. Sa tâche consiste à identifier les liens vulnérables dans des réseaux complexes, à comprendre les mécanismes d'échec en cascade et les effets d'amplification, et à les traduire en contrôles de planification opérationnels. Le processus peut être organisé autour de trois liens principaux : identification de l'interdépendance, simulation de défaillance et programme de rétablissement (fig. 3).

3 Progrès de la recherche sur les technologies clés pour les défaillances en cascade dans les infrastructures urbaines interconnectées

近年来，随着对城市韧性问题的关注，学者们逐渐认识到，基础设施间的关联性是决定城市脆弱性与灾后恢复速

城市关联基础设施各子系统通过物质、能量与信息交互形成有机整体，极

支持。

为此，后续研究转向基于数据的依赖性关系识别。目前依赖性识别方法主要

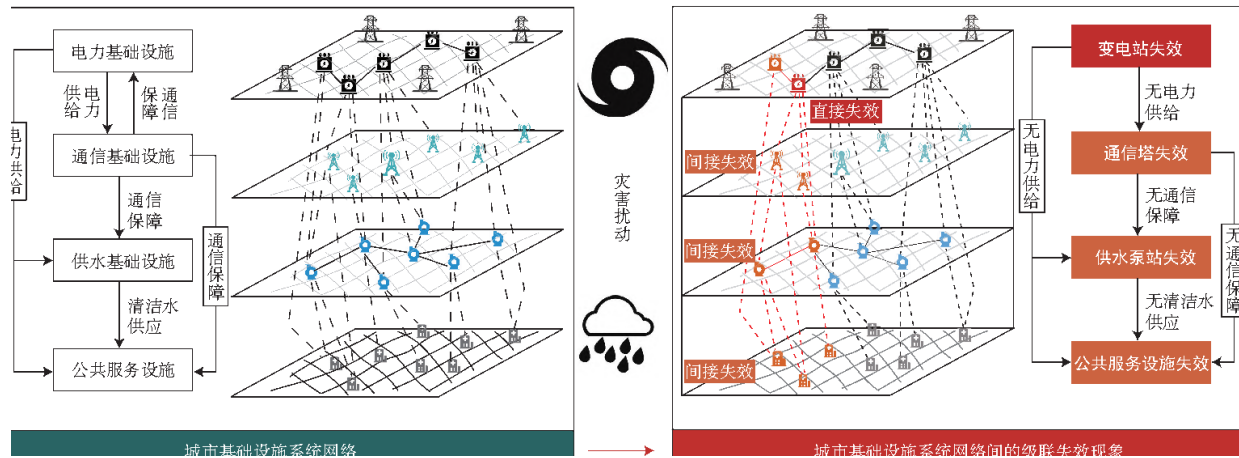


Figure 2 Défaillances des infrastructures urbaines.

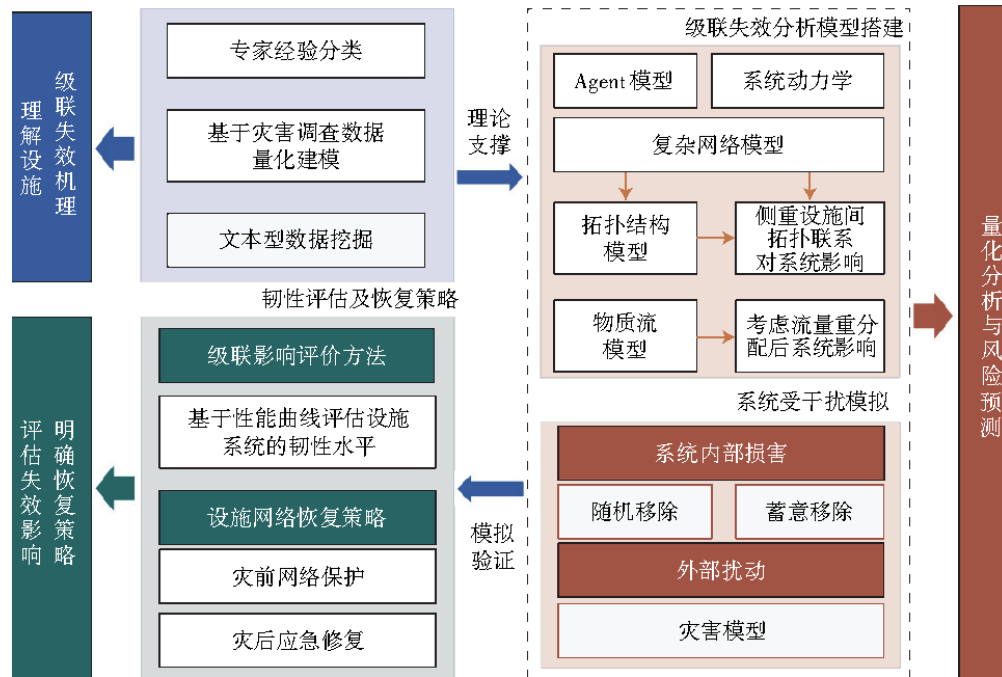


图3 城市基础设施级联失效关键技术研究概况

Fig. 3 Revue de la littérature sur les technologies clés pour atténuer les défaillances en cascade dans les infrastructures urbaines.

Les sous-systèmes d'infrastructures urbaines forment des entités organiques par l'échange de matières, d'énergie et d'informations. En cas de perturbations extrêmes, les défaillances locales peuvent se propager le long des chaînes de dépendance et se transformer en défaillances en cascade, menaçant l'exploitation urbaine et la sécurité des résidents. L'analyse de ce problème devrait suivre une logique systémique d'analyse des mécanismes, de déduction des risques, d'intervention active et d'évaluation de la résilience. L'examen suivant

porte sur l'identification de l'interdépendance, la simulation du modèle de défaillance et les contre-mesures de résilience.

3.1 Identification des interdépendances entre les infrastructures interconnectées

Rinaldi et al. ont classé les interdépendances entre les infrastructures en catégories physiques, cybernétiques, géographiques et logiques, en mettant l'accent sur l'électricité, l'approvisionnement en eau, les communications, l'énergie et les systèmes de transport [9]. Des études ultérieures ont élargi cette classification dans différentes perspectives en ajoutant la dépendance politique, la dépendance sociale et la dépendance économique [22]. Les premiers travaux reposaient souvent sur un jugement d'expert et se concentraient sur quelques secteurs comme l'électricité et l'approvisionnement en eau, avec un appui limité des données empiriques.

Les études subséquentes sont passées à l'identification de la dépendance fondée sur les données. Les méthodes basées sur les dossiers d'enquête sur les catastrophes quantifient les interdépendances à partir des données post-événement. Mendonca et Wallace ont identifié des corrélations dans la restauration des infrastructures après une catastrophe après l'attaque du World Trade Center en 2001 [24]. Monsalve et de la Llera ont estimé les coefficients d'interdépendance et les forces de l'ajustement de taux de restauration [25]. Zorn et Shamseldin ont dérivé la direction et l'intensité de la dépendance en utilisant les relations d'assistance-récupération [26]. L'extraction de rapports et d'informations a également servi à extraire les événements liés à la dépendance des documents publics et des médias, en construisant des preuves textuelles plus diverses pour la reconnaissance de l'interdépendance [27-29].

La recherche axée sur les données reste exploratoire. De nombreuses études reposent sur l'extraction de texte à mode unique, ne permettent pas la validation croisée des données multisources et identifient généralement les types d'interdépendance tels que l'adjacence géographique ou l'appui administratif à la décision. Ils restent insuffisants pour révéler les mécanismes complexes de dépendance entre les infrastructures associées.

3.2 Simulation de défaillances en cascade dans les infrastructures interconnectées

Les défaillances en cascade entre les infrastructures résultent d'une interdépendance complexe et d'une dépendance fonctionnelle. La simulation réaliste est donc essentielle pour comprendre les mécanismes de défaillance et identifier les principales installations. La recherche existante porte principalement sur les méthodes de modélisation, les formes de perturbation et la déduction dynamique en cas de défaillance.

3.2.1 Méthodes de modélisation des réseaux d'infrastructures interconnectés

En raison des différences entre les perspectives de recherche et la disponibilité des données, trois types de méthodes de modélisation sont largement utilisés. La modélisation basée sur les agents traite les composantes de l'infrastructure comme des entités ayant des attributs de décision et de comportement et simule les interactions entre les systèmes [31-32]. Les méthodes de dynamique du système examinent la rétroaction entre la perturbation et la réponse du réseau, en analysant les effets à long terme des défaillances [33-34]. Les méthodes d'analyse en réseau résument les composants comme nœuds, les connexions physiques ou de dépendance comme bords, et les relations directionnelles comme poids, identifiant ainsi la fiabilité et la transmission de flux de service entre les systèmes [35-36].

3.2.2 Formes de perturbation des défaillances dans les réseaux d'infrastructures

Les réseaux d'infrastructures sont exposés aux perturbations internes et externes. Les perturbations internes comprennent l'enlèvement aléatoire et les attaques malveillantes contre des nœuds ou des composants, qui sont utilisés pour simuler les interruptions causées par le vieillissement de l'équipement, la défaillance opérationnelle ou les dommages ciblés [45]. Les perturbations extérieures comprennent les risques naturels, les

accidents et les attaques malveillantes. Ils présentent une hétérogénéité spatiotemporelle significative et des corrélations géographiques, et les études combinent souvent des modèles de processus de risque et des modèles de réseau d'infrastructure pour simuler la défaillance des composants en cas de catastrophe [48]. Toutefois, les modèles de perturbation existants ont encore une capacité limitée de saisir l'évolution spatiale dynamique et les processus d'intervention intersystèmes dans le cadre de catastrophes complexes.

3.3 Stratégies de résilience de l'infrastructure en cas d'impact en cascade

Sur la base de mécanismes d'échec en cascade, des études ont évalué la résilience de l'infrastructure et les stratégies de restauration afin d'assurer la stabilité du service en cas de conditions météorologiques extrêmes. L'évaluation de la résilience utilise généralement des courbes de performance pour quantifier l'état du système avant, pendant et après la défaillance [51]. Les études de restauration portent sur la protection des réseaux avant les catastrophes et l'allocation des ressources après les catastrophes, y compris l'identification des éléments clés, l'optimisation des modes d'exploitation des réseaux, l'allocation des ressources et les mesures de protection [52-54]. Les études de rétablissement d'urgence examinent le séquençage des tâches et l'affectation des ressources en fonction des ressources limitées de réparation et des contraintes de comportement [55-56]. La recherche sur les stratégies existantes a progressé dans l'identification des éléments clés, l'amélioration de la protection des réseaux et l'optimisation de l'allocation des ressources de réparation, mais elle se concentre toujours principalement sur les réseaux d'infrastructure eux-mêmes. Les effets de l'accessibilité au service des résidents, du comportement d'exploitation sociale et de la coordination spatiale sur la résilience ne sont souvent pas pleinement pris en compte.

3.4 Examen des progrès de la recherche

3.4.1 Objets de recherche : intégration multisystème insuffisante

Les études actuelles portent principalement sur des systèmes d'infrastructure uniques ou sur des défaillances internes en cascade parmi un petit nombre de systèmes. Ils n'ont pas encore formé un cadre qui part de la ville dans son ensemble, intègre plusieurs types d'infrastructures et évalue leurs effets sur la capacité de service des résidents. Le contenu de la recherche reste dominé par les installations de transport et de drainage, tandis que les effets de défaillance fonctionnelle des infrastructures sociales telles que les hôpitaux, les réserves matérielles et les services d'urgence reçoivent une attention insuffisante. Étant donné que l'échec de ces installations peut avoir une incidence directe et indirecte sur le rétablissement après une catastrophe, le système de recherche sur les objets doit être élargi.

3.4.2 Exploration du mécanisme : la précision d'identification reste limitée

Les études des mécanismes d'échec sont souvent fondées sur un jugement qualitatif ou une analyse structurée des données. L'identification de la dépendance fondée sur les données et la découverte des lois de transmission demeurent faibles. De nombreuses études s'appuient sur des documents faisant autorité ou sur l'extraction unique d'informations, n'ont pas de validation croisée ni d'analyse intégrée de données hétérogènes multisources et ne permettent pas de caractériser suffisamment les dépendances complexes entre les infrastructures interdépendantes.

3.4.3 Simulation du modèle : représentation insuffisante des mécanismes physiques et des effets sociaux

Les modèles de simulation existants peuvent décrire les processus de défaillance physique des installations dans une certaine mesure, mais ils ont tendance à se concentrer sur les dommages au niveau des installations. Ils manquent souvent d'une analyse exhaustive de l'accessibilité des services aux résidents et de leurs effets sur le fonctionnement social. Étant donné que l'objectif principal de la résilience urbaine est de préserver les besoins

quotidiens des résidents et la continuité des services, les modèles doivent introduire des dimensions telles que l'accessibilité des résidents et l'offre de services pour réaliser une transformation de l'interruption fonctionnelle à l'évaluation de l'impact social.

3.4.4 Niveau stratégique: la réglementation reste concentrée sur la réparation technique

Les stratégies actuelles de récupération se concentrent sur la réparation technique et le renforcement de protection et n'ont pas encore formé un cadre de récupération systématique qui intègre la coordination spatiale et temporelle. Les mesures d'ingénierie peuvent atténuer les défaillances de l'infrastructure locale, mais elles sont insuffisantes pour faire face aux impacts en cascade sur plusieurs systèmes. La planification future devrait mettre en place des mécanismes intégrés d'optimisation de l'aménagement du territoire, de redondance des installations et de coordination de la gouvernance, en appuyant le relèvement coordonné et le rétablissement rapide des capacités de services résidents.

4 Perspectives d'études d'échec en cascade dans le cadre des nouvelles technologies

Étant donné les problèmes que posent l'identification incomplète de l'interdépendance, l'insuffisance de la simulation raffinée des installations critiques et la faiblesse des stratégies de planification collaborative multisystèmes, l'intelligence artificielle offre de nouvelles voies de recherche. Le présent document propose trois orientations : améliorer la précision de l'identification de la dépendance à l'égard des infrastructures grâce à des modèles linguistiques de grande envergure, élaborer des modèles de dépendance multisystèmes cyberphysiques pour la simulation de scénarios et l'évaluation des risques, et réaliser une planification intelligente résiliente aux catastrophes dans le cadre de multiples objectifs.

4.1 Utilisation de grands modèles linguistiques pour améliorer l'identification de l'interdépendance des infrastructures

L'analyse actuelle de l'interdépendance se concentre principalement sur les connexions physiques, et l'exploration des dépendances cachées entre les systèmes tels que les communications, les transports et les infrastructures sociales demeure insuffisante. Des modèles linguistiques de grande envergure peuvent être utilisés pour exploiter des données multisources, y compris des rapports historiques sur les catastrophes, des nouvelles, des connaissances spécialisées, des images de télédétection, la surveillance des capteurs et des informations sur les médias sociaux. Les données textuelles aident à révéler les dépendances de l'infrastructure dans des conditions normales d'exploitation et de catastrophe inhabituelles, à capter le trafic et les états d'exploitation des installations, et la télédétection interprète la distribution spatiale et les connexions physiques. Sur cette base, les grands modèles de langage peuvent effectuer des analyses sémantiques, l'extraction des connaissances et la construction de graphiques de connaissances, créant une carte des connaissances interdépendantes et rendant les structures de dépendance stockables et visualisables. Grâce au stockage structuré et à la représentation visuelle, le modèle peut appuyer l'identification des dépendances latentes et non intuitives et fournir une base de données plus solide pour les décisions de planification (figure 4).

机内部的级联失效现象，同时形成从城市整体视角出发、整合多类型基础设施及其对居民服务能力影响的研究框架。

通过协同优化，以能力承载力与信任协同机制的综合防灾调控体系，实现多系统协同恢复与居民服务能力的快速重建。

对数据进一步清洗、融合与关联抽取，构建基础设施依赖效应知识图谱，实现依赖关系的结构化存储与可视化呈现。

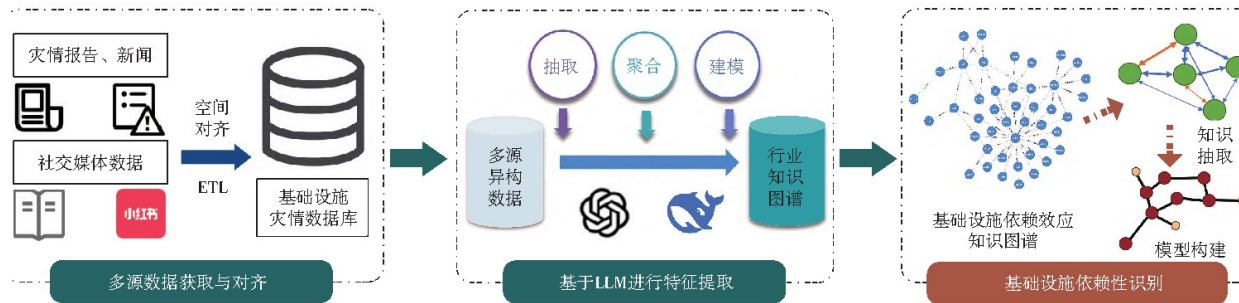


Fig. 4 Amélioration de l'identification de l'interdépendance des infrastructures par le biais de données multisources et de grands modèles linguistiques.

4.2 Construire des modèles de dépendance multisystèmes en milieu urbain cyberphysique pour la simulation de scénarios et l'évaluation des risques

Pour la planification résiliente en cas de catastrophe, la modélisation des défaillances en cascade dans plusieurs systèmes est un défi central. Les modèles purement numériques peuvent déduire efficacement les réponses des systèmes macroscopiques, mais ils ont de la difficulté à reproduire des mécanismes à grain fin et à simplifier les hypothèses du modèle peut biaiser les seuils de défaillance et les voies de transmission. Les modèles physiques peuvent restaurer des processus réels, mais leur couverture de scénarios complexes à grande échelle est limitée. Un modèle de dépendance cyberphysique peut combiner les avantages des deux.

Le modèle comprend des modules de simulation de dépendance multisystème et d'expérience physique. Le module de simulation prend les réseaux d'infrastructure monocouche comme base et complète la construction de couplage selon les règles de dépendance, y compris la topologie simplifiée et la modélisation des réseaux centraux tels que l'électricité, l'approvisionnement en eau et le transport, et la définition des lois de débit, des types de dépendance, des attributs clés et des paramètres de base. Le module d'expérience physique vérifie les résultats de la simulation numérique dans des environnements contrôlés. Les mesures effectuées dans les tunnels éoliens, les réservoirs et d'autres expériences peuvent corriger les relations d'approvisionnement et de demande, les paramètres mécaniques et les paramètres de vulnérabilité sous des charges extrêmes, améliorer la précision des mécanismes de défaillance microscopique et fournir des preuves d'étalonnage de modèles à plusieurs échelles.

4.3 Réalisation d'une planification intelligente résiliente aux catastrophes dans le cadre de multiples objectifs

La planification actuelle repose en grande partie sur la déduction fondée sur l'expérience et l'analyse par modèle. Lors de catastrophes extrêmes, les défaillances de cascades multisystèmes urbaines nécessitent un cadre de planification qui intègre des algorithmes intelligents et une prise de décision multi-objectifs, passant de la réponse passive à la prévention active. Comme le montre la figure 5, le noyau consiste à construire une boucle intégrée d'extraction, de simulation et d'optimisation des décisions. Dans l'extraction des mécanismes, on identifie les dépendances de l'infrastructure, les associations fonctionnelles et les voies de couplage. Dans le cadre de la simulation, des modèles multisystèmes sont utilisés pour la construction théorique, la validation empirique, la simulation de scénarios et l'évaluation des risques. Dans le cadre de l'optimisation des décisions, les algorithmes multiobjectifs génèrent des séquences d'intervention optimales sous des objectifs tels que les perturbations minimales, les investissements les plus faibles et l'équité optimale.

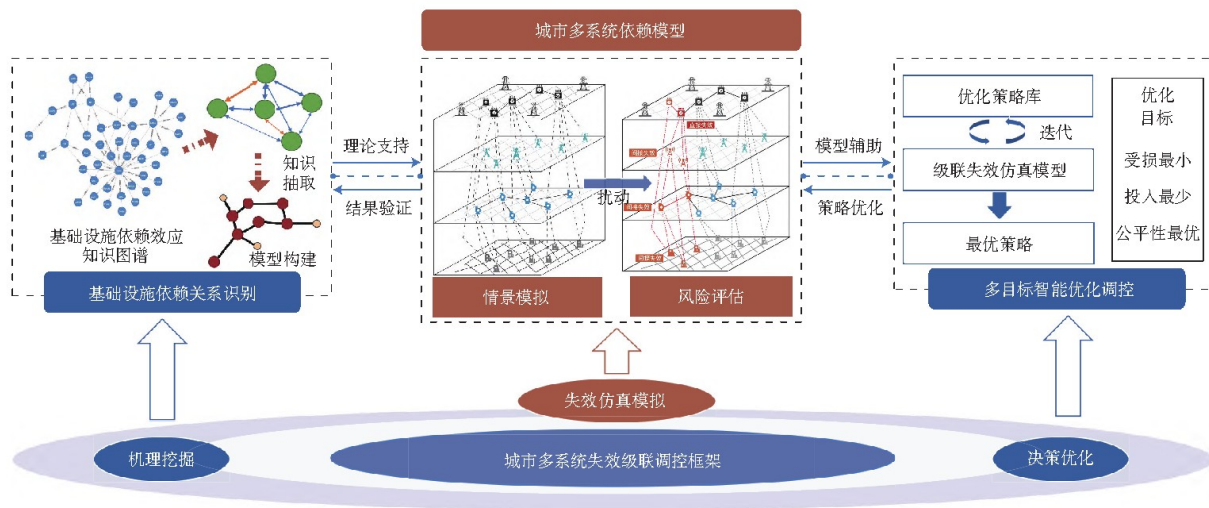


Figure 5 Approches de planification et de réglementation pour les défaillances de cascades multisystèmes urbaines.

Ce cadre contribue à résoudre deux problèmes fondamentaux dans la planification actuelle de la prévention des catastrophes : l'absence de mécanismes d'interaction multisystèmes suffisants et l'absence de contrôles quantitatifs, précis et flexibles. Il peut appuyer l'identification des risques, le rétablissement fonctionnel et l'intervention spatiale et promouvoir la planification résiliente en cas de catastrophe vers le renseignement et l'amélioration raffinée.

5 Conclusion

Ce document examine les progrès de la recherche sur les défaillances en cascade des systèmes d'infrastructure pour la planification urbaine résiliente aux catastrophes. Il résume systématiquement trois liens fondamentaux, à savoir l'identification de l'interdépendance, la simulation de modèle d'échec et la formulation de stratégies de redressement, et analyse les mécanismes de cascade et les voies de prévention des infrastructures en cas de perturbation causée par les catastrophes. L'identification précise des dépendances multidimensionnelles est la base de la compréhension des mécanismes d'échec en cascade; les systèmes de simulation et d'évaluation des scénarios sont la base scientifique de la formulation de stratégies de rétablissement ciblées et de l'amélioration de la résilience globale du système.

L'examen révèle également des limites claires dans les études actuelles. Ils ne comprennent pas suffisamment les mécanismes de défaillance collective multi-systèmes, sous-représentent les fonctions sociales et les impacts de service et accordent une attention limitée à la coordination spatiale dans la réparation technique. Pour surmonter ces problèmes, les futures recherches devraient utiliser des données hétérogènes multisources et de grands modèles linguistiques pour construire des graphiques de connaissances sur la dépendance à l'égard des infrastructures, construire des plates-formes de simulation cyberphysique qui intègrent la simulation numérique et les expériences physiques et élaborer des modèles de décision multiobjectifs pour l'allocation des ressources et l'intervention résiliente. À mesure que les environnements de données s'améliorent et que les méthodes intelligentes s'intègrent davantage, la recherche sur la résilience des infrastructures jouera un rôle de plus en plus important dans la gouvernance de la sécurité urbaine et le développement durable.

Références

- [1] State Council Disaster Investigation Team. Investigation report on the Henan Zhengzhou July 20 extraordinary rainstorm disaster [R]. Beijing: Ministry of Emergency Management of the People's Republic of China, 2022.
- [2] He Lei, Xie Ziang, Li Jie. Disaster-resilient cities: essential connotation, fractal structure and characteristic vectors [J]. *City Planning Review*, 2024, 48(7): 28-35.
- [3] Peng Chong, Zuo Peiwen, Li Yuewen, et al. Multi-risk coupling in urban space and resilient planning response [J]. *Urban Planning Forum*, 2024(5): 88-97.
- [4] Zhai Guofang. Resilient responses to urban rainstorm-flood disasters from a planning perspective under climate change: key concepts, basic ideas and a general framework [J]. *Urban Planning Forum*, 2024(1): 29-37.
- [5] Dai Shenzhi, Liu Tingting, Gao Xiaoyu, et al. Compilation system and implementation mechanism of territorial spatial disaster prevention and reduction planning [J]. *Urban Planning Forum*, 2023(1): 48-53.
- [6] Yan Wentao, Ren Jie, Zhang Shangwu, et al. Shanghai resilient city planning: key issues, overall framework and planning strategies [J]. *Urban Planning Forum*, 2022(3): 19-28.
- [7] Yan Wentao, Li Zihao. Resilience mechanism of urban spatial structure from the perspective of risk disturbance: theoretical framework and empirical methods [J]. *Urban Planning International*, 2023, 38(4): 1-10.
- [8] He Lei, Xie Ziang. Towards resilience: review and prospect of urban comprehensive disaster-prevention planning [J]. *Urban and Rural Planning*, 2021(3): 43-54.
- [9] Rinaldi S M, Peerenboom J P, Kelly T. Identifying, understanding and analyzing critical infrastructure interdependencies [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, 21(6): 11-25.
- [10] Xie Lei, Zhou Pengfei, Yang Hongyi, et al. Exploring a resilience paradigm for lifeline engineering in coastal areas under climate-change impacts: the case of Ningbo [J]. *Urban Planning Forum*, 2022(8): 81-88.
- [11] Sun H J, Zhao H, Wu J J. A robust matching model of capacity to defense cascading failure on complex networks [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2008, 387(25): 6431-6435.
- [12] Yang Xiao. Optimization scheme for urban road design based on reducing waterlogging [J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2025(5): 150-153.
- [13] Li Wenyu, Hou Jingming, Li Xuan, et al. Optimal operation of urban rainwater detention tanks based on a stormwater numerical model [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2024, 35(5): 82-89.
- [14] Guo Li, Hu Jianing, Gu Qinghua, et al. Optimized deployment of green infrastructure for urban waterlogging response [J]. *City and Disaster Reduction*, 2024(6): 27-32.
- [15] Li Kailin. Design essentials and rectification-measure optimization for drainage pumping stations in old urban districts [J]. *Fujian Construction Science and Technology*, 2024(6): 140-142, 154.
- [16] Kong Yun, Cui Limin, Li Wei, et al. Key issues in municipal infrastructure planning from the perspective of public safety [C]//Urban Planning Society of China. *People's City, Planning Empowerment: Proceedings of the 2023 Annual National Planning Conference*, 2023: 18.
- [17] Gong Qilong, Wang Xiaobin, Yin Haoqi, et al. Research on resilient municipal infrastructure from the perspective of territorial spatial planning [C]//Urban Planning Society of China. *People's City, Planning Empowerment: Proceedings of the 2022 Annual National Planning Conference*, 2023: 10.
- [18] Guo Dongjun, Wu Yanhua, Zhao Hongxu, et al. International experience and implications for critical infrastructure protection planning [J]. *Urban Planning Forum*, 2025(1): 111-119.
- [19] Dai Shenzhi, Feng Hao, He Lei, et al. Compilation mode of disaster-prevention planning in master-plan revisions of large Chinese cities: the case of Wuhan [J]. *Urban Planning Forum*, 2019(1): 91-98.
- [20] Chen Zhiqian. Preliminary exploration of municipal infrastructure planning strategies under the resilient-city concept [J]. *City and Disaster Reduction*, 2021(6): 36-42.

- [21] Han Yu, Huang Xiao, Ye Xinyue, et al. Enhancing urban resilience under climate change through adaptive disaster-prevention and mitigation planning for interconnected infrastructure systems [J]. *Landscape Architecture Frontiers*, 2021, 9(6): 78-87.
- [22] Dudenhoeffer D D, Permann M R, Manic M. CIMS: a framework for infrastructure interdependency modeling and analysis [C]//*Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference*. Monterey: IEEE, 2006: 478-485.
- [23] Friesz T L, Mookherjee R, Peeta S. Modeling large scale and complex infrastructure systems as computable games [M]//Friesz T L. *Network science, nonlinear science and infrastructure systems*. New York: Springer, 2007: 53-75.
- [24] Mendonca D, Wallace W A. Impacts of the 2001 World Trade Center attack on New York city critical infrastructures [J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2006, 12(4): 260-270.
- [25] Monsalve M, de la Llera J C. Data-driven estimation of interdependencies and restoration of infrastructure systems [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2019, 181: 167-180.
- [26] Zorn C R, Shamseldin A Y. Quantifying directional dependencies from infrastructure restoration data [J]. *Earthquake Spectra*, 2016, 32(3): 1363-1381.
- [27] 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.
- [28] McDaniels T, Chang S, Peterson K, et al. Empirical framework for characterizing infrastructure failure interdependencies [J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2007, 13(3): 175-184.
- [29] Zhou S, Ng S T, Yang Y, et al. Delineating infrastructure failure interdependencies and associated stakeholders through news mining: the case of Hong Kong's water pipe bursts [J]. *Journal of Management in Engineering*, 2020, 36(5): 04020060.
- [30] Gursan C, de Gooyert V, de Bruijne M, et al. Socio-technical infrastructure interdependencies and their implications for urban sustainability: recent insights from the Netherlands [J]. *Cities*, 2023, 140: 104397.
- [31] Basu N, Pryor R, Quint T. ASPEN: a micro-simulation model of the economy [J]. *Computational Economics*, 1998, 12: 223-241.
- [32] Dudenhoeffer D D, Permann M R, Manic M. Interdependency modeling and emergency response [C]//*Proceedings of the 2007 Summer Computer Simulation Conference*. San Diego: Society for Modeling and Simulation International, 2007: 1230-1237.
- [33] Bush B B, Dauelsberg L R, LeClaire R J, et al. Critical infrastructure protection decision support system (CIP/DSS) project overview [R]. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 2005.
- [34] Conrad S H, LeClaire R J, O'Reilly G P, et al. Critical national infrastructure reliability modeling and analysis [J]. *Bell Labs Technical Journal*, 2006, 11(3): 57-71.
- [35] Poljansek K, Bono F, Gutierrez E. Seismic risk assessment of interdependent critical infrastructure systems: the case of European gas and electricity networks [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2012, 41(1): 61-79.
- [36] Duenas-Osorio L, Craig J I, Goodno B J, et al. Interdependent response of networked systems [J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2007, 13(3): 185-194.
- [37] Ouyang M. Critical location identification and vulnerability analysis of interdependent infrastructure systems under spatially localized attacks [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2016, 154: 106-116.
- [38] Muhlhofer E, Koks E E, Kropf C M, et al. A generalized natural hazard risk modelling framework for infrastructure failure cascades [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2023, 234: 109194.
- [39] Atat R, Ismail M, Serpedin E. Joint cascade vulnerability assessment of interdependent power-water infrastructures [J]. *IEEE Systems Journal*, 2023, 17(4): 5156-5167.

- [40] Rueda D F, Olivares D E, Oliveira L F M. Using interdependency matrices to mitigate targeted attacks on interdependent networks: a case study involving a power grid and backbone telecommunications networks [J]. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 2017, 16: 3-12.
- [41] Ouyang M, Wang Z. Resilience assessment of interdependent infrastructure systems: with a focus on joint restoration modeling and analysis [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2015, 141: 74-82.
- [42] Wang S, Hong L, Ouyang M, et al. Vulnerability analysis of interdependent spatially embedded infrastructure networks under localized attack [J]. *International Journal of Modern Physics C*, 2017, 28(8): 1750089.
- [43] Wang N, Wu M, Yuen K F. A novel method to assess urban multimodal transportation system resilience considering passenger demand and infrastructure supply [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2023, 239: 109478.
- [44] UNDRR. Addressing the infrastructure failure data gap: a governance challenge [R]. Geneva: United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2021.
- [45] Ouyang M, Hong L, Mao Z J, et al. A methodological approach to analyze vulnerability of interdependent infrastructures [J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2009, 17(5): 817-828.
- [46] Beyza J, Ruiz-Paredes H F, Garcia-Paricio E, et al. Assessing the criticality of interdependent power and gas systems using complex networks and load flow techniques [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2020, 540: 123169.
- [47] Wang N, Wu M, Yuen K F. A novel method to assess urban multimodal transportation system resilience considering passenger demand and infrastructure supply [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2023, 238: 109478.
- [48] Loggins R A, Wallace W A. Rapid assessment of hurricane damage and disruption to interdependent civil infrastructure systems [J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2015, 21(4): 04015005.
- [49] Lee S, Choi M, Lee H S, et al. Bayesian network-based seismic damage estimation for power and potable water supply systems [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2020, 197: 106796.
- [50] Kays H M I, Sadri A M, Muraleetharan K K M, et al. Modeling flood propagation and cascading failures in interdependent transportation and stormwater networks [J]. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 2025, 48: 100741.
- [51] Zhang W, Han Q, Shang W L, et al. Seismic resilience assessment of interdependent urban transportation-electric power system under uncertainty [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2024, 183: 104078.
- [52] Fang Y P, Zio E. An adaptive robust framework for the optimization of the resilience of interdependent infrastructures under natural hazards [J]. *European Journal of Operational Research*, 2019, 276(3): 1119-1136.
- [53] Wang K, Xu Z, Liu Y, et al. Resilience enhancement for multistate interdependent infrastructure networks: from a preparedness perspective [J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2023, 72(1): 190-203.
- [54] Li Y, Lin J, Zhang C, et al. Joint optimization of structure and protection of interdependent infrastructure networks [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2022, 218: 108163.
- [55] Zhang C, Liu X, Jiang Y P, et al. A two-stage resource allocation model for lifeline systems quick response with vulnerability analysis [J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 250(3): 855-864.
- [56] Zhang C, Kong J, Simonovic S P. Restoration resource allocation model for enhancing resilience of interdependent infrastructure systems [J]. *Safety Science*, 2018, 102: 169-177.