

MODÉLISATION DE L'INTERDÉPENDANCE ENTRE LES RÉSEAUX TECHNIQUES URBAINS DANS LE GRAND LOMÉ (TOGO)

ATTIPO REISCH VANEL ^{*1}, BELEMSOBGO SIDNOMA NITA ^{**}, AHOLOU CYPRIEN COFFI ^{***}

Key-words: natural disasters, interdependence, modelling, urban networks, Togo.

A modelling of the interdependence between urban technical networks in Greater Lomé (Togo). Infrastructures are at the service of human activities and play an essential role in the development of any society. In recent years, social and infrastructural systems have often malfunctioned, due to the increase in natural and man-made disasters on the one hand, and the internal and external dependencies between system components on the other. The interconnection between social-infrastructural systems means that the damage caused to a single system extends beyond its reach. This study analyses the functional interdependencies between social-infrastructural systems. To this end, it reviews current literature in these respective fields to identify the challenges posed by urban technical networks in Greater Lomé (Togo). The modelling and assessment carried out by this study also identifies gaps in knowledge and tools to support existing infrastructures and those at the planning stage. The study reveals that every major element in the information and decision chain – from the frequency and intensity of a disruptive event, to the assessment of the immediate and first-order impacts of infrastructure failure, to the estimation of the nature, extent and impact of cascading failures – multiplies uncertainties. The results provide a guideline for decision-makers to improve the functional interdependencies of urban systems.

1. INTRODUCTION

Le terme "urbain" fait référence à une caractéristique de lieu liée à la transformation de l'environnement naturel en un environnement construit. Une ville, ainsi qu'une zone urbaine, sont des systèmes complexes composés de multiples sous-systèmes, et nombreuses sont les interactions entre ces sous-systèmes et l'environnement extérieur. Selon Meerow *et al.* (2016) il existe quatre types de sous-systèmes dans le système urbain: les systèmes technico-infrastructurels (systèmes infrastructurels), les systèmes socio-économiques (systèmes sociaux), les systèmes de nature et de flux d'énergie (systèmes environnementaux) et les systèmes gouvernementaux-organisationnels (systèmes organisationnels).

Selon Reghezza-Zitt (2005), la ville est perçue comme un système complexe qui regroupe de nombreux enjeux sociaux, économiques et humains. Elle est souvent considérée comme un lieu présentant une multitude de dangers et de risques variés, intrinsèques à l'environnement urbain. Ces dangers découlent principalement de l'exposition des éléments vulnérables aux aléas naturels ou humains. Lorsqu'une catastrophe survient, les dégâts directs et indirects causés par cette exposition sont donc une manifestation du risque et de la vulnérabilité (Pigeon, 2012). Les réseaux techniques urbains apparaissent, lors de ses différentes catastrophes, non seulement comme le point d'ancrage de la vulnérabilité (Serre *et al.*, 2014), mais aussi comme agent vecteur de cette même vulnérabilité.

* PhD Student, Centre d'Excellence Régional sur les Villes Durables en Afrique (CERViDA DOUNEDON) – Université de Lomé. Lomé – Togo, 01 B.P. 1515 LOME 01. www.cervida.togo.org. r.attipo@gmail.com.

** PhD, Département de Droit Public, Droit International de l'Environnement, Université de Lagos, Otunba Payne St, Akoka, Lagos 101245, Nigéria, nitabelemsobgo@yahoo.fr.

*** Director of HR, Centre d'Excellence Régional sur les Villes Durables en Afrique (CERViDA DOUNEDON). – Université de Lomé. Lomé – Togo, 01 B.P. 1515 LOME 01. www.cervida.togo.org, caholou@gmail.com.

¹ Corresponding Author

Selon Bocquentin (2020), Grangeat (2017), Toubin (2014) et Lhomme (2012), la notion de « réseau technique urbain » peut être interprétée de manière différente en fonction des domaines et des contextes de son utilisation. Pour Dupuy (1984), l'une des premières propositions de définition formelle d'un tel objet urbain est celle d'un réseau technique urbain, qui est défini comme un équipement technique de solidarité urbaine. Landau & Diab (2017) enrichissent cette première définition en y ajoutant une vision urbanistique (l'expansion des réseaux) et technique (le matériel et la structure des réseaux), permettant de considérer les réseaux urbains comme un système sociotechnique en deux dimensions: organisationnelle et technique.

On peut alors définir un réseau technique urbain comme un réseau d'infrastructures essentielles et linéaires interconnectées qui facilitent le transport de flux, dans le but de garantir le bon déroulement d'un service urbain. Plus précisément, nous employons le concept de « réseau technique urbain » pour désigner les équipements techniques qui fournissent les services urbains de transport des biens et des personnes (réseaux routiers), de transport des eaux (réseaux d'alimentation en eau potable et d'assainissement), de transport d'énergie (réseaux d'électricité) et, enfin, de télécommunications (Dabaj, 2021).

Au cours de la dernière décennie, un nombre croissant de catastrophes naturelles ont eu des répercussions négatives sur les économies régionales de même que sur la vie des millions de personnes. En ce qui concerne les villes d'Afrique de l'Ouest, elles sont devenues plus vulnérables en raison de l'augmentation du taux de migration urbaine d'une part, et d'autre part, à cause d'une concentration d'actifs de grande valeur et d'opérations gouvernementales et commerciales. Par exemple, beaucoup de villes à l'image du Grand Lomé (Togo) sont situées dans des zones côtières et d'autres zones naturellement vulnérables aux catastrophes majeures. Ainsi, le potentiel d'impacts graves et étendus des événements extrêmes n'a jamais été aussi grand qu'aujourd'hui.

Le cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC, 2014) mettait déjà les Etats en garde contre l'augmentation des impacts potentiels sur les systèmes d'infrastructure, l'environnement bâti et les services écosystémiques dans les zones urbaines. Cette mise en garde était le résultat de l'évolution des risques climatiques, et une croissance galopante du taux d'urbanisme. Certains auteurs tels que Cantuarias-Villessuzanne *et al.* (2021), Pinson *et al.* (2019), Rankovic *et al.* (2012) ont fait le même constat en ce qui concerne le potentiel de défaillances en cascade. Sourisseau *et al.* (2020) note qu'en ce qui concerne le cas spécifique du Togo, « le taux d'urbanisation a connu une forte augmentation, passant de 9,4% en 1961 à 37,7% en 2010 ». Dès lors, il convient de trouver des stratégies de durabilités et de survivabilité pour les systèmes qui manifestent une interconnexion à toutes les échelles. Si à la base la théorie de la survivabilité des systèmes faisait référence à la théorie de la continuité des activités appliquée à la fourniture d'un service particulier, cette approche est désormais utilisée par tous les opérateurs de services urbains performants. Ainsi, les opérateurs togolais ne dérogent pas à cette règle. L'objectif étant de garantir la continuité des services, et d'assurer une bonne gestion de l'information.

1.1. Villes et réseaux

Selon Musa (2017), l'infrastructure d'une ville comprend des systèmes complexes (tels que les postes transformateurs du réseau électrique, les stations d'épuration des eaux usées, les réseaux d'adduction d'eau potable, les services d'incendie, les services publics, les écoles, les bibliothèques, les entreprises, les maisons), associés à une infrastructure urbaine complexe facilitant ainsi l'interaction des citoyens et l'intégration technologique de l'infrastructure de la ville.

La complexité d'une chose se caractérise par sa capacité à être perçue selon des perspectives multiples et souvent contradictoires. Ce n'est qu'une approche pour caractériser les villes comme des systèmes complexes (Dong, 2023). Les villes peuvent être aussi petites qu'un kilomètre carré ou aussi grandes que de nombreux pays plus petits; croître et changer au fil du temps; être à la fois réelles et virtuelles; se trouver n'importe où; être des réseaux; être spatiales et transcendantes; concerner des lieux et des personnes; être aussi grandes que de nombreuses petites nations (Zhao et Fang, 2018).

Ainsi, la ville intelligente adopte un système urbain intelligent afin d'atteindre une croissance économique et un développement durable. Dans une telle perspective, la collecte de données est essentielle pour garantir l'efficacité, ce qui conduit à l'optimisation des systèmes. L'objectif étant de fournir des solutions technologiques aux différents besoins et embarras de la ville et d'améliorer les conditions de vie des populations qui habitent la ville. Cependant, force est de noter que l'amélioration ne doit pas seulement concerner le niveau de vie des populations. Elle doit également permettre de réduire, par exemple, les embouteillages tout en établissant un cadre propice pour les affaires.

Cela signifie donc que l'expansion et la dépendance des villes aux réseaux techniques urbains entraînent une forme d'urbanisation appelée « réticulaire » (Dupuy, 1991). Par conséquent, l'organisation des réseaux ne se limite pas à celle d'un système technique, mais elle conduit à l'organisation d'un espace selon ses fonctionnements. Selon Serre *et al.* (2016), cette forme d'urbanisation contribue à la propagation du risque d'inondation en milieu urbain.

Au Togo par exemple, selon l'Agence Française de Développement (AFD), les grandes inondations qui se sont produites en 2008, 2010 et 2022 étaient dues en grande partie à l'insuffisance d'infrastructures de drainage des eaux de pluie et du système de gestion des déchets solides. Ce qui avait notamment engendré de nombreux préjudices (notamment matériels et humains) comme l'inaccessibilité des routes, destruction des ponts, la dégradation des canalisations, etc. Les autres secteurs d'activité économique avaient également été fragilisés à cause de l'inaccessibilité des réseaux urbains et le manque à gagner est à relever auprès des travailleurs du secteur formel et informel. Force est de noter qu'en 1984, Marguerat (1984), dans ses écrits « L'armature Urbaine du Togo », notait que le « Togo s'apparentait plus au schéma macrocéphale qu'à un réseau harmonieusement équilibré ».

Notre étude porte particulièrement sur le Grand Lomé. Il ressort que les infrastructures essentielles telles que les télécommunications, la production et la transmission d'électricité, les transports, le réseau des eaux usées, les systèmes d'approvisionnement en eau et les services d'urgence sont devenus des composants d'un système interconnecté plus vaste dans cette région. De ce fait, la perturbation d'une infrastructure se répercute inexorablement sur d'autres infrastructures et finit par avoir un impact sur la communauté et l'économie. Cependant, il convient de noter que la nature et la portée des impacts dépendent de la nature de la catastrophe, ainsi que du type et du mode de défaillance primaire d'un élément ou du système d'infrastructure; ce qui entraîne inexorablement l'effet « domino » des défaillances dans d'autres systèmes. C'est à dire qu'il existe une grande interdépendance entre les infrastructures dans le Grand Lomé.

Il convient de rappeler qu'en 2022 les inondations avaient touché une grande partie de Lomé (dont 20 à 35% des zones habituellement non-inondables). Cette inondation concernait principalement la zone des deux cordons (la basse ville de Lomé entre la lagune et la mer) et l'aréal où résident 40 à 50% de la population. Des examens et études ont révélé que cette inondation était due à l'emplacement très bas de la ville par rapport au niveau de la mer, la hausse du niveau de la mer, les changements climatiques (augmentation des précipitations), l'urbanisation accélérée, la construction dans les lits majeurs des cours d'eau (vallée du Zio), l'imperméabilité des sols due aux dépotoirs et aux déchets plastiques, etc. Les conséquences étaient manifestes notamment sur les infrastructures urbaines, l'accès aux services urbains et le développement socio-économique. Toute cette situation nécessite donc des mesures urgentes et à moyen terme.

La présente étude vise à modéliser l'interdépendance entre les réseaux techniques urbains dans le Grand Lomé afin de mieux cerner la propagation de la vulnérabilité par effets domino lors des inondations urbaines et d'améliorer les politiques de résilience urbaine. Nous utilisons le graphique multiplex pour modéliser les réseaux techniques urbains dans le Grand Lomé. Cependant, la question qui se pose est celle de savoir combien de couches sont effectivement nécessaires pour modéliser avec précision les réseaux techniques urbains du Grand Lomé ? La suite de cette étude apportera une réponse à cette question.

2. MÉTHODOLOGIE

2.1. Zone d'étude

Lomé, la capitale du Togo, est située dans la région maritime, l'une des cinq (5) régions administratives du Togo. A sa création, la commune de Lomé était enclavée entre la lagune au nord, l'océan Atlantique au sud, le village de Bè à l'est et la frontière d'Aflao à l'ouest. En 2010, elle était délimitée par le Groupement Togolais d'Assurances (GTA) au nord, l'océan Atlantique au sud, la raffinerie de pétrole à l'est et la frontière Togo-Ghana à l'ouest. L'agglomération s'étend sur une superficie de 333 km², dont 30 km² dans la zone lagunaire, avec une population de 1 477 660 habitants. La Figure 1 montre la situation géographique de la ville de Lomé. En 2022, la population de la ville est passée à 2 188 376 habitants sur une superficie de 425,6 km².

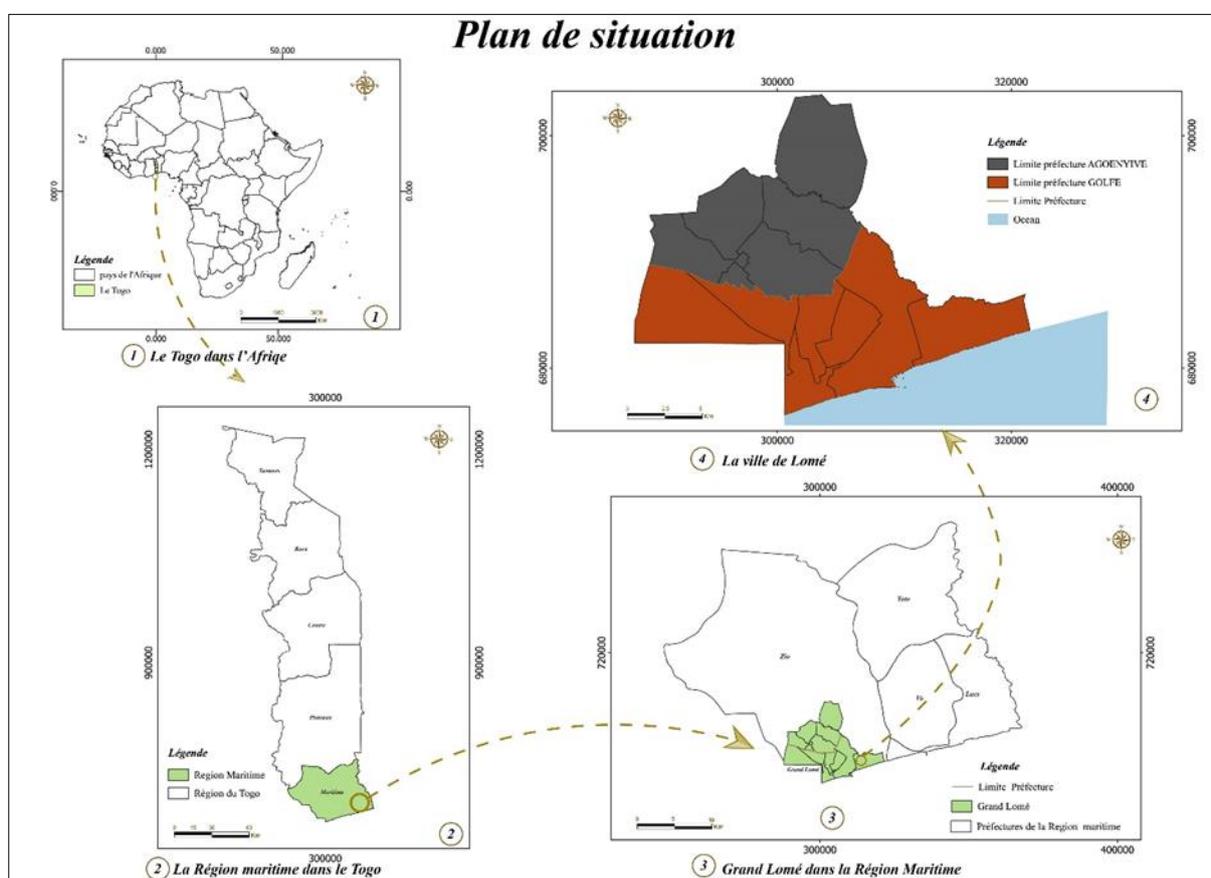


Fig. 1 – Plan de situation de Lomé.

Source: Attipo, 2023.

2.2. Les inondations à Lomé

Depuis 2010, les saisons de pluies ont été très pluvieuses au Togo. Les pluies diluviennes ont entraîné des dégâts matériels importants et des pertes en vies humaines. Elles ont été accompagnées de vents violents et ont causé souvent des inondations dont l'ampleur varie d'une zone à une autre. Cette pluviométrie au-dessus de la normale est également à l'origine de crues exceptionnelles des principaux

cours d'eau, notamment la rivière Zio et les différentes lagunes de la ville. Ainsi, à la faveur de certains facteurs de vulnérabilité aux inondations et à la remontée de la nappe phréatique, il en est résulté une inondation entre juin et octobre 2013 dans les milieux susmentionnés, suscitant une mobilisation prompte du gouvernement et de ses partenaires. La Figure 2 nous présente les zones vulnérables aux inondations de la ville de Lomé. La pluviométrie du mois de juin 2013 avait atteint une hauteur de 365,1 mm contre une moyenne normale de 184,4 mm sur une période de 30 ans allant de 1971 à 2000. Pour le mois de septembre 2013, la ville de Lomé avait enregistré 205 mm d'eau contre une normale de 64 mm soit, 314% d'excédent (ANPC, 2017). Aujourd'hui, malgré une multitude des bassins de rétention construites dans la ville pour collecter les volumes d'eaux pluviales, plusieurs quartiers sont toujours affectés par des inondations même étant éloignés des zones de dépressions. La Figure 3 nous présente les différents bassins et les zones de dépression dans le Grand Lomé. Elle permet de visualiser les zones les plus vulnérables aux inondations et autres risques liés à l'eau. En comprenant la répartition de ses bassins et dépressions, il est possible de mieux planifier les infrastructures et les mesures de prévention pour minimiser les impacts des catastrophes naturelles dans ces zones critiques, comme les inondations.

Les inondations ont été extrêmement graves, causant des pertes et dommages considérables aux biens, aux infrastructures et aux personnes comme le décrit le tableau ci-dessous (Tableau 1). Le tableau ci-dessous montre les causes des inondations en passant par la superficie touchée jusqu'aux pertes et dommages causés par les inondations en 2010. Le tableau donne une description synthétique des inondations de 2010 au Togo.

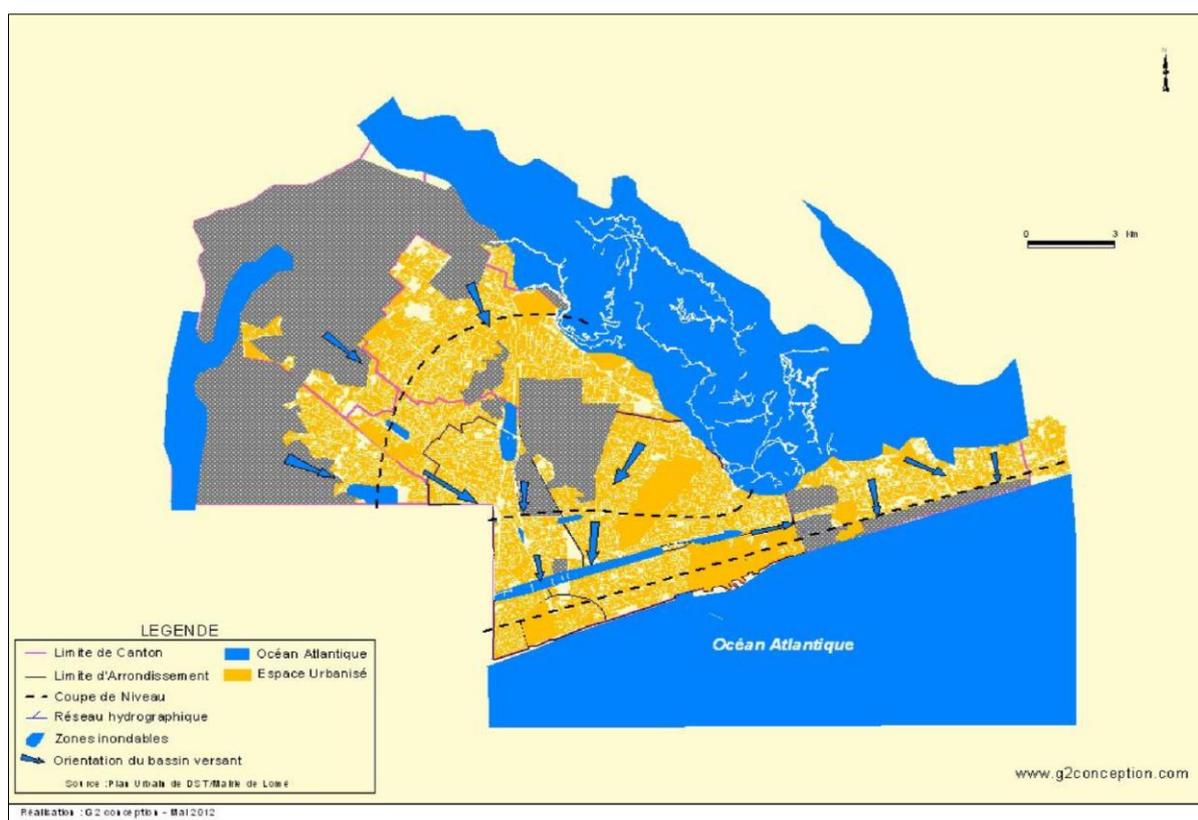


Fig. 2 – Carte des zones inondables de Lomé.
Source: SDU Grand Lomé.

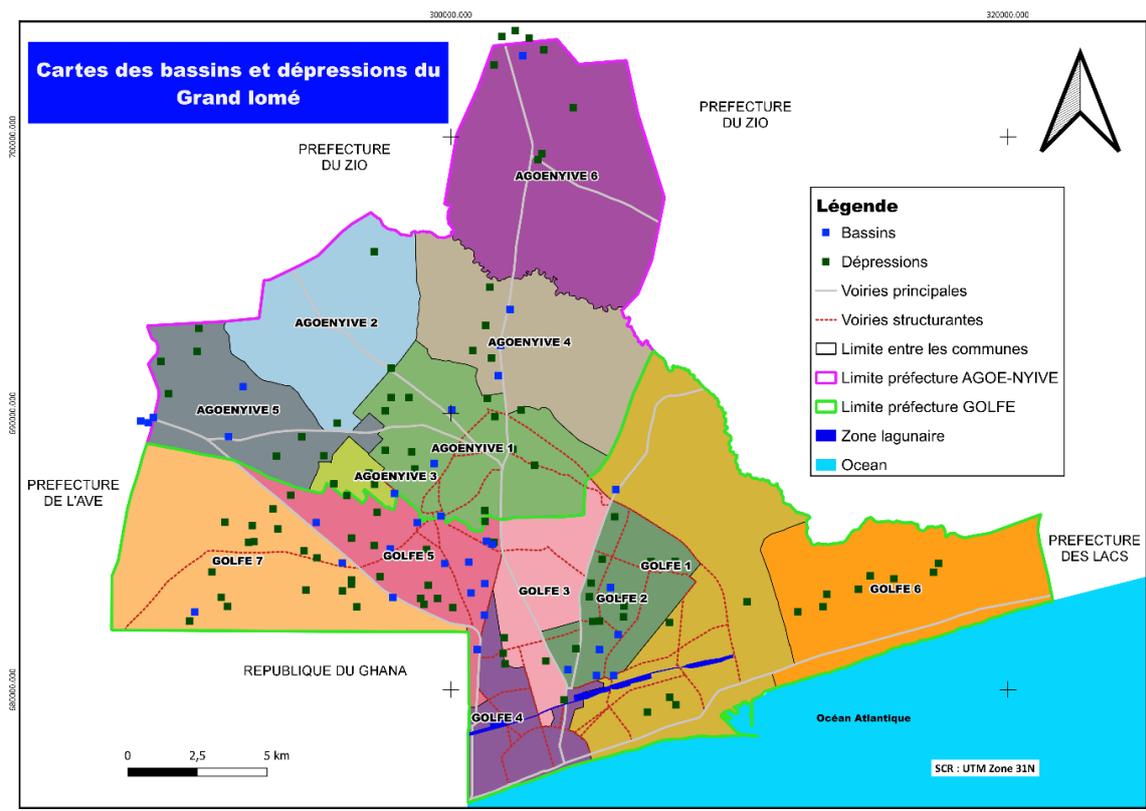


Fig. 3 – Les bassins et dépressions du Grand Lomé.
Source: ANPC 2022.

Tableau 1

Description des inondations de 2010 au Togo

Causes premières	Fortes pluies
Ampleur des inondations (1 à 3) ¹	3 (élevée)
Classes de gravité (1 à 4) ²	3 (élevée)
Superficie de la zone touché (km ²)	195
Durées (jours)	20
Personnes touchées	82 767
Dommages sur les infrastructures	3 (élevée)
Décès enregistrés	21

Source: PDNA, 2012.

2.3. Analyse des interdépendances

Le cadre proposé pour la résilience par interdépendance fonctionnelle entre les réseaux techniques urbains dans le Grand Lomé est basé sur l'analyse des modes de défaillance et leurs effets. Cette étape nous permet d'étudier la séquence et le type d'effets en cascade potentiels causés par les dysfonctionnements. Une analyse dynamique, ou un examen de la manière dont le système pourrait évoluer au fil du temps, est également nécessaire pour découvrir et comprendre les interdépendances

¹ Ampleur: 1 – faible; 2 – moyenne; 3 – élevée

² Classe de gravité: 1 – faible; 2 – moyennes; 3 – élevée; 4 – exceptionnelle.

temporelles (Gürsan et de Gooyert, 2020). Les dysfonctionnements en cascade ou effets en cascade peuvent être définis comme l'ensemble des événements dans les sous-systèmes humains qui provoquent des perturbations physiques, sociales ou économiques liées à un événement physique ou à la mise en place d'une défaillance technologique ou humaine initiale. Dans le cadre de cette recherche, un dysfonctionnement en cascade se produit lorsqu'une perturbation fonctionnelle d'une infrastructure entraîne la défaillance d'un composant dans une deuxième infrastructure, ce qui provoque ensuite une perturbation fonctionnelle dans la deuxième infrastructure.

Afin de mieux appréhender des dysfonctionnements en cascade dus à différentes causes (événements originaux ou non), trois types de dysfonctionnements sont définis dans cette recherche: (a) dysfonctionnement direct: les composants perdent leur fonction en raison du danger initial; (b) dysfonctionnement interne indirect: les composants perdent leur fonction en raison de la défaillance d'un composant à l'intérieur du même sous-système; (c) et dysfonctionnement externe indirect: les composants perdent leur fonction en raison de la défaillance d'un composant extérieur au même sous-système. La séquence des événements peut nous permettre de comprendre la cause et l'effet de chaque événement de dysfonctionnement, et de comprendre les systèmes directement et indirectement affectés sous différents aléas. Ainsi, une explication est apportée par cette étude sur comment utiliser les résultats obtenus pour améliorer la résilience des réseaux techniques urbains à Lomé.

Ainsi, la méthodologie se focalise sur quatre (04) points essentiels comme le résumé de la Figure 4 ci-dessous. Il s'agit principalement de l'analyse du fonctionnement des réseaux techniques, des relations fonctionnelles entre ces derniers afin de mieux comprendre les connexions et les interconnexions, et tout autres relations possibles entre ses systèmes sociotechniques. Après cela, nous allons identifier des éventuelles défaillances sur les réseaux et la propagation des défaillances entre les réseaux dépendants ou interdépendants afin de classer les différentes relations entre ces réseaux et, enfin, de modéliser leurs interdépendances.

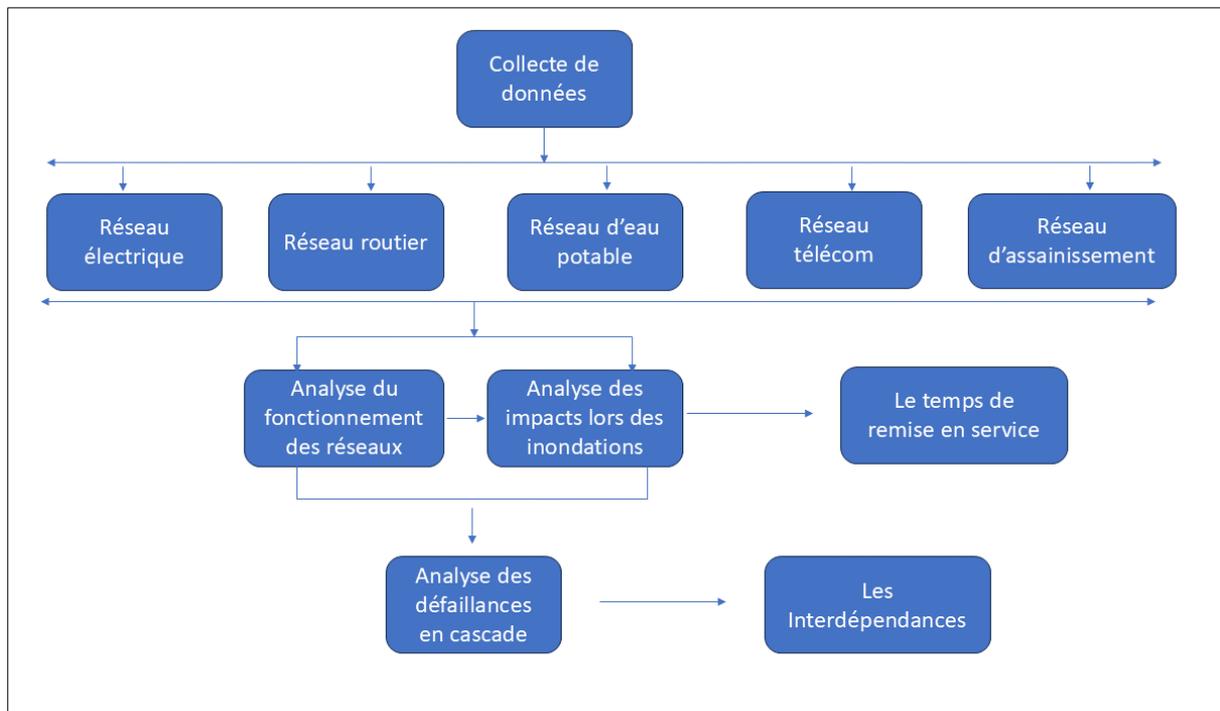


Fig. 4 – Schéma méthodologique.

Tous les grands réseaux techniques urbains – électricité, eau potable, autoroutes, télécommunications, assainissement – ont été examinés afin d’en étudier les interdépendances. L’inventaire exhaustif nécessaire à l’approche choisie a été réalisé à partir de diverses sources: annonces de presse, études, bulletins d’information, flux d’actualités et rapports provenant des sites web des autorités locales de Lomé et des fournisseurs de réseaux ont été autant de sources à partir desquelles des données qualitatives et quantitatives ont été collectées.

Cette méthodologie a permis d’examiner les défaillances en cascade pendant les inondations et les premières étapes de la reprise afin d’identifier les interdépendances des infrastructures critiques. Les défaillances en cascade ont été examinées à l’aide d’observations sur place et de faits vérifiés, mettant en évidence les interdépendances existantes et leurs fonctions au cours de l’intervention et de la remise en service.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Il ressort que les réseaux, les infrastructures et les composants de la ville de Lomé sont vulnérables aux inondations. Ce qui implique qu’ils auront des répercussions et des impacts sur leurs propres réseaux. L’évaluation de la criticité des infrastructures permet de prioriser les actions à entreprendre pour minimiser les interruptions de service. Cette évaluation est basée sur certains critères, notamment la dépendance des réseaux les uns par rapport aux autres, en temps normal que pendant les inondations. La notion de criticité est étroitement liée à l’endommagement du réseau, l’infrastructure et les composants (selon le niveau de détail) après une inondation. Les valeurs de criticité peuvent changer au cours des événements en fonction du niveau d’eau. Par exemple, afin d’identifier les stratégies de reconstruction du réseau urbain de Lomé après une inondation, différentes contraintes doivent être prises en compte, notamment en termes de ressources, de temps et de matériaux. Ainsi, il pourrait prendre des jours, voire des mois, pour que les réseaux touchés retrouvent un fonctionnement normal. Une mauvaise prise en compte de ce risque d’impacts sur les réseaux peut conduire à un délai supplémentaire important avant le retour à la normale.

3.1. Les réseaux techniques: des infrastructures essentielles

Le fonctionnement des villes dépend en grande partie du fonctionnement des réseaux considérés comme la colonne vertébrale. La Figure 5 montre l’ensemble des réseaux techniques urbains étudiés sur les bassins et les dépressions du Grand Lomé. La plus petite défaillance pourrait avoir des conséquences en cascade sur le fonctionnement urbain (Robert *et al.*, 2009a). Par exemple, plusieurs équipements urbains du Grand Lomé (écoles, marchés, dispensaire) sont restés inaccessibles pendant plusieurs jours suite à l’impraticabilité de la route d’Avenou lors des inondations de 2010. Un autre exemple est le cas de l’Allemagne, l’Afrique du Sud, l’Italie et la Roumanie qui ont connu une panne du réseau internet suite à l’effondrement du World Trader Center en 2001 à New York (Serre *et al.*, 2016).

Pour Serre *et al.*, (2016) et Robert *et al.*, (2009), ces types de défaillance des réseaux techniques urbains dits essentiels et leurs effets montrent la sensibilité des réseaux à tout type d’aléas tels que les aléas technologiques et naturels, l’erreur humaine, les attentats, etc. Selon Serre *et al.* (2016), les réseaux techniques urbains doivent être rendus plus sûrs pour éviter ces types de défaillances. Mais, du fait de l’enchevêtrement des réseaux, leur extension tentaculaire et extrême concentration de certains nœuds, augmenter la résilience des réseaux reste un très grand défi. En effet, l’interconnexion et l’interdépendance de l’ensemble de ces réseaux ont abouti à la création d’un macro-réseau reliant le monde entier (Serre *et al.*, 2016).

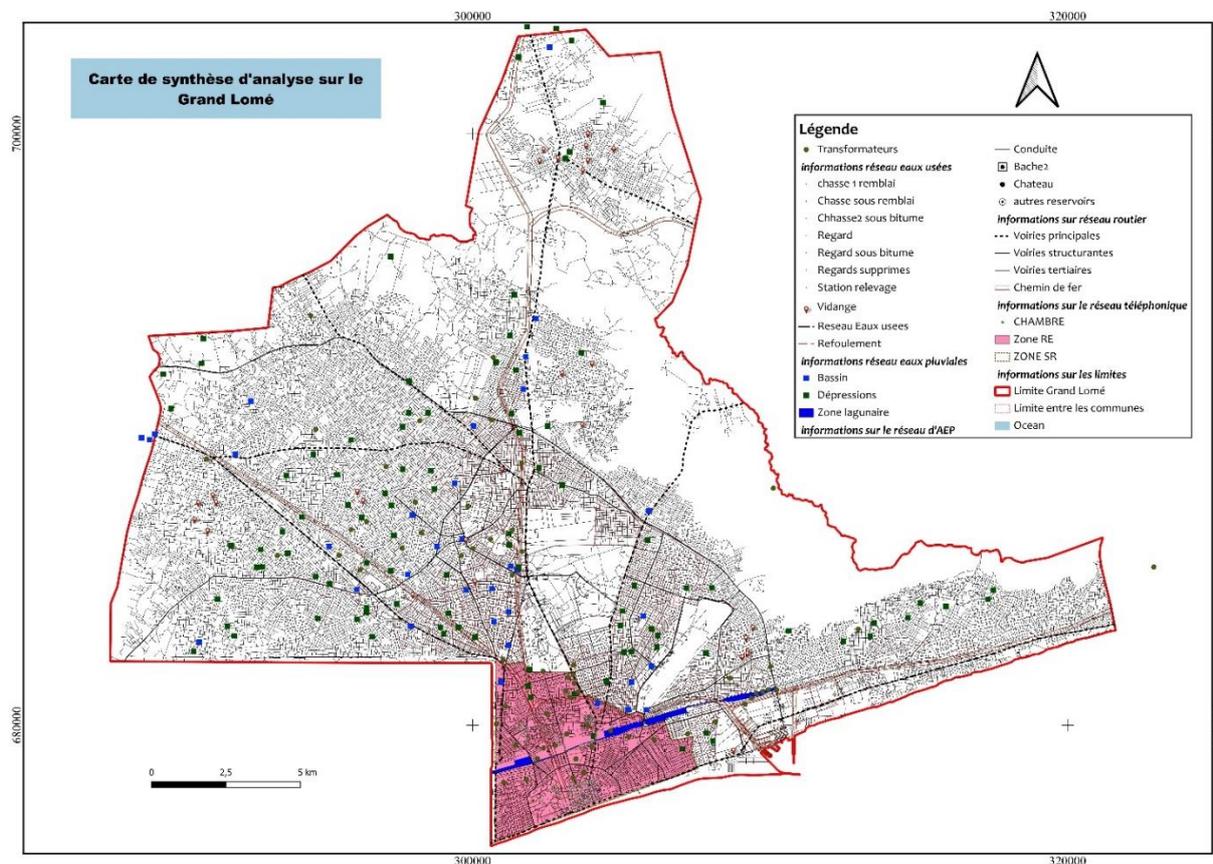


Fig. 5 – Carte de synthèse d'analyse des réseaux techniques urbains du Grand Lomé.

La Figure 5 présente les différents réseaux techniques urbains dans le Grand Lomé, incluant les infrastructures électriques, les réseaux d'adduction d'eau et les systèmes de transport. Elle montre également les zones vulnérables aux inondations.

3.2. L'effet domino sur les réseaux urbains

Les événements de dysfonctionnements externes sont essentiels à notre étude, car il est bien documenté que la défaillance d'un système affecte la performance des autres systèmes. Les systèmes d'infrastructures critiques (IC) ont été continuellement exposés à de multiples menaces et dangers (Kröger et Nan, 2014). Selon Kröger (2019), « une défaillance unique au sein d'un système d'infrastructure ou même la perte de son service continu peut être suffisamment dommageable pour notre société et notre économie, tandis que des défaillances en cascade traversant des sous-systèmes et/ou même des frontières peuvent entraîner des effondrements multi-infrastructures et des conséquences sans précédent ».

L'ampleur des effets en cascade peut être influencée par la force de la connexion. Le phénomène connu sous le nom d'« effet de cascade » décrit comment les résultats ou les effets particuliers du franchissement d'un seuil se répercutent en cascade sur plusieurs échelles, périodes et/ou systèmes entiers. Parce qu'ils sont moins adaptatifs et plus résistants aux niveaux courants de volatilité externe, les systèmes fortement couplés sont plus enclins à subir des effets en cascade (Wang *et al.*, 2023).

L'importance de prévenir ou, du moins, de minimiser l'impact négatif des défaillances en cascade dues aux interdépendances entre les systèmes a été reconnue, non seulement par les gouvernements, mais aussi par le public, comme un sujet de protection des infrastructures critiques. L'objectif de la

protection n'est pas seulement d'identifier la cause des défaillances et de les prévenir, mais aussi d'arrêter les événements en cascade ou en escalade pouvant affecter d'autres infrastructures (Rey-Thibault *et al.*, 2023). Dans le cadre de la présente étude, l'objectif était de bien comprendre ces problèmes d'interdépendance souvent cachés et les cascades de défaillances potentielles, et de les aborder à l'aide de techniques de modélisation et de simulation avancées.

D'une manière générale, il ressort des résultats, qu'une prise en compte de l'importance des interdépendances entre les systèmes d'infrastructure et des incertitudes liées à leurs interactions constitue un défi pour le Grand Lomé, en raison de la complexité et de la nature perpétuelle de ces systèmes, de l'absence d'informations suffisantes caractérisant clairement la propagation des défaillances et du manque d'outils de modélisation/simulation permettant d'analyser de manière exhaustive les interactions entre les systèmes. L'ordre des événements peut nous aider à comprendre les causes et les effets de chaque dysfonctionnement, ainsi que les systèmes directement et indirectement touchés lorsque divers dangers sont présents. En somme, en ce qui concerne les résiliences sociaux-infrastructurelles, deux scénarios peuvent se produire: soit les dangers influencent les systèmes sociaux et leurs dysfonctionnements affectent les systèmes d'infrastructure, soit les dangers affectent les systèmes d'infrastructure et leurs dysfonctionnements affectent les systèmes sociaux.

3.3. Interdépendances entre les réseaux techniques

L'étude se base sur l'interdépendance fonctionnelle des systèmes sociaux-infrastructurels urbains en examinant la relation entre l'infrastructure routière et le service médical d'urgence. Yang *et al.* (2022) montrent que la dépendance et l'interdépendance sont des termes utilisés dans le contexte de la résilience urbaine pour décrire la manière dont un sous-système urbain influence ou est influencé de manière significative par un autre sous-système urbain.

Les réseaux techniques apparaissent rarement de manière isolée. Par exemple, une inondation provoquant l'inondation d'un transformateur électrique perturbe le réseau électrique, engendrant alors de nombreuses coupures d'électricité. Ces coupures créent des perturbations sur certaines parties du réseau d'eau potable. Ces incidences peuvent s'étendre jusqu'aux pompes de relevage, les feux tricolores (entraînant ainsi une perturbation du Trafic) et le réseau de télécommunication (Huet *et al.*, 2003; Ruin, 2007).

Dans le cas précis des réseaux de transport, la manière dont un réseau affecte un autre n'est pas triviale et souvent, des points spécifiques d'un réseau interagissent avec des points spécifiques d'un autre réseau. Cela conduit au concept de réseaux interactifs dans lesquels des liens existent entre les points d'un même réseau ainsi qu'entre les réseaux. Tout comme les gaz qui, par définition, sont constitués de particules non-interactives, le comportement des réseaux en interaction présente des propriétés émergentes profondes qui n'existent pas dans les réseaux individuels.

La propriété fondamentale qui caractérise les réseaux interdépendants est l'existence de deux types de liens qualitativement différents: les liens de connectivité et les liens de dépendance. Les liens de connectivité sont les liens que nous connaissons bien dans la théorie des réseaux simples, car ils relient les points d'un même réseau (Caillaud, 2022). Ils représentent généralement la capacité d'une certaine quantité (information, électricité, trafic, flux, etc.) à circuler d'un point à l'autre.

Sur la base de l'analyse des réseaux techniques dans le Grand Lomé et de plusieurs travaux répertoriés dont celui de Bocquentin (2020), nous catégorisons les interdépendances en trois (03) éléments que nous illustrerons par des exemples simples: (a) les infrastructures A et B sont physiquement interdépendantes; par exemple, la capacité de l'infrastructure B à fournir de l'eau potable dépend de la capacité de l'infrastructure A à lui fournir de l'énergie. On parle de l'interdépendance physique; (b) l'interdépendance cybernétique: le fonctionnement de l'infrastructure A dépend des informations que l'infrastructure B transmet par l'intermédiaire d'un système d'information (à l'instar d'un feu de circulation qui dépend de ses contrôleurs centralisés); (c) (Inter)dépendance géographique: en raison de leur proximité, les infrastructures A et B sont affectées par l'état de l'un et de l'autre. Par exemple, l'état

À cause du fait qu'elles peuvent constituer un danger et altérer la fonctionnalité d'une ou plusieurs infrastructures ou systèmes, les (inter)dépendances, en tant que phénomènes complexes, servent finalement de multiplicateurs de risques (Petit et Verner, 2016). Les effets des dysfonctionnements et des défaillances, ou des modifications de la capacité d'un système à remplir ses fonctions, peuvent alors aller bien au-delà des domaines et des systèmes qui ont été touchés en premier lieu. (Bocquentin *et al.*, 2020).

Les figures ci-dessus (6 et 7) mettent en évidence les interdépendances entre les différents réseaux techniques, montrant comment une défaillance dans un réseau peut affecter les autres. Les effets en cascade illustrés soulignent l'importance de renforcer la résilience de chaque réseau pour prévenir des perturbations généralisées en cas de catastrophe. En comprenant ces interdépendances, il est possible de mieux planifier et de prioriser les interventions pour minimiser les impacts négatifs sur l'ensemble des infrastructures urbaines (Touili, 2022).

En somme, l'application potentielle de l'étude à l'analyse de la résilience interdépendante de plus de deux sous-systèmes urbains est une autre caractéristique qui mérite attention. Cette méthode peut être utilisée pour trouver les dépendances fonctionnelles de nombreux systèmes puisque les dépendances fonctionnelles entre deux systèmes sont identifiables. Néanmoins, l'augmentation de la quantité et de la complexité des interférences rendrait plus difficile l'analyse des dysfonctionnements en cascade et l'adaptation à des modes améliorés. Toutefois, cette idée doit être considérée comme une avancée positive dans l'étude de la résilience urbaine.

5. CONCLUSIONS

Cette recherche est partie sur le postulat que l'analyse de interdépendances entre les réseaux techniques urbains est essentielle pour l'implémentation des stratégies de résilience urbaine face aux inondations en particulier, et de développement urbain durable de manière globale. Ensuite, elle s'est fixée comme objectif. Cette étude a analysé les dysfonctionnements en cascade et les modes de défaillance pour évaluer les effets potentiels dus aux dangers en vue de modéliser les relations entre les différents réseaux. Ainsi, l'étude a été faite sur la base de scénario supposé afin d'identifier la séquence des défaillances des composants et de clarifier les causes et les conséquences. De plus, les modes de défaillance de chaque composant affecté ont également été identifiés. Comme résultat, une interdépendance des sous-systèmes sociaux-infrastructurels-urbains est démontrée en trois styles: l'interdépendance physique, cybernétique et enfin géographique. L'observation continue du développement de l'événement de catastrophe du point de vue de la fonction de défaillance en cascade aide à mieux comprendre l'interdépendance des systèmes et, finalement, à mieux gérer le sous-système urbain. L'ampleur des perturbations est influencée par les relations entre les réseaux, étant donné que les réseaux apparaissent rarement de manière isolée. En raison de la complexité des réseaux lors des interactions et des incertitudes, la prise en compte des interdépendances reste un défi majeur. Il sied de souligner que la méthodologie proposée peut être appliquée à n'importe quel sous-système des zones urbaines (systèmes organisationnels-gouvernementaux et systèmes de flux nature-énergie) pour tous les types de risques. Inévitablement, il y aura des acteurs, des fonctions, des modes de défaillance et des modes d'amélioration différents. Par conséquent, cette méthodologie peut aider les décideurs dans la gestion des urgences et peut être adaptée au contexte local afin d'assurer la continuité des services urbains lors des inondations ou faire refonctionner dans un délai très court les services après un dysfonctionnement suite aux inondations. Tout cela arriverait car le constat et les effets urbains en cascade dans plusieurs domaines pourraient dépasser les limites temporelles et spatiales du danger initial en raison de l'interdépendance fonctionnelle entre les réseaux techniques urbains dans le Grand Lomé. La résilience urbaine dépend directement de l'interdépendance fonctionnelle des réseaux techniques.

Le développement urbain durable soulève une problématique plus générale qui dépasse le cadre de cette recherche: dans le futur, quels acteurs devront être en charge de la gestion de l'urbanisation des réseaux techniques ? Comment planifier l'expansion des systèmes urbains face aux changements

climatiques ? En effet, de la manière dont on planifie la ville, avec les effets pervers des changements climatiques en milieu urbain, il semble indispensable de maîtriser le développement des réseaux techniques essentiels afin d'appréhender leurs contributions aux stratégies de résilience et de la durabilité urbaine.

BIBLIOGRAPHIE

- AFD, « Aménagement Urbain au Togo ». <https://www.afd.fr/fr/carte-desprojets/amenagement-urbain-au-togo>.
- Bocquentin, M. (2020), *Étude et modélisation des phénomènes d'(inter) dépendances et de défaillances en cascade au sein des réseaux techniques urbains: vers une aide à la décision pour une application à l'agglomération parisienne face à une crue majeure* (Doctoral dissertation, Université Paris-Est).
- Bocquentin, M., Vuillet, M., Cariolet, J. M., Lhomme, S., Diab, Y. (2020), *Vers une meilleure prise en compte des défaillances en cascade au sein des réseaux franciliens interdépendants face aux crues majeures*. La Houille Blanche, **106**(1), pp. 70–78.
- Caillaud, K. (2022), *Les boucles de rétroaction au sein des interdépendances. Le cas des infrastructures d'eau potable*. Flux, (2), pp. 15–31.
- Cantuarias-Villessuzanne, C., Audrain-Demey, G., Gillet, L., Guemar, C., Pineau, R., & Isabelle, M. (2021). *Investissement immobilier et objectif « zéro artificialisation nette »* (Doctoral dissertation, ESPI2R).
- CEPRI, (2016), *Le territoire et ses réseaux techniques face au risque d'inondation*. 88 p. Centre Européen de Prévention du Risque Inondation.
- Dabaj, A. (2021), *Analyse Des Risques et Aide à la Décision pour l'Amélioration de la Résilience des Réseaux Techniques Urbains Franciliens Face aux Crues* (Doctoral dissertation, Université G. Eiffel).
- Dong, M. W. Y. (2023), *A Critical Analysis on Complex Urban Systems and Complex Systems Theory*. Journal of Computing and Natural Science, **3**(1), pp. 024–034.
- Dupuy, G., (1984), *Villes, systèmes et réseaux. Le rôle historique des techniques urbaines*, Les Annales de la Recherche Urbaine, vol. **23**, n°1, pp. 231–241.
- Dupuy, G. (1991), *L'urbanisme des réseaux, théories et méthodes* (p. 198). Armand Colin.
- E., Wilkinson, M., Hunsicker, E., Ji, S., Li, M., Bernard, Y., ... & Denno, P. (2020), *Architecture definition in complex system design using model theory*. IEEE Systems Journal, **15**(2), pp. 1847–1860.
- Grangeat, A. (2017), *Vulnérabilité, résilience et effets cascade entre réseaux techniques: apports de la modélisation systémique et spatiale pour la planification et la gestion de crise au profit des opérateurs de réseau et de la sécurité civile* (Thèse de doctorat), Université de Lyon.
- Gürsan, C., & de Gooyert, V. (2021), *The systemic impact of a transition fuel: Does natural gas help or hinder the energy transition ?*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, **138**, 110552.
- Huet, I., Breuil, F., Bessede, J. L., & Janin, M. (2003), *New environmental requirements: impact on high voltage electrical equipment; Impact des nouvelles exigences environnementales sur le matériel haute tension*. Revue de l'Électricité et de l'Électronique.
- Kröger, W., & Nan, C. (2014), *Addressing interdependencies of complex technical networks*. In Networks of Networks: The Last Frontier of Complexity, pp. 279–309, Springer, Cham.
- Kröger, W. (2019), *Achieving resilience of large-scale engineered infrastructure systems*. Resilient structures and infrastructure, pp. 289–313.
- Landau, B. & Diab, Y., (2017), *Le génie urbain revisité: innovations-expérimentations*, Presses des Ponts, 244 p.
- Lhomme, S., (2012), *Les réseaux techniques comme vecteur de propagation des risques en milieu urbain - Une contribution théorique et pratique à l'analyse de la résilience urbaine* (Thèse de doctorat), Université Paris Diderot.
- Marguerat, Yves « *L'Armature Urbaine du Togo* », in les villes du Togo: Bilans et perspectives. 1984. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers18-07/18141.pdf.
- Meerow, S., Newell, J. P., & Stults, M. (2016), *Defining urban resilience: A review*. Landscape and urban planning, **147**, pp. 38–49.
- Mottahedi, A., Sereshki, F., Ataei, M., Nouri Qarahasanlou, A., & Barabadi, A. (2021), *The resilience of critical infrastructure systems: A systematic literature review*. Energies, **14**(6), 1571.
- Musa, W. (2017), *The impact of smart city initiatives on cities' local economic development*.
- Petit, F., & Verner, D. (2016), *Critical Infrastructure Interdependencies Assessment*. World Security Report, 2016.
- Pigeon, P., (2012), *Géographie critique des risques*, Economica, 217 p.
- Pinson, L., Del Mondo, G., & Tranouez, P. (2019, September), *Representation of interdependencies between urban networks by a multi-layer graph*. In COSIT.
- Rankovic, A., Pacteau, C., & Abbadie, L. (2012), *Services écosystémiques et adaptation urbaine interscalaire au changement climatique: un essai d'articulation*. VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement, (Hors-série 12).

- Rey-Thibault, C., Gourain, Y., & November, V. (2023), *Une approche multirisque aide-t-elle à comprendre les réseaux urbains? Réflexions sur des dynamiques enchevêtrées à partir de deux agglomérations françaises et une métropole turque*. Flux, (2), pp. 6–21.
- Reghezza-zitt, M. (2005), *La ville, un « territoire du risque » privilégié ? Quand la représentation est un facteur de vulnérabilité (City, a privileged « territory of hazard » ? When representation is a factor of vulnerability)*, Bulletin de l'Association de Géographes Français, vol. 82, n°1, pp. 106–115.
- Ruin, I. (2007), *Conduite à contre-courant. Les pratiques de mobilité dans le Gard: facteur de vulnérabilité aux crues rapides* (Doctoral dissertation, Université Joseph-Fourier-Grenoble I).
- Serre D. (2005), *Évaluation de la performance des digues de protection contre les inondations* [En ligne]. Thèse de doctorat, Université de Marne-la-Vallée, 366 p.
- Serre D. (2011), *La ville résiliente aux inondations, méthodes et outils d'évaluation*. HDR, Université Paris-Est, 173 p.
- Serre D., Barroca B. & Duchemin E. (2014), *City Resilience*, S.A.P.I.E.N.S Journal (Surveys And Perspectives Integrating Environment & Society), Co-Editors of this Special Issue. <https://journals.openedition.org/sapiens/1515>.
- Serre, D., Douvinet, J., Lhomme, S., Balsells, M., & Barroca, B. (2016), *Résilience des territoires. Articuler les méthodes et disciplines pour proposer des améliorations stratégiques*. In CIST2016-En quête de territoire (s)? (pp. 446–451).
- Sourisseau, J. M., Soullier, G., Corniaux, C., Toure, I., Bélières, J. F., Lorente, J. C., ... & Pato, S. (2020), *Vers une transhumance apaisée à la frontière entre le Togo et le Burkina Faso? Perspectives d'une approche territoriale et anticipatrice* (Doctoral dissertation, CIRAD, avenue Agropolis, 34398 Montpellier Cedex 5).
- Toubin, M. (2014), *Améliorer la résilience urbaine par un diagnostic collaboratif, l'exemple des services urbains parisiens face à l'inondation* [Université Paris-Diderot - Paris VII]. <https://tel.archivesouvertes.fr/tel-00958279/document>.
- Touili, N. (2022), *Les risques-réseaux: une matrice des défaillances des réseaux urbains interdépendants*. Belgeo. Revue belge de géographie.
- Wang, P., Guo, Y., Xu, Z., Wang, W., & Chen, D. (2023), *A novel approach of full state tendency measurement for complex systems based on information causality and Page Rank: A case study of a hydropower generation system*. Mechanical Systems and Signal Processing, 187, 109956.
- Yang, Z., Clemente, M. F., Laffrèchine, K., Heinzlef, C., Serre, D., & Barroca, B. (2022), *Resilience of Social-Infrastructural Systems: Functional Interdependencies Analysis*. Sustainability, 14(2), 606.
- Zhao, C., & Fang, D. (2018), *A Conceptual Model for Urban Interdependent Technical and Social Infrastructure Systems*. In Construction Research Congress 2018, pp. 722–731.

Reçu mai 12, 2023