

Une approche multirisque pour modéliser la résilience urbaine : Application à Beyrouth pour une reconstruction en mieux après l'explosion du port

A multirisk approach to modeling urban resilience: Applied to Beirut for building back better after the port explosion

VUILLET Marc
EIVP, Lab'URBA Univ Gustave Eiffel,
Univ Paris Est Creteil
Paris
marc.vuillet@civp-paris.fr

DER SARKISSIAN Rita
EIVP, Lab'URBA Univ Gustave Eiffel,
Univ Paris Est Creteil
Paris
rita.der-sarkissian@civp-paris.fr

DIAB Youssef
Univ Gustave Eiffel, Lab'URBA Univ,
EIVP, Paris Est Creteil
Paris
Youssef.diab@univ-eiffel.fr

ABDALLAH Chadi
National Council for Scientific Research,
Remote Sensing Center,
Beirut, Lebanon.
chadi@cnrs.edu.lb

Résumé — L'explosion du 4 août 2020 a remis sur le devant la scène les vulnérabilités de la ville de Beyrouth face à des risques d'ordres multiples : technologiques, naturels, ou encore liés aux contextes géopolitiques et économiques. Cet article présente les résultats du projet ANR-21-LIBA-0005 BUILDBACKBEIRUT qui vise à développer une approche multirisque de la résilience urbaine, avec une application spécifique à Beyrouth et ses réseaux techniques suite à l'explosion du port. L'objectif est de proposer une méthodologie intégrée favorisant une reconstruction urbaine améliorée, prenant en compte divers risques et assurant une résilience accrue. La méthodologie repose sur une approche englobant les risques sismiques, climatiques, liés aux conflits, crises socio-économiques et politiques. Des approches géospatiales et des indicateurs variés ont été utilisées pour déterminer les vulnérabilités et les interconnexions entre aléas et réseaux techniques critiques. L'étude intègre des consultations avec des responsables et des experts locaux. Les résultats montrent que l'approche est efficace pour obtenir une cartographie détaillée des vulnérabilités urbaines, identifiant les zones critiques et les infrastructures sensibles. Elle permet de déterminer les scénarios de risques les plus probables et d'évaluer l'impact cumulatif sur la résilience urbaine. Un travail de recherche spécifique au sujet émergent du Build Back Better permet d'alimenter des recommandations pour planifier une meilleure reconstruction des réseaux susceptible d'améliorer significativement la résilience urbaine face aux risques.

Mots-clefs — *Reduction des risques de catastrophes, Génie urbain, Réseaux techniques, Infrastructures critiques, Redressement*

Abstract — The explosion of August 4, 2020 brought to the forefront the vulnerabilities of the city of Beirut in the face of multiple risks: technological, natural, or even linked to geopolitical and economic contexts. This article presents the results of the ANR-21-LIBA-0005 BUILDBACKBEIRUT project which aims to develop a multi-risk approach to urban resilience, with a specific application to Beirut and its technical networks following the port explosion. The objective is to propose an integrated methodology promoting improved urban reconstruction, taking into account various risks and ensuring increased resilience. The methodology is based on an approach encompassing seismic, climatic, conflict-related risks, socio-economic and political crises. Geospatial approaches and various indicators were used to determine vulnerabilities and interconnections between hazards and critical technical networks. The study includes consultations with local officials and experts. The results show that the approach is effective in obtaining detailed mapping of urban vulnerabilities, identifying critical areas and sensitive infrastructure. It makes it possible to determine the most likely risk scenarios and assess the cumulative impact on urban resilience. Research work specific to the emerging subject of Build Back Better provides recommendations for planning better reconstruction of networks likely to significantly improve urban resilience in the face of risks.

Keywords — *Disaster risk reduction, Urban engineering, Technical networks, Critical Infrastructure, Recovery.*

I. INTRODUCTION

De nombreuses crises ont façonné l'histoire récente du Liban, la gestion et la résilience de ses infrastructures : les guerres de 1975-1990 et 2006, l'explosion du port en 2020, des risques naturels divers, etc. Récemment, des tensions financières ont conduit à l'une des pires crises économiques du Liban (Harake et al., 2020). L'effondrement de l'économie, la fragilité du système sociopolitique et la précarité du cadre institutionnel ont engendré la colère populaire et des manifestations historiques ont paralysé le pays et provoqué des impacts importants sur plusieurs secteurs (effets en cascade). Les services urbains et le fonctionnement de leurs infrastructures supports sont particulièrement menacés. Le pays doit faire face à de très fréquentes coupures d'électricité, tandis que le système de collecte et de traitement des déchets a commencé à s'effondrer, laissant des tonnes d'ordures s'entasser dans les rues en 2015 et 2016 (Abbas et al., 2019; Massoud et al., 2019).

Les conflits et les tensions ont ajouté une couche de complexité à la situation déjà précaire en matière de sécurité nationale, démographique, économique et environnementale. Le Liban connaît une dégradation continue de son environnement et de ses terres (E. Verdeil et al., 2016), principalement consécutive à la surpopulation, une urbanisation chaotique et une compétition pour les ressources. Le pays lutte toujours contre la propagation du covid-19 qui a aggravé la dégradation des capacités économiques du pays et révélé l'insuffisance du système de protection social libanais. Toutes ces crises ont handicapé la capacité d'adaptation du pays du point de vue social, technologique et économique, faisant du Liban un contexte vulnérable. Depuis 2011, le pays accueille la plus forte proportion de réfugiés par habitant au monde, en 2015, un habitant sur quatre était réfugié (Diab et al., 2020). Dans un pays déjà surpeuplé qui n'a pas signé la Convention de l'ONU de 1951 relative au statut des réfugiés, les vagues de déplacements ont fortement choqué le système libanais (Kelley, 2017).

Les multiples crises auxquelles le Liban est confronté sont encore plus aiguës dans sa capitale, Beyrouth, qui se remet de l'une des plus grandes explosions non nucléaires au monde (UNOCHA, 2020), les dégâts s'étendant sur 40 % de la ville. L'explosion a mis en évidence les défis chroniques dans les secteurs des infrastructures critiques (IC) de Beyrouth qui est marquée par une crise infrastructurelle de longue durée (É. Verdeil, 2013). A titre illustratif, l'alimentation électrique est souvent limitée à six heures par jour (Abi Ghanem, 2018). Concernant le réseau d'assainissement, les eaux usées s'infiltrant dans un sous-sol fortement karstique et entraînent de graves conséquences comme la pollution de l'eau de source qui alimente le reste de Beyrouth. Chaque année, lorsqu'il pleut, la capitale est paralysée, les routes sont inondées en raison d'un système d'égouts/drainage inadéquat. À tous ces problèmes s'ajoutent les inégalités socio-territoriales des services urbains (World Bank, 2009).

L'hypothèse centrale du projet ANR BUILDBACKBEIRUT1 est que les phases post-catastrophe des crises actuelles doivent être anticipées afin que des reconstructions plus efficaces et plus durables (Der Sarkissian, Diab, & Vuillet, 2023; Der Sarkissian et al., 2021; Fernandez & Ahmed, 2019) permettent d'améliorer la résilience urbaine (Cariolet et al., 2019) de Beyrouth. La première phase des travaux concerne la cartographie, la description des principes de fonctionnement, les caractérisations contextuelles des infrastructures critiques (IC) de la ville, ainsi que leurs expositions aux risques « naturels » ou humain, leurs problèmes socio-économiques, environnementaux et techniques. La seconde phase concerne l'analyse des dommages produits lors de l'explosion, les vulnérabilités des IC aux scénarios de défaillances multirisques intégrant notamment les vulnérabilités physiques, socio-économique et les interdépendances. Enfin une recherche bibliographique approfondie sur l'application du concept de build back better (BBB) aux infrastructures critiques permet de dresser quelques perspectives.

II. ZONE D'ETUDE ET METHODOLOGIE

A. Zone d'étude

Beyrouth est une agglomération de 1,8 million d'habitants qui se situe au centre géographique de la côte libanaise, sous la forme d'un cap s'étendant sur 9 km. On note trois zones surélevées dont la plus haute fait 95 mètres. Différentes phases d'expansion et de reconstruction ont fait de Beyrouth un ville éclectique dénuée d'un plan urbain stratégique approprié et formel susceptible de réguler son expansion verticale et horizontale (Mohsen et al 2020). Les villes et villages situés dans un rayon de 20 km autour de Beyrouth imposent une pression supplémentaire sur les infrastructures critiques existantes en matière d'électricité, d'eau, d'eaux usées et de transports. Le nombre total de déplacements journaliers vers la capitale équivaut au nombre de citoyens qui y résident (Rouhana & Jawad, 2020). Un nombre raisonnable d'établissements de santé et d'enseignement, ainsi que plusieurs équipes d'intervention sont situés à Beyrouth avec des capacités pour répondre à la majorité de la population itinérante et résidente : 5 centres de protection civile, 2 centres EMS LRC, 17 hôpitaux, 53 dispensaires, 3 centres de santé LRC, 170 écoles en plus de plusieurs universités.

B. Méthodologie de la première phase : cartographie, caractérisation des infrastructures critiques et des aléas

La méthodologie mise en œuvre pour la première phase (Der Sarkissian, Diab, & Abdallah, 2023a) est constituée des étapes suivantes:

- (1) Collecte de données : étude documentaire exhaustive pour collecter toutes les informations nécessaires sur les risques d'origines naturelles et humaines (tremblements de terre, glissements de terrain, inondations, tsunamis, incendies de forêt, émeutes, violences, conflits, risques sanitaires et NRBC) et sur les infrastructures et enjeux des réseaux qui peuvent

¹ <https://anr.fr/Project-ANR-21-LIBA-0005>

être menacés. Toutes les informations collectées ont été intégrées dans une base de données spatiales assemblée au format ArcGIS Geodatabase qui permet de générer toutes les cartes du projet.

- (2) Identifier les aléas et leurs facteurs déterminants : les événements historiques sont étudiés et analysés pour identifier la nature, l'emplacement, l'intensité et la probabilité des aléas majeurs prévalant à Beyrouth.
- (3) Comprendre le fonctionnement des réseaux et le rôle de chaque acteur
- (4) Identifier les problèmes existants
- (5) Évaluation de l'exposition des éléments : grâce à la modélisation géospatiale, cette troisième étape consistera à évaluer l'exposition afin d'identifier la population et les actifs susceptibles d'être à risque. Une analyse statistique est effectuée pour quantifier les expositions.

C. Méthodologie de la seconde phase : évaluation du risque et priorités d'action

La méthodologie mise en œuvre pour la seconde phase (Der Sarkissian, Diab, & Abdallah, 2023b) est constituée des étapes suivantes:

- (1) Identification et analyse des dommages. Cette étape consiste en un examen documentaire exhaustif, des réunions et enquêtes sur le terrain pour collecter toutes les informations nécessaires. Les données ont été collectées sur la base d'analyses de médias sociaux, de drones, de réunions, d'analyses d'images et d'analyses de mobilité, ainsi que de bases de données de réparation d'ONG (exemple, Acted, Arcenciel, AVSI, BebwShebbek, Beilbaraka, BHI, Caritas, DSC), Frontline, Khaddit Beirut, Lions, LiveLove, NationStation, PNUD, Redcross, etc.). Toutes les données collectées ont été transformées en base de données spatiales et assemblées au format ArcGIS Geodatabase.
- (2) Évaluation de la vulnérabilité des éléments. Cette étape consiste en une analyse de vulnérabilité pour déterminer la capacité (ou l'absence de capacité) des éléments à résister aux scénarios de danger donnés. Plusieurs types de vulnérabilité ont été révélés, tels que les vulnérabilités directes (techniques, structurelles et physiques), les vulnérabilités socio-économiques (tranche d'âge, pauvreté, etc.) et les vulnérabilités indirectes (interdépendances et criticités). Le manque de capacité d'adaptation a également été pris en compte.
- (3) Évaluation des risques et identification des priorités d'action. Le risque est évalué au cours de cette dernière étape comme une combinaison de tous les indicateurs révélés ci-dessus. Cette étape consiste à modéliser et cartographier la carte des risques de Beyrouth qui met en évidence les éléments et enjeux à risque avec différents niveaux de risques. Toutes les cartes sont préparées à l'aide de systèmes d'information géographique (SIG) basés sur des informations à échelle fine. Toutes les données sont fournies au format ESRI de géodatabase.

D. Méthodologie de la troisième phase : vers l'application du concept de Build Back Better (Der Sarkissian, Diab, & Vuillet, 2023; Der Sarkissian et al., 2024)

Cette phase s'est appuyée sur la réalisation d'un état de l'art du concept de BBB appliqué aux IC (Der Sarkissian, Diab, & Vuillet, 2023), un domaine de recherche relativement récent et en évolution rapide (Petticrew & Roberts, 2006). La démarche a été effectuée en quatre étapes principales : 1-Recherche, 2-Extrait, 3-Filtre et 4-Analyse. Une recherche dans la base de données a d'abord été effectuée à l'aide d'une requête dans le référentiel Scopus, choisi en fonction de ses performances en termes de précision et de couverture (Falagas et al., 2008). La requête a été développée de manière à capturer toutes les publications traitant du sujet du BBB appliqué aux IC avec tous les synonymes, types et sous-types d'IC : TITRE-ABS-KEY("build back better") OU TITRE-ABS-KEY("building retour mieux") ET TITRE-CLÉ-ABS(transport) OU TITRE-CLÉ-ABS(route) OU TITRE-CLÉ-ABS(port) OU TITRE-CLÉ-ABS(aéroport) OU TITRE-CLÉ-ABS(énergie) OU TITRE-CLÉ-ABS (électricité) OU TITRE-CLÉ-ABS (électricité) OU TITRE-CLÉ-ABS (eau) OU TITRE-CLÉ-ABS (égouts) OU TITRE-CLÉ-ABS (télécommunication) OU TITRE-CLÉ-ABS (fixe) OU TITRE-ABS-KEY(mobile) OU TITRE-ABS-KEY(internet) OU TITRE-ABS-KEY(grille) OU TITRE-ABS-KEY(resseau) OU TITRE-ABS-KEY(infrastructure) OU TITRE -ABS-KEY (bouée de sauvetage). Il est important de noter que tous les champs disciplinaires ont été inclus. Un examen visuel approfondi des 1 011 publications obtenues à partir de la recherche dans la base de données a ensuite été effectué pour extraire les articles cibles. La méthode de filtrage s'est concentrée sur les publications étudiant le BBB des IC et a éliminé celles qui mentionnent uniquement le terme tout en se concentrant sur d'autres aspects. Des tris sélectifs ont été faits sur les titres, les résumés et/ou conclusions non pertinent(e)s. Les travaux en double ont également été éliminés. Au final, 42 articles cibles ont été retenus pour étudier à la fois les fondements théoriques et les pratiques du concept du BBB appliqué aux IC. Plusieurs thèmes importants liés à la recherche du BBB appliqué aux IC ont été identifiés : émergences et tendances, définitions et débats conceptuels, aspects de mise en œuvre, cadres, lacunes importantes, questions sans réponse et perspectives pour les recherches futures.

III. RESULTATS : LE CAS DU RESEAU D'ASSAINISSEMENT

A. Cartographie, caractérisation des infrastructures critiques et des aléas

Le réseau d'assainissement de Beyrouth est constitué de collecteurs, de stations de pompage et de relevage (LS), de stations d'épuration (STEP) et d'émissaires vers la mer. Il s'agit principalement d'un système unitaire collectant à la fois les eaux usées et les eaux de pluie.

Le flux des eaux usées domestiques est étroitement lié à l'approvisionnement et à l'utilisation de l'eau potable. En raison de réseaux de production et de distribution inadéquats et irréguliers, les données précises concernant le volume d'eaux usées produites restent incertaines. Le débit moyen d'approvisionnement en eau, qui est d'environ 160 litres par habitant et par jour (l/c/j), est affecté par des sources d'eau supplémentaires provenant de puits privés et finit par se retrouver dans les égouts (Geara-Matta et al., 2010). Beyrouth possède cependant le taux de raccordement au réseau d'assainissement le plus élevé (98,3%) du Liban. Les bâtiments restants utilisent soit des puisards et des fosses septiques, soit rejettent simplement des eaux usées brutes directement dans l'environnement. On note la présence d'autoconstruction tels les camps palestiniens, créés à partir de 1948, équipés de réseaux dans les années 60 mais dont le système est aujourd'hui délabré. Plus précaire encore, les zones recueillant les migrants du Sud Liban, de la Bekaa et les réfugiés syriens. Certains se sont raccordés au réseau principal municipal, d'autres rejettent directement dans la mer.

En termes de gouvernance, divers ministères et institutions publiques sont engagés dans la gestion du secteur des eaux usées à Beyrouth, notamment le ministère de l'Énergie et de l'Eau (MoEW), le Conseil pour le développement et la reconstruction (CDR), l'Établissement des eaux de Beyrouth et du Mont-Liban (BMLWE) et les autorités municipales (Ministry of Environment/UNDP, 2011). Il existe un ensemble d'institutions publiques dont les autorités se chevauchent et se recoupent, également avec des acteurs privés et internationaux, dans la conception et la gestion du réseau d'eaux usées.

Le secteur des eaux usées au Liban souffre d'un sous-investissement persistant, d'une gouvernance et d'une structure institutionnelle faibles et d'un cadre tarifaire insuffisant (Der Sarkissian, Diab, & Abdallah, 2023a). La gestion du réseau d'égouts de Beyrouth est principalement assurée par la municipalité de la ville. Cependant, la municipalité est confrontée à des défis, car elle manque souvent d'expertise technique et de capacité financière par rapport aux autorités de l'eau, ainsi qu'un manque de coordination avec les ministères de tutelle et les prestataires de services. Actuellement, le système fonctionne de manière à ce que les eaux usées non traitées soient rejetées par plusieurs émissaires en mer, en particulier dans les zones du nord de Beyrouth (Der Sarkissian, Diab, & Abdallah, 2023a).

De plus, les ressources en eau souffrent de la pollution causée par le rejet d'eaux usées industrielles et domestiques non traitées ou insuffisamment traitées, les infiltrations de fosses septiques, les sources agricoles diffuses comme les pesticides et les nitrates, les déchets hospitaliers, les déchets solides domestiques et les rejets d'huile de moteur.

Concernant les inondations urbaines, en 2018, les habitants de la métropole de Beyrouth ont connu des inondations de rues sans précédent causées par des débordements d'égouts, rejetant des eaux usées non traitées directement dans les plans d'eau et les routes. Chaque saison des pluies entraîne des routes inondées, des voitures submergées et la fermeture prolongée de tunnels essentiels, y compris celui situé sous l'aéroport international. Ces épisodes récurrents résulteraient d'une combinaison de facteurs, notamment le vieillissement et la détérioration des infrastructures vieilles de 50 ans, la croissance démographique dans certaines zones, les réseaux d'égouts pluviaux interconnectés, l'expansion des surfaces imperméables et la récente crise économique et financière au Liban qui a entravé l'accès au crédit pour l'amélioration des infrastructures.

Les infrastructures et le réseau d'assainissement de Beyrouth sont exposés à plusieurs aléas. Le nombre d'enjeux exposés a été calculé pour chaque aléa et chaque réseau (Tableau 1). Ils ont ensuite été cartographiés en fonction du niveau de leur exposition aux différents aléas (Figure 1).

Tableau 1 Exposition des réseaux aux aléas (extrait pour l'exposition du réseau d'assainissement aux séismes)(Der Sarkissian, Diab, & Abdallah, 2023a)

		Très faible	Faible	Modéré	Haut	Très haut
Séisme	Evacuation vers la mer	0%	0%	0%	12.5%	0%
	Station de pompage/relevage	0%	0%	40%	30%	0%
	Réseau d'égouts (m)	8.13%	83.94%	3.75%	3.96%	0.36%

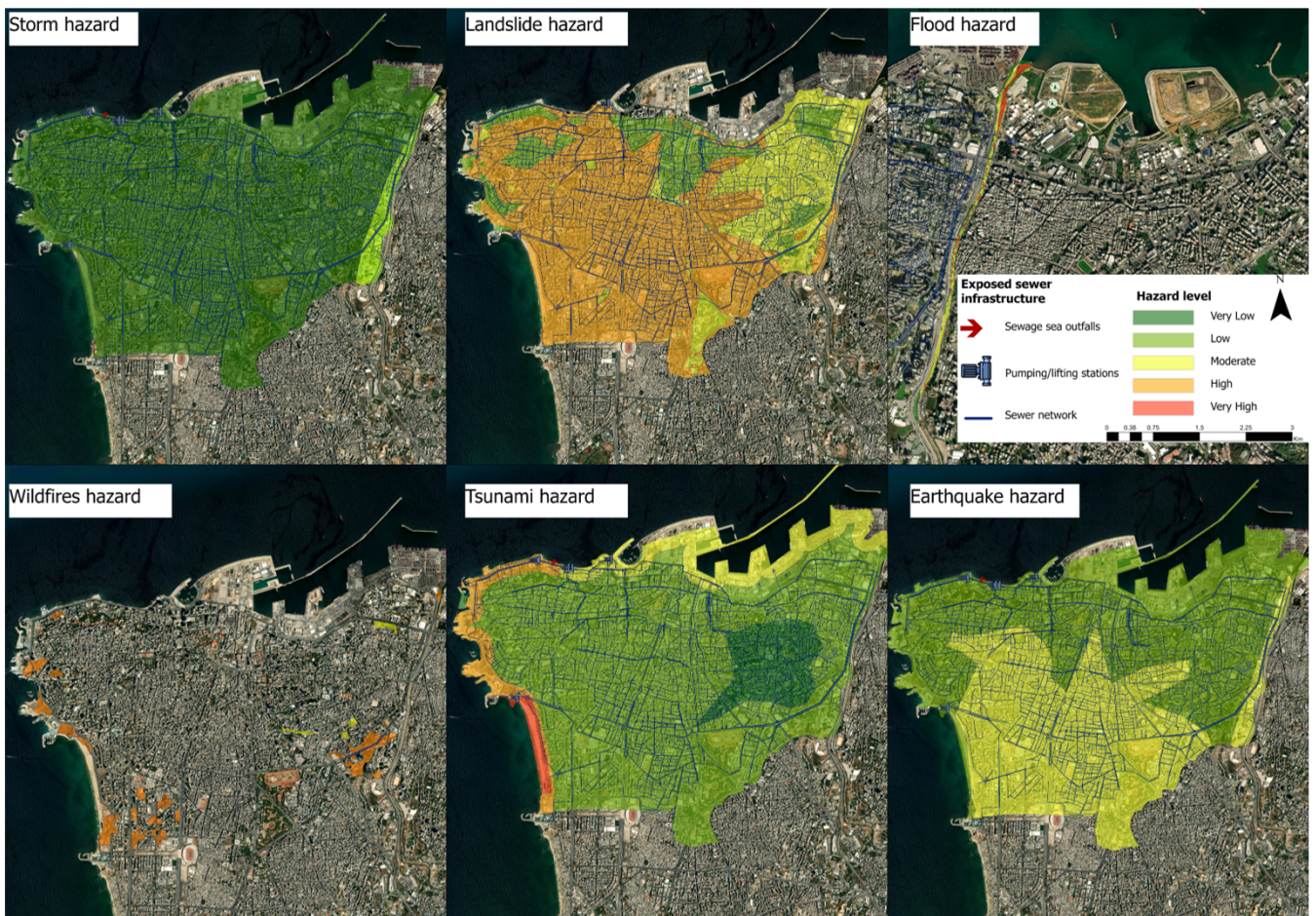


Figure 1 exposition du réseau d'assainissement (extrait, pour les aléas d'origine naturelle)(Der Sarkissian, Diab, & Abdallah, 2023a)

B. Evaluation du risque et priorités d'action

Améliorer les services des IC et renforcer les capacités locales de réduction des risques de catastrophe (RRC) au niveau de la plus petite unité administrative est une nécessité pour le Liban. Selon le Cadre national de réponse libanais (NRF) publié en 2012 sur la base de la décision numéro 103/2010 du Premier ministre, chaque réponse commence au niveau local et une intervention rapide est nécessaire. Les opérateurs des IC et les agents municipaux sont souvent en première ligne. La préparation est essentielle pour une réponse efficace et rapide, ainsi qu'une reconstruction en mieux. L'évaluation des risques est essentielle et constitue même le point de départ d'une préparation et d'un rétablissement efficaces. Les gouvernements locaux, les municipalités et les parties prenantes de l'IC doivent être conscients de tous les scénarios de risque potentiels.

L'objectif de cette tâche est de mieux identifier les zones prioritaires en évaluant les endroits où les services et les installations urbaines sont moins résilients aux aléas et dans quelle mesure des dommages peuvent survenir et provoquer des effets en cascade. Cette tâche ambitionne de fournir une évaluation complète et détaillée des risques pour les IC de Beyrouth. L'évaluation s'est déroulée en trois étapes : (1) évaluation des dommages consécutifs à l'explosion de 2020, où ont été révélées les vulnérabilités implicites qui ont refait surface lors des crises (indisponibilité des ressources, consommateurs illégaux, etc.), (2) évaluation de la vulnérabilité, où les critères de vulnérabilités directes et indirectes (interdépendances et aspects critiques), et (3) évaluation des risques, où les niveaux de risque sont évalués et les priorités d'action sont identifiées. Le résultat sera utilisé pour développer des solutions de BBB dans la tâche 3.

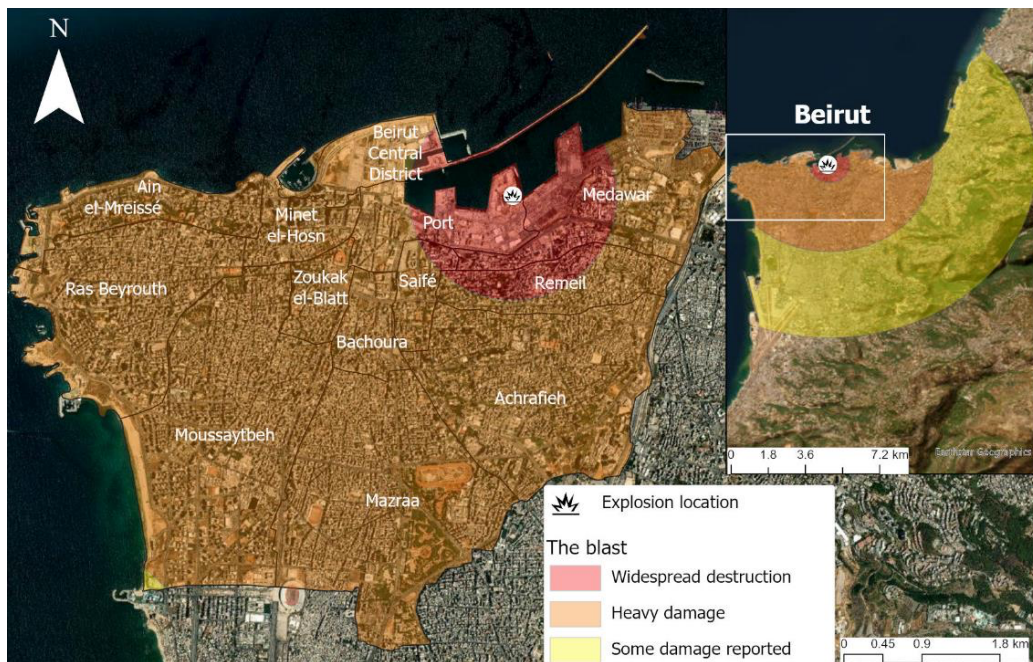


Figure 2 : localisation de l'explosion et des dommages recensés (Der Sarkissian, Diab, & Abdallah, 2023b)

Très peu de dégâts ont été enregistrés sur le réseau d'assainissement lors de l'explosion de 2020. Les stations de relevage des eaux usées des quartiers du Port et de la Solidère ont été endommagées mais sont restées opérationnelles. Environ 647 bâtiments ont vu leur réseau d'eau usée interne endommagé, par exemple, les tuyaux qui évacuent l'eau des toits vers le réseau d'eaux pluviales. En outre, 13 % des ménages interrogés par la croix rouge libanaise à Achrafieh, Karam el Zaytoun, Karantina, Badawi et Khandak al Ghameek ont déclaré disposer de toilettes dans des conditions inacceptables (Croix rouge libanaise, 09/08/2020). La principale cause de ces conditions était un matériel défectueux. Des fuites d'eaux noires ont également été enregistrées. La zone avec le plus grand nombre de toilettes en mauvais état est Mdaouar avec 29% de toilettes inutilisables. On remarque que d'autres réseaux ont été beaucoup plus durement touchés (Der Sarkissian, Diab, & Abdallah, 2023b), aussi d'autres événements ont également été considérés : arrivée des réfugiés de Syrie, crise économique ainsi que le COVID 19. On note que le secteur des eaux usées a également été durement touché par la crise économique. La crise a entraîné une baisse de la qualité du traitement des eaux usées, une augmentation des rejets d'eaux usées non traitées et une crise financière pour les stations d'épuration. La crise économique a entraîné une baisse de la qualité du traitement des eaux usées en raison d'un certain nombre de facteurs, notamment : 1) le manque de devises étrangères pour importer des produits chimiques destinés au traitement des eaux usées, 2) la détérioration des infrastructures et 3) le manque d'investissement dans nouvelles technologies. En conséquence, les eaux usées non traitées sont souvent déversées directement dans les rivières, les lacs et la mer Méditerranée, provoquant une pollution généralisée.

Les vulnérabilités directes impliquent des vulnérabilités physiques et structurelles. Sur la base des données disponibles les éléments suivants ont été considérés comme des catégories de vulnérabilités directes :

- *Degré de pertes et de dommages dus à l'impact de chaque aléa spécifique.* Sur la base d'une revue de la littérature, d'avis d'experts, d'une revue de données historiques la vulnérabilité physique/structurelle de chaque composante des IC a été déterminée (Tableau 2).

- *Vulnérabilités physiques/structurelles intrinsèques* (sur la base des données disponibles) : (a) Matériau des tuyaux ; Les réseaux qui datent des années 60 et 70 sont constitués de canalisations en fonte grise, en amiante-ciment (A/C) et de canalisations galvanisées. Les joints des tuyaux en fonte grise ne sont pas étanches et contribuent à des fuites élevées et les tuyaux galvanisés rouillent facilement dans des environnements agressifs. Les systèmes nouvellement construits, constitués de tuyaux en fonte ductile, en PVC et en polyéthylène, sont moins vulnérables. (b) Âge ; L'âge accentuera la corrosion et les dommages, notamment dans les canalisations en fonte. La corrosion affaiblit les tuyaux en diminuant l'épaisseur du matériau et en créant des concentrations de contraintes. Les tubes en acier vissés et filetés semblent se briser à un taux plus élevé que les autres types de tubes en acier. Certains tuyaux en fonte ont également connu des incidences plus élevées de défaillances dues à la corrosion. (c) Diamètres des tuyaux ; Les séismes passés montrent l'influence du diamètre sur le nombre de ruptures et de défaillances des canalisations. Les petits diamètres ont subi plus de dégâts que les grands (Zohra et al., 2012). Tous ces indicateurs de vulnérabilité ont été attribués aux composantes des IC dans le SIG et cartographiés .

Tableau 2 : Vulnérabilités physiques des composants des IC (extraits pour le réseau d'assainissement)(Der Sarkissian, Diab, & Abdallah, 2023b)

	Réseau d'assainissement		
	Stations de pompage/relevage	Conduites d'égouts	Emissaires en mer
Tempêtes	Modéré : Dommages aux pompes et à l'équipement dus aux chutes de débris et aux vents violents	Élevé : blocage des conduites d'égout et débordement des eaux usées	Faible : Dommages aux structures d'amarrage et potentiel de pollution près de la côte
Glissements de terrain/érosion	Modéré : Dommages aux fondations et aux structures	Élevé : blocage des conduites d'égout et débordement des eaux usées	Modéré : contamination potentielle par des débris et des sédiments
Inondations	Très élevé : Corrosion, dommages causés par les débris et les chutes d'arbres, ainsi que dommages électriques	Très élevé : Inondation des réseaux d'égouts et débordement des eaux usées	Faible : Potentiel de contamination par les eaux de crue et les eaux usées non traitées
Feux de forêts	Modéré : Dommages à l'équipement dus au feu et aux chutes de débris	Faible : tassement du sol et perturbation de la collecte des eaux usées	Très faible
Séismes	Modéré : Dommages aux fondations et aux structures dus aux secousses	Élevé : Rupture des conduites d'égout et débordement des eaux usées	Faible : Dommages potentiels aux structures d'amarrage et rejet d'eaux usées non traitées
Tsunamis	Très élevé : Dommages causés à l'équipement et à l'action des vagues, défaillance mécanique, corrosion, etc.	Élevé : Inondation et effondrement des réseaux d'égouts et débordement des eaux usées	Très élevé : effondrement, reflux des eaux usées vers les communautés côtières, contamination
Conflits	Élevé : dégâts causés par des explosions, des incendies et des sabotages	Modéré : attaques directes contre les infrastructures, sabotage	Très faible

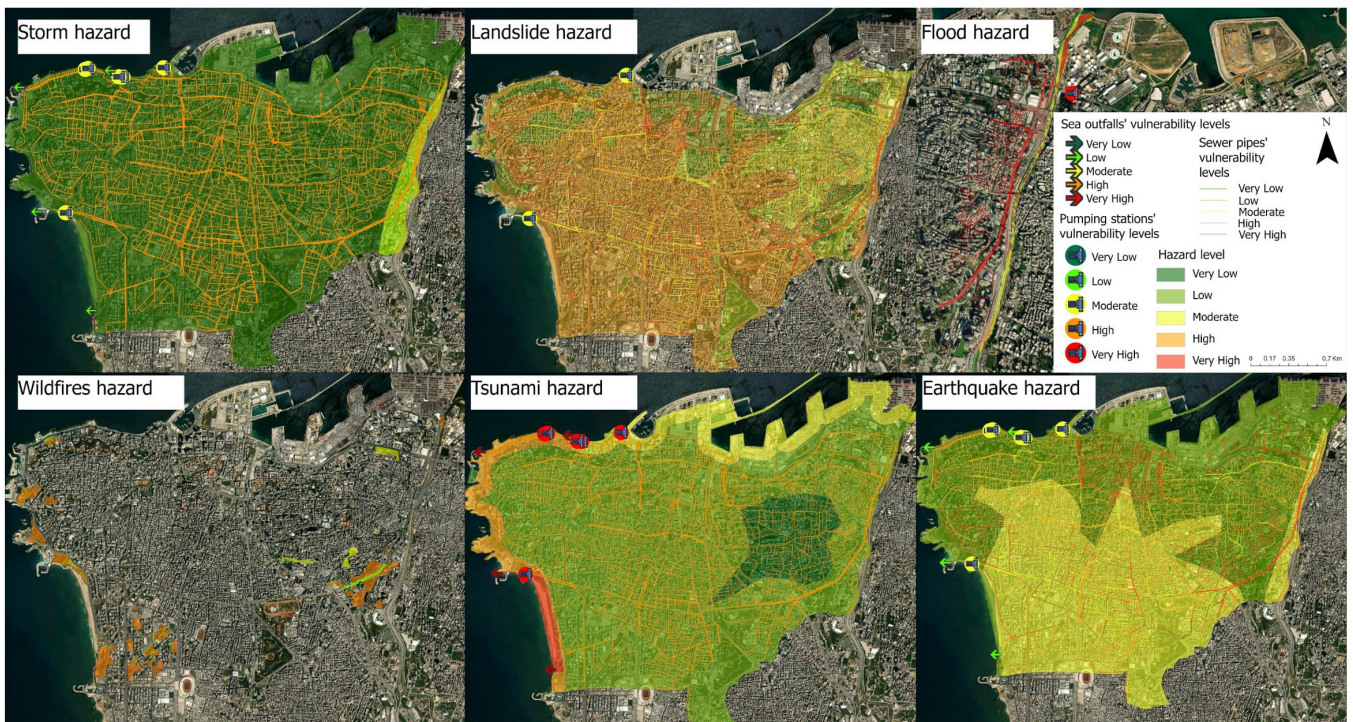


Figure 3 : Vulnérabilités directes du réseau d'assainissement (extrait pour les aléas naturels)(Der Sarkissian, Diab, & Abdallah, 2023b)

Des interdépendances inconnues conduisent souvent à des situations d'urgence qui dégénèrent dans des directions inattendues à travers des défaillances en cascade, retardant et entravant ainsi les efforts de sauvetage et de rétablissement et, dans certains cas, entraînant des décès et des pertes économiques supplémentaires. Les crises illustrent la forte imbrication des réseaux IC de Beyrouth, soulignant la centralité du réseau électrique. L'effondrement de ce dernier a des effets d'entraînement sur l'ensemble du système, déclenchant des conséquences systémiques sur tous les réseaux d'IC. La dépendance extrême du Liban à l'égard de l'énergie importée a des implications qui affectent tous les autres systèmes qui en dépendent (Daher et al., 2022). Afin de proposer des solutions BBB qui améliorent la résilience des infrastructures de Beyrouth, il est important de mieux comprendre ces interdépendances et leurs effets en cascade.

Sur la base d'une revue de la littérature, d'opinions d'experts, d'une collecte de données historiques, d'archives de journaux, etc., les interdépendances et les criticités de chaque composant des IC ont été déterminées (Tableau 3). Un composant est considéré comme plus critique si sa défaillance entraîne des conséquences négatives importantes sur le réseau et sur d'autres réseaux ou sur un spectre plus large de la ville, et par conséquent sur un plus grand nombre d'utilisateurs. La première catégorie

de criticité a été déterminée à partir de l'analyse d'interdépendances. Si on prend pour exemple le cas du réseau d'assainissement, ont été pris en compte : (a) le débit maximum de la station de pompage des eaux usées, sachant que les dommages causés à une pompe un débit plus élevé sont plus critiques pour le réseau d'égouts en raison de son impact sur la gestion de la capacité globale, des débordements et des refoulements du système., (b) Le diamètres des conduites d'eaux usées ; les dommages causés à une canalisation d'égout de plus grand diamètre sont plus critiques dans le réseau d'égouts en raison de leur impact sur la capacité des eaux usées., (c) Longueur des conduites d'eaux usées ; les dommages causés à une canalisation d'égout de plus grande longueur sont plus critiques dans le réseau d'égouts en raison de leur impact sur la distance de transport des eaux usées.,

Tableau 3 Interdépendances des composants des réseaux critiques (extrait pour le réseau d'assainissement)(Der Sarkissian, Diab, & Abdallah, 2023b)

Composants des réseaux	Réseau électrique				Réseau d'adduction d'eau				Réseau d'assainissement			Niveau de dépendance (→)	
	Câbles haute tension	Câbles moyenne tension	Câbles basse tension	Sous-stations	Tuyaux	Réservoirs	Pompes	Puits Privés	Pompes/ Stations de relevage	Conduites d'égouts	Emissaires en mer		
Réseau d'assainissement	Pompes/ Stations de relevage	Les dysfonctionnements des câbles HT peuvent avoir un impact significatif sur le fonctionnement des pompes à eaux usées, conduisant potentiellement à des dysfonctionnements du système d'eaux usées.	Les dysfonctionnements des câbles MT peuvent entraîner des dysfonctionnements dans les stations de pompage	Les dysfonctionnements des câbles BT peuvent avoir un impact direct et significatif sur le fonctionnement des pompes à eaux usées, entraînant potentiellement une pollution de l'eau et des problèmes de santé publique.	Si les pompes à eaux usées ne nécessitent pas directement de sous-stations HT-MT pour fonctionner, elles dépendent de l'électricité MT qui les traverse pour fonctionner correctement.	Une panne d'alimentation en eau pourrait entraîner une diminution de la production d'eaux usées, ce qui pourrait avoir un impact sur l'efficacité des usines de traitement des eaux usées.	Il est peu probable que les dommages causés aux réservoirs aient un impact sur les conduites d'égout.	Une panne d'alimentation en eau pourrait entraîner une diminution de la production d'eaux usées, ce qui pourrait avoir un impact sur l'efficacité des usines de traitement des eaux usées.	Il est peu probable que les dommages causés aux puits privés aient un impact sur les pompes à eaux usées.		Les dysfonctionnements des canalisations d'égout, telles que des blocages ou des ruptures de canalisations, peuvent avoir un impact significatif sur le fonctionnement des systèmes de pompage des eaux usées, entraînant potentiellement des débordements d'eaux usées et des problèmes environnementaux et de santé publique associés.	Les pompes à eaux usées peuvent fonctionner sans émissaires d'égouts dans certains cas, par exemple lorsque les eaux usées sont traitées et réutilisées ou lorsqu'elles sont stockées temporairement.	28 Haut
	Conduites d'égouts	Il est peu probable que les dysfonctionnements des câbles HT causent des problèmes directs aux conduites d'égouts.	Il est peu probable que les dysfonctionnements des câbles MT causent des problèmes directs aux conduites d'égout.	Il est peu probable que les dysfonctionnements des câbles BT causent des problèmes directs aux conduites d'égout.	Il est peu probable que les dysfonctionnements dans les sous-stations causent des problèmes directs aux conduites d'égout.	Les dysfonctionnements des conduites d'alimentation en eau n'affecteraient pas directement le fonctionnement des conduites d'égout.	Il est peu probable que les dommages causés aux réservoirs aient un impact sur les conduites d'égout.	Les dysfonctionnements des pompes d'alimentation en eau n'affecteraient pas directement le fonctionnement des conduites d'égout.	Il est peu probable que les dommages causés aux puits privés aient un impact sur les conduites d'égout.	Les dysfonctionnements des pompes à eaux usées, telles que des pannes de courant ou des pannes mécaniques, peuvent entraîner des débordements et des refoulements d'eaux usées, posant potentiellement des risques pour l'environnement et la santé publique.	Sans un émissaire en mer fonctionnel, les eaux usées s'accumuleraient dans les conduites d'égout, entraînant potentiellement des débordements et des refoulements. Cela pourrait entraîner le déversement des eaux usées dans les rues, contaminer les eaux souterraines et présenter de graves risques pour la santé publique.	20 Faible	
	Emissaires en mer	Il est peu probable que les dysfonctionnements des câbles HT causent des problèmes directs aux émissaires marins. Il est peu probable que les dysfonctionnements des câbles HT causent des problèmes directs aux émissaires marins.	Il est peu probable que les dysfonctionnements des câbles MT causent des problèmes directs aux émissaires en mer.	Il est peu probable que les dysfonctionnements des câbles BT causent des problèmes directs aux émissaires en mer.	Il est peu probable que les dysfonctionnements des sous-stations causent des problèmes directs aux émissaires en mer.	Les dysfonctionnements des canalisations d'alimentation en eau n'affecteraient pas directement le fonctionnement des émissaires en mer.	Il est peu probable que les dommages causés aux réservoirs aient un impact sur les émissaires marins.	Les dysfonctionnements des pompes d'alimentation en eau n'affecteraient pas directement le fonctionnement des émissaires en mer.	Il est peu probable que les dommages causés aux puits privés aient un impact sur les émissaires marins.	Les pompes à eaux usées sont essentielles pour acheminer les eaux usées traitées des stations d'épuration vers les émissaires des égouts marins pour les rejeter dans les plans d'eau. Sans pompes à eaux usées, les émissaires d'égouts en mer ne pourraient pas fonctionner.	Les émissaires d'égouts marins dépendent des conduites d'égout pour collecter les eaux usées et les transporter vers les usines de traitement pour un traitement approprié. Sans conduites d'égout, les émissaires d'égouts en mer ne pourraient pas fonctionner.	8 Très faible	

D'autres dimensions ont pu être intégrées, telle que les vulnérabilités socioéconomiques, la capacité à faire face (coping capacity) et des modélisations et cartographies multirisques des IC. Concernant les vulnérabilités socioéconomiques, la fourniture de services, y compris l'électricité et le niveau d'accès aux infrastructures critiques ne sont pas homogènes dans la ville. Les vulnérabilités socio-économiques peuvent influencer considérablement les vulnérabilités des infrastructures critiques. L'interaction entre les facteurs socio-économiques et les vulnérabilités des infrastructures se produit à travers divers mécanismes : (1) l'allocation des ressources, selon les conditions socio-économiques, pour le développement et l'entretien des infrastructures. (2) La négligence des infrastructures (investissement, maintenance et entretien) : dans les zones aux ressources limitées ou dans lesquelles le gouvernement ne peut ou ne veut investir dans les infrastructures; (3) L'accès et l'accessibilité financière, dans le cas où les infrastructures critiques sont utilisées illégalement. (4) La faible gouvernance : une mauvaise gouvernance peut conduire à la corruption, à une mauvaise gestion et à un manque de responsabilité dans la gestion des infrastructures critiques. (5). La densité et répartition de la population, une demande accrue peut conduire à une surutilisation et à une dégradation plus rapide des composants de l'infrastructure. (6) L'aménagement du territoire : dans les zones aux ressources

économiques limitées, la planification urbaine peut être inadéquate, ce qui conduit au développement d'infrastructures dans des endroits vulnérables tels que les zones sujettes aux inondations ou aux flancs de collines sujets aux glissements de terrain. (7) Une préparation limitée : les facteurs socio-économiques peuvent également affecter la capacité d'une communauté à se préparer et à réagir aux perturbations des infrastructures essentielles. (8) La résilience communautaire : les facteurs socio-économiques peuvent également influencer la résilience d'une communauté aux perturbations des infrastructures essentielles. Les communautés dotées de réseaux sociaux solides, d'organisations d'entraide et d'un sentiment de cohésion communautaire pourraient être plus à même de se remettre des perturbations et de fournir un soutien à ceux qui en ont besoin (Leroy et al., 2016).

Les capacités d'adaptation (coping capacities) font référence à la capacité d'anticiper, de réagir, de faire face et de se remettre des impacts des aléas. Les capacités d'adaptation interagissent avec les vulnérabilités des infrastructures de plusieurs manières. (1) Réduire l'impact des perturbations sur les infrastructures critiques en fournissant des sources alternatives de services essentiels, (ex générateurs de secours, réservoirs d'eau,...). (2) Reprise plus rapide, par exemple, les communautés dotées de réseaux sociaux solides et d'organisations d'entraide peuvent être en mesure de donner de leur temps et de leurs ressources pour aider à réparer les infrastructures endommagées. (3) Résilience accrue, les communautés qui investissent dans les sources d'énergie renouvelables et les technologies économes en énergie peuvent être moins dépendantes d'un réseau centralisé et mieux à même de faire face aux pannes de courant. D'autres paramètres sont pris en compte, tels que (4) la dépendance réduite à l'égard de l'aide extérieure ou encore (5) l'amélioration de la préparation et de la réponse. Ces éléments sont caractérisés et cartographiés dans les rapports du projet ANR Build Back Beirut (Der Sarkissian, Diab, & Abdallah, 2023b).

La modélisation et la cartographie des risques multiples basées sur SIG fournissent une vue complète des risques de catastrophe, intégrant les dangers, l'exposition, la vulnérabilité et la capacité d'adaptation. Les cartes de risques servent d'outils d'aide à la décision pour prioriser les interventions, la planification des interventions d'urgence, les décisions d'utilisation des terres et les initiatives de sensibilisation du public. Les cartes de risques multirisques pour chaque réseau CI, la carte des risques cumulés et la carte multirisques urbaine offrent des informations précieuses aux opérateurs, aux décideurs politiques et à la communauté pour travailler en collaboration vers un avenir résilient et durable pour Beyrouth. La matrice des risques et le classement des secteurs dérivés des éléments de preuve présentés dans les cartes permettent une approche stratégique pour hiérarchiser les risques, en se concentrant sur les domaines et les composants qui nécessitent une attention prioritaire. Ainsi le réseau électrique est identifié comme le moins résilient et la priorisation de secteurs soulignent l'urgence d'interventions ciblées dans ces zones. Les résultats devraient guider les futures décisions politiques, les stratégies d'investissement et les efforts de collaboration visant à garantir le bien-être et la sécurité des habitants de Beyrouth face à l'évolution des risques.

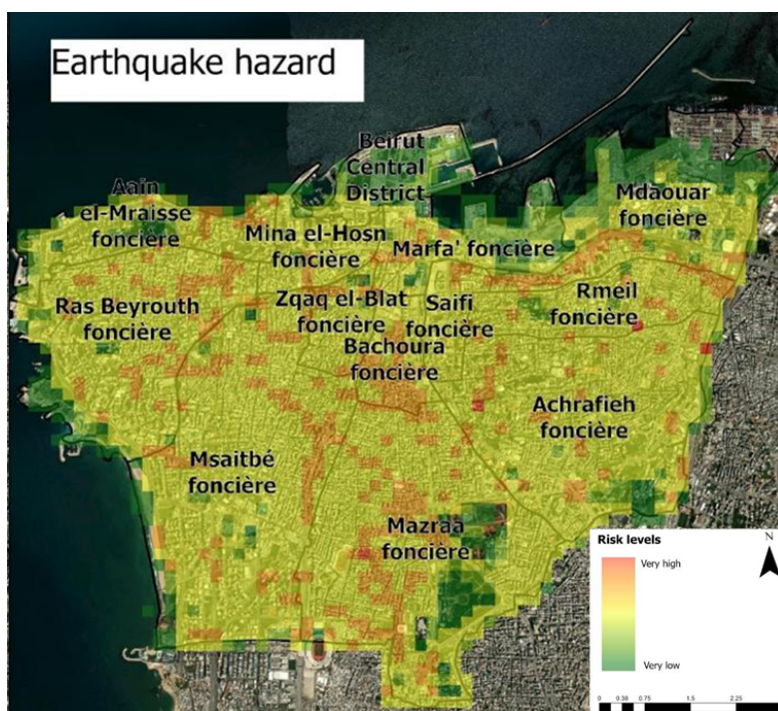


Figure 4 : spatialisations des niveaux de risques des réseaux techniques de Beyrouth face aux séismes.

C. Vers l'application du concept de Build Back Better (Der Sarkissian, Diab, & Vuillet, 2023; Der Sarkissian et al., 2024)

Depuis son essor en 2006, le concept Build-Back-Better (BBB) (UNISDR, 2017) a pris une importance croissante dans la recherche sur la réduction des risques de catastrophe (RRC). Le concept du BBB est jusque-là largement axé sur le logement, les infrastructures critiques (CI) BBB ont reçu moins d'attention et sont toujours considérées comme un sujet émergent.

L'accumulation de connaissances sur le concept et sur la manière de guider son application apparaît encore relativement limitée. Aussi ce travail commence par un état de l'art large et structuré du concept du BBB appliqué aux IC. L'examen des recherches existantes a révélé des tendances, des définitions conceptuelles, des aspects de mise en œuvre, des cadres, des lacunes importantes, des questions sans réponse et des perspectives pour des recherches futures, reliant à la fois la théorie et la pratique du BBB appliqué aux IC. L'examen des 42 études retenues a dévoilé plusieurs thèmes théoriques et opérationnels du concept. Les premiers résultats (Der Sarkissian, Diab, & Vuillet, 2023) indiquent que la recherche sur le BBB appliqué aux IC a suivi une approche réactive plutôt que proactive et qu'il manque une approche multirisques pour l'application du BBB aux IC. Il est remarquable que les sciences sociales et environnementales couvrent davantage la recherche concernant l'application du BBB aux IC que les sciences de l'ingénieur (respectivement 27 et 22% contre 18%). Les efforts de recherche actuels devraient être complétés par des recherches plus approfondies du point de vue des domaines liés à ingénierie.

L'examen mené à ce jour sur la recherche BBB IC a révélé trois dimensions théoriques principales. De nombreux auteurs perçoivent le BBB appliqué aux IC sous l'angle de la réduction des risques de catastrophes et de la résilience, tandis que certains considèrent le concept comme une opportunité d'atteindre la durabilité environnementale et lutter contre le changement climatique, enfin d'autres le perçoivent comme étant principalement axé sur les bénéfices aux populations. Bien que des définitions plus claires du BBB appliqué aux IC soient nécessaires pour dissiper la confusion parmi les praticiens et les décideurs, une définition unique et isolée du concept n'est pas nécessaire. Plusieurs auteurs estiment que le BBB appliqué aux IC constitue davantage une approche holistique et interdisciplinaire qui relie les trois dimensions évoquées ci-dessus. Des recherches plus approfondies sur les principes fondamentaux derrière chaque dimension théorique ont montré que le BBB appliqué aux IC va au-delà d'une question de connaissances spécialisées ou de progrès technologique, il s'agit d'un processus d'apprentissage sans fin visant à améliorer simultanément les conditions physiques, économiques, environnementales et sociales. Les solutions du BBB appliqué aux IC doivent être comprises d'un point de vue systémique et évolutif, façonné par les politiques, les technologies et les marchés (Ko et al., 2019). La revue a mis en évidence l'urgence de mieux développer certains angles et a proposé de nouveaux domaines d'intérêt en recherche qui méritent d'être explorés davantage. Par exemple les études BBB appliquées aux IC n'ont pratiquement été menées que pour des pays « développés », la plupart étaient qualitatives plus que quantitatives, l'absence d'approches multirisque. Des débats existent autour du terme « meilleure » IC, jugé vague et ayant plusieurs interprétations : meilleur pour quoi et pour qui et comment y parvenir. Bien qu'il existe des principes et des lignes directrices générales du BBB, il manque un ensemble d'indicateurs largement acceptés et définis pour évaluer la mise en œuvre du BBB appliqué aux IC.

Dans le cas de Beyrouth, l'étude de l'état de l'art mentionné ci-dessus a permis de proposer comme indicateur des améliorations au regard : i) de l'exposition des réseaux aux aléas, ii) du contexte socio-économique (infrastructures vieillissantes, accessibilité, prix, services, etc.) et iii) des questions environnementales (énergies renouvelables, pollution, etc.). La survenance des crises actuelles a été révélatrice d'autres dysfonctionnements, conduisant à davantage d'indicateurs. L'explosion du port de Beyrouth a offert un véritable scénario du pire avec des observations sur place et des faits validés à la fois pendant la continuité d'activité des IC et pendant la phase de récupération faisant apparaître l'opportunité de considérer les indicateurs suivants: i) la robustesse et ii) les interdépendances traduites par les défaillances des réseaux. La robustesse est une dimension importante car elle dénote la capacité à faire face aux dommages causés par un événement désastreux sans perdre de fonctionnalités (Blockley et al., 2012; Liao et al., 2018). L'étude de l'après-crise révèle les indicateurs suivants : i) interdépendances des IC en période de reprise, ii) ingéniosité/vitesse de récupération, et iii) situation socio-économique/inégalités. Les modèles de récupération ont révélé des écarts en termes de temps et de lieu de restauration, dictés par les inégalités socio-économiques. La vitesse de récupération implique la capacité technique et organisationnelle de rétablir le service d'un réseau dans les plus brefs délais et son retour à des modes pleinement opérationnels (Dabaj et al., 2022; Der Sarkissian et al., 2022; Liao et al., 2018). La vitesse de rétablissement peut s'expliquer par l'ingéniosité, c'est-à-dire « la disponibilité de divers types de ressources humaines, financières et infrastructurelles pendant les étapes de planification, d'absorption et de rétablissement » (Alizadeh & Sharifi, 2020). Les applications aux différents réseaux mentionnés étant en cours lors de la rédaction de ce papier, elles pourront faire l'objet de communications ultérieures.

IV. CONCLUSION

Nous avons présenté dans cette communication les résultats partiels du projet ANR-21-LIBA-0005 BUILDBACKBEIRUT en cours de finalisation consacré au développement d'une approche novatrice multirisque de la résilience urbaine, intégrant l'étude de l'exposition, des vulnérabilités directes et indirectes ainsi que la reconstruction en mieux des infrastructures réseau de la ville de Beyrouth. La démarche aborde la grande majorité des risques identifiés sur le territoire Beyrouthin : risques sismiques, inondations, tempêtes, tsunamis, risques liés aux conflits, crises socio-économiques et politiques. L'utilisation d'approches géospatiales et de construction d'indicateurs spécifiques ont été utilisées pour déterminer les vulnérabilités et les interconnexions entre aléas et réseaux techniques critiques. L'étude intègre un retour des consultations des bases de données existantes, des rapports officiels et des entretiens conséquents avec des responsables et des experts locaux. Elle intègre aussi des retours d'expérience sur les événements impactant récents tels que l'explosion du 4 août 2020 ou la crise des réfugiés Syriens. Les résultats apportent de nouveaux éléments mesurables et cartographiés des vulnérabilités, des zones d'expositions, et des facteurs de résilience permettant de déterminer les scénarios de risques les plus critiques et leurs effets sur la résilience urbaine. Les résultats obtenus alimentent des recommandations pour planifier une meilleure reconstruction des réseaux (Build Back Better), d'un point de vue théorique et pratique. La suite des recherches, en cours, concerne l'application d'indicateurs de build back better aux réseaux techniques Beyrouthin.

REMERCIEMENTS

Les auteurs de l'articles souhaitent remercier l'Agence Nationale pour la Recherche pour le financement du projet ANR-21-LIBA-0005 BUILDBACKBEIRUT

REFERENCES

- 1
- 2
- Abbas, I., Chaaban, J., Al-Rabaa, A.-R., & Shaar, A. (2019). *Solid Waste Management in Lebanon : Challenges and Recommendations JEW Solid Waste Management in Lebanon: Challenges and Recommendations*. 4(2), 053-063.
- Abi Ghanem, D. (2018). Energy, the city and everyday life : Living with power outages in post-war Lebanon. *Energy Research & Social Science*, 36, 36-43. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.11.012>
- Alizadeh, H., & Sharifi, A. (2020). Assessing Resilience of Urban Critical Infrastructure Networks : A Case Study of Ahvaz, Iran. *Sustainability*, 12(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/su12093691>
- Blockley, D., Agarwal, J., & Godfrey, P. (2012). Infrastructure resilience for high-impact low-chance risks. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering*, 165(6), 13-19. <https://doi.org/10.1680/cien.11.00046>
- Cariolet, J.-M., Vuillet, M., & Diab, Y. (2019). Mapping urban resilience to disasters – A review. *Sustainable Cities and Society*, 51, 101746. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101746>
- Dabaj, A., Vuillet, M., Gache, F., Jouannic, G., & Diab, Y. (2022). Examining the benefits of the build back better concept for Parisian critical infrastructures vulnerable to flooding : From build back better to build better before. *Water Security*, 17, 100123. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2022.100123>
- Daher, B., Hamie, S., Pappas, K., & Roth, J. (2022). Examining Lebanon's Resilience Through a Water-Energy-Food Nexus Lens. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.748343>
- Der Sarkissian, R., Cariolet, J.-M., Diab, Y., & Vuillet, M. (2022). Investigating the importance of critical infrastructures' interdependencies during recovery; lessons from Hurricane Irma in Saint-Martin's Island. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 67, 102675. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102675>
- Der Sarkissian, R., Dabaj, A., Diab, Y., & Vuillet, M. (2021). Evaluating the Implementation of the « Build-Back-Better » Concept for Critical Infrastructure Systems: Lessons from Saint-Martin's Island Following Hurricane Irma. *Sustainability*, 13, 3133. <https://doi.org/10.3390/su13063133>
- Der Sarkissian, R., Diab, Y., & Abdallah, C. (2023a). *Task 1. Assessment of Beirut CI before the crises: Establishing the state of the art of Beirut CIs (electricity, drinking water, wastewater and transport)*. (p. 91) [Projet ANR ANR-21-LIBA-0005 BUILDBACKBEIRUT].
- Der Sarkissian, R., Diab, Y., & Abdallah, C. (2023b). *Task 2. Beirut CI Risk Assessment*. (p. 62) [Projet ANR ANR-21-LIBA-0005 BUILDBACKBEIRUT].
- Der Sarkissian, R., Diab, Y., & Vuillet, M. (2023). The "Build-Back-Better" concept for reconstruction of critical Infrastructure: A review. *Safety Science*, 157, 105932. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105932>
- Der Sarkissian, R., Vuillet, M., Diab, Y., & Abdallah, C. (2024). *Task 3. Planning Build Back Better CI projects: Proposing "reconstruction" solutions (engineering/physical/technical and organizational) for the specific context of Beirut's CI based on the principles of Build Back Better*. (p. 49) [Projet ANR ANR-21-LIBA-0005 BUILDBACKBEIRUT].
- Diab, Y., El Shaarawy, B., & Yousri, S. (2020). *Informal settlements in the Arab Region. Towards Arab cities without informal areas (UnHABITAT For a better future IsDB, p. 106)*.
- Falagas, M. E., Pitsouni, E. I., Malietzis, G. A., & Pappas, G. (2008). *Comparison of PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar : Strengths and weaknesses*. <https://doi.org/10.1096/fj.07-9492LSF>
- Fernandez, G., & Ahmed, I. (2019). "Build back better" approach to disaster recovery : Research trends since 2006. *Progress in Disaster Science*, 1, 100003. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2019.100003>
- Geara-Matta, D., Moilleron, R., El Samrani, A., Lorgeoux, C., & Chebbo, G. (2010). State of Art about water uses and wastewater management in Lebanon. *World Wide Workshop for Young Environmental Scientists: 2010 proceedings*.
- Harake, W., Ibrahim, J., & Abou Hamde, N. (2020). *Lebanon Economic Monitor, Fall 2020*. World Bank. <https://doi.org/10.1596/34842>
- Kelley, N. (2017). Responding to a Refugee Influx : Lessons from Lebanon. *Journal on Migration and Human Security*, 5, 82-104. <https://doi.org/10.14240/jmhs.v5i1.75>
- Ko, Y., Barrett, B. F. D., Copping, A. E., Sharifi, A., Yarime, M., & Wang, X. (2019). Energy Transitions Towards Low Carbon Resilience : Evaluation of Disaster-Triggered Local and Regional Cases. *Sustainability*, 11(23), Article 23. <https://doi.org/10.3390/su11236801>
- Leroy, J., Amdal, J., Vuillet, M., Cariolet, J.-M., Diab, Y., & Becue, V. (2016). Vulnerability and social resilience : Comparison of two neighborhoods in New Orleans after Hurricane Katrina. *E3S Web of Conferences*, 7, 08002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160708002>
- Liao, T.-Y., Hu, T.-Y., & Ko, Y.-N. (2018). A resilience optimization model for transportation networks under disasters. *Natural Hazards*, 93(1), 469-489. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3310-3>
- Massoud, M. A., Mokbel, M., Alawieh, S., & Yassin, N. (2019). Towards improved governance for sustainable solid waste management in Lebanon: Centralised vs decentralised approaches. *Waste Management & Research*, 37(7), 686-697. <https://doi.org/10.1177/0734242X19836705>
- Ministry of Environment/UNDP. (2011). *CLIMATE CHANGE VULNERABILITY AND ADAPTATION HUMAN SETTLEMENTS AND INFRASTRUCTURE Lebanon's Second National Communication* (p. 31).
- Petticrew, M., & Roberts, H. (2006). *Systematic Reviews in the Social Sciences : A Practical Guide, 2008*. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470754887.biblio>
- Rouhana, F., & Jawad, D. (2020). Transportation network resilience against failures : GIS-based assessment of network topology role. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*, 12(4), 357-370. <https://doi.org/10.1108/IJDRBE-06-2020-0064>

- UNISDR. (2017). *Words into Action guidelines : Build back better in recovery, rehabilitation and reconstruction (Consultative version)* | *UNDRR* (p. 46). United Nations Office for Disaster Risk Reduction. <http://www.undrr.org/publication/words-action-guidelines-build-back-better-recovery-rehabilitation-and-reconstruction>
- UNOCHA. (2020). *Flash appeal—Lebanon*. United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (OCHA). [file:///C:/Users/marc.vuillet/Downloads/Lebanon%202020%20Flash%20Appeal%20\(August\).pdf](file:///C:/Users/marc.vuillet/Downloads/Lebanon%202020%20Flash%20Appeal%20(August).pdf)
- Verdeil, É. (2013). Les services urbains à Beyrouth : Entre crise infrastructurelle et réformes contestées. *Géosphères, Annales de Géographie de l'Université Saint-Joseph*, 33-34, 35.
- Verdeil, E., Faour, G., & Hamzé, M. (2016). *Atlas du Liban Les nouveaux défis* (Presse de l'IFPO). CNRS Liban.
- World Bank. (2009). *Lebanon Social Impact Analysis—Electricity and Water Sectors* [World Bank Report].
- Zohra, H. F., Mahmouda, B., & Luc, D. (2012). Vulnerability assessment of water supply network. *Energy Procedia*, 18, 772-783. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.05.093>