

La résilience des infrastructures urbaines face aux défis du changement climatique

Charles Konan Houssou

Biographie

Ingénieur et doctorant en génie civil, Charles Konan Houssou est un expert reconnu en diagnostic de structures et en ingénierie de la résilience. Fort de son expérience internationale et membre de l'Ordre mondial des experts internationaux (OMEI), il se spécialise dans l'adaptation des infrastructures face aux chocs climatiques.

Résumé

Face à l'accélération du changement climatique, les infrastructures urbaines, socles de l'économie mondiale, sont soumises à une vulnérabilité croissante. Cet article de *Regards d'experts* pose un diagnostic rigoureux des menaces, allant des inondations aux vagues de chaleur, en reliant la dégradation des ouvrages à la contribution du génie civil aux émissions de carbone. L'analyse met en lumière l'impératif d'une double stratégie : l'atténuation, par l'innovation

dans les matériaux bas-carbone (BBC¹), et l'adaptation, via l'ingénierie intégrée. Nous démontrons l'efficacité des solutions technico-scientifiques, notamment les infrastructures vertes et bleues et les jumeaux numériques, en nous appuyant sur des études de cas internationaux. Enfin, l'expert formule des recommandations sur les leviers de gouvernance, de financement et de standardisation nécessaires pour transformer durablement les villes en systèmes véritablement résilients.

Introduction

Cadre conceptuel et urgence de l'adaptation

L'ère contemporaine est celle de la coexistence forcée entre le progrès technologique et la crise écologique. Partout dans le monde, l'attractivité des villes a conduit à une concentration sans précédent de la population et de l'activité économique. Or, cette concentration repose entièrement sur des systèmes d'infrastructures vitaux – les réseaux de transport, d'énergie, de communication, et surtout, d'eau – qui s'avèrent de plus en plus fragiles face à la recrudescence des phénomènes météorologiques extrêmes. L'ingénieur et l'urbaniste ne peuvent plus concevoir des ouvrages comme s'ils opéraient dans un environnement climatique stable.

L'objectif de cet article est d'apporter un regard d'expert sur la transition nécessaire du génie civil, de la simple construction à la conception de la résilience. Ce terme, essentiel à notre propos, doit être compris au-delà de la simple robustesse. Selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), la résilience est la capacité des systèmes sociaux, économiques et écologiques à faire face à un événement dangereux, en conservant ou en recouvrant rapidement leurs fonctions et leurs structures essentielles. Il s'agit d'une double compétence : la résistance

1. béton bas carbone.

(capacité à absorber le choc sans rupture) et le rétablissement (retour à la normale rapide après la perturbation).

La problématique est claire : comment rendre nos villes, et l'ensemble de leurs actifs matériels, aptes à absorber les chocs sans s'effondrer et à se relever sans délai critique ? Répondre à cette question est un impératif d'efficacité technique, mais aussi un enjeu de société qui s'aligne directement sur l'Objectif de développement durable (ODD) numéro onze des Nations unies, visant des villes et des communautés durables. L'article propose d'abord un diagnostic approfondi du fléau climatique, avant de présenter un éventail de solutions technico-scientifiques intégrées, et enfin, d'émettre des recommandations sur le pilotage de cette transformation.

1. Le diagnostic : des causes aux menaces spécifiques

L'analyse de la vulnérabilité des infrastructures commence par la reconnaissance de l'agent pathogène : le changement climatique d'origine humaine. La quasi-totalité de la communauté scientifique (via les rapports du GIEC) attribue l'accélération du réchauffement et la perturbation des régimes météorologiques aux émissions anthropiques de gaz à effet de serre (GES), notamment le dioxyde de carbone (CO_2), issu principalement de la combustion des énergies fossiles.

Paradoxalement, le secteur du génie civil, qui fournit les solutions d'adaptation, est lui-même un contributeur majeur au problème. La fabrication du ciment Portland, un composant essentiel du béton, est responsable d'environ huit pour cent des émissions mondiales de CO_2 . Ce constat impose à notre profession un double impératif : réduire drastiquement l'empreinte carbone de la construction (atténuation) tout en renforçant la capacité

des ouvrages existants et futurs à résister aux assauts climatiques (adaptation).

Bilan humain et matériel du fléau

L'ampleur du fléau climatique se mesure d'abord par son coût humain et matériel. Entre 2000 et 2019, les Nations unies ont recensé une augmentation significative du nombre de catastrophes majeures :

- pertes humaines et déplacements : au cours de la dernière décennie, les événements météorologiques extrêmes ont été la cause du déplacement de plus de vingt millions de personnes par an en moyenne, contraintes de quitter leur foyer en raison d'inondations ou de tempêtes, fragilisant ainsi les tissus sociaux et économiques des villes ;
- destructions matérielles directes : le coût des dégâts infligés aux infrastructures (routes, ponts, réseaux électriques, logements) est colossal. Les pertes économiques annuelles moyennes dues aux catastrophes climatiques ont dépassé les deux cents milliards de dollars sur la dernière décennie, une grande partie de ces dégâts touchant directement les actifs du génie civil en zone urbaine.

Les phénomènes les plus dommageables pour nos ouvrages sont :

- les inondations et fortes pluies : l'augmentation de la concentration de vapeur d'eau dans l'atmosphère conduit à des précipitations plus courtes mais beaucoup plus intenses. Statistique clé : les inondations et les tempêtes sont responsables de plus de quatre-vingts pour cent des pertes économiques dues aux catastrophes naturelles au cours de la dernière décennie ;

- les vagues de chaleur et canicules : ces phénomènes plus longs et plus fréquents provoquent la dilatation des rails, le ramollissement et la dégradation prématurée des revêtements routiers asphaltiques ;
- les sécheresses : elles sont la cause principale du retrait-gonflement des argiles (RGA), un phénomène géotechnique où la dessiccation du sol entraîne des mouvements différentiels des fondations, causant des défaillances structurelles importantes.

Le danger est d'autant plus grand que les réseaux d'infrastructures sont fortement interdépendants. Une seule défaillance peut paralyser tout le système urbain. C'est le concept de l'effet domino, où la non-résilience d'un seul élément met en péril tout le système urbain.

1.1. Les outils de mesure et de cartographie des risques

Pour concevoir une stratégie d'adaptation efficace, l'expert doit d'abord mesurer précisément la vulnérabilité. Le coût de l'inaction est en effet bien supérieur au coût de la prévention. Statistique clé sur l'investissement : aux États-Unis, il est estimé qu'investir dans la résilience apporte un retour de sept dollars pour chaque dollar dépensé en prévention.

La nécessité d'une vision globale a rendu indispensables les outils de modélisation avancée :

- les Systèmes d'information géographique (SIG) : ils permettent de superposer les cartes d'aléas avec les cartes d'actifs d'infrastructures pour localiser les points critiques ;
- la modélisation multialéas et les jumeaux numériques : les logiciels modernes permettent de simuler l'occurrence

simultanée de plusieurs risques. Le concept de jumeaux numériques (*Digital Twins*) crée un modèle virtuel dynamique de la ville, permettant de tester des stratégies d'urgence avant même qu'une crise ne survienne ;

- le concept de vulnérabilité sociale : la cartographie ne doit pas s'arrêter aux infrastructures. Elle doit également identifier les populations les plus vulnérables dont l'accès aux services essentiels sera le plus perturbé par la défaillance des réseaux. Ce regard élargi est fondamental pour une planification juste et efficace.

2. L'impératif de l'atténuation : le génie civil décarboné

La résilience ne peut être durable que si elle intègre l'atténuation. L'ingénieur ne peut se contenter de construire des ouvrages qui résistent au réchauffement s'il ne réduit pas sa propre contribution à ce réchauffement. L'innovation dans les matériaux est ici la clé :

- le béton bas-carbone (BBC) : l'enjeu majeur réside dans la réduction de l'utilisation du ciment Portland. Les BBC et les géopolymères sont des alternatives prometteuses. Ils substituent les liants traditionnels par des sous-produits industriels (comme le laitier de hauts fourneaux ou les cendres volantes), réduisant ainsi de manière significative l'empreinte carbone du matériau. L'intérêt scientifique pour ces matériaux est double : ils ne sont pas seulement « verts » (atténuation), mais ils affichent souvent une meilleure durabilité (résistance) face aux environnements agressifs, ce qui en fait une solution idéale pour les infrastructures ;
- l'adaptation thermique des revêtements : pour les axes de transport (routes, pistes), l'innovation porte sur l'utilisation de revêtements à haute réflectivité (albédo) qui renvoient le

rayonnement solaire. En ne captant pas la chaleur, ces revêtements réduisent la température de surface de la chaussée, limitant la dégradation prématurée des matériaux (fissuration thermique) et contribuant à atténuer les Îlots de chaleur urbains (ICU).

En définitive, l'adoption de ces matériaux avancés répond directement à l'ODD neuf (industrie, innovation et infrastructure) et à l'ODD douze (consommation et production responsables). Elle nécessite néanmoins une refonte des normes techniques pour favoriser leur adoption par l'ensemble de la profession.

2.1. Les solutions d'adaptation intégrées : du SBN au numérique

L'ingénierie moderne doit intégrer les écosystèmes dans ses solutions. C'est l'ère des Solutions basées sur la nature (SBN), qui utilisent des processus naturels pour fournir des services d'ingénierie :

- les infrastructures bleues et vertes : face aux inondations, l'ingénierie s'oriente vers la rétention plutôt que la simple évacuation. Des villes comme Rotterdam (Pays-Bas) ont développé des *Water Squares* (places de l'eau) : des espaces publics polyvalents qui se transforment en bassins de rétention temporaire lors de fortes pluies. L'approche s'étend aux zones côtières, où des pays comme le Canada privilégient la restauration des marais salants, moins coûteuse à long terme et plus efficace que les digues lourdes pour absorber l'énergie des vagues ;
- la végétalisation ciblée contre les ICU : contre les vagues de chaleur, la stratégie est la végétalisation ciblée des axes de transport. L'installation de toitures et murs végétaux

ainsi que l'engazonnement des voies de tramway et des terre-pleins centraux permettent d'augmenter l'évapotranspiration. Ce processus naturel rafraîchit l'air et réduit significativement les températures locales, transformant les rues en corridors de fraîcheur ;

- l'intelligence artificielle et la surveillance : l'ingénieur doit désormais s'appuyer sur le numérique. Le déploiement de capteurs internet des objets (IoT¹) sur les ponts, viaducs et barrages permet d'effectuer une maintenance prédictive. Ces capteurs surveillent en temps réel les déformations ou les niveaux d'eau. En alertant l'opérateur avant qu'une défaillance critique ne se produise, cette technologie assure une bien meilleure résilience du système, évitant l'effet domino.

3. La gouvernance et le financement de la résilience

Les solutions techniques existent, mais leur déploiement à grande échelle requiert une volonté politique et des mécanismes de financement adaptés.

3.1. Le rôle des gouvernements : planification intégrée et réglementation

Le rôle des gouvernements n'est plus de réagir aux catastrophes, mais de les anticiper en intégrant les risques climatiques dans la planification territoriale :

- révision des normes : les codes de construction et les normes d'ingénierie doivent être mis à jour pour intégrer les projections climatiques du futur. L'exemple du Canada, qui adapte ses normes pour les infrastructures de transport face à la

1. *Internet of Things*.

- fonte du pergélisol, illustre cette nécessité d'une réponse technique réglementée ;
- urbanisme tactique : les outils de planification urbaine, comme les plans locaux d'urbanisme (PLU), doivent rendre obligatoires des mesures d'adaptation (par exemple, des hauteurs minimales de construction en zone inondable ou des ratios de désimperméabilisation des sols).

3.2. Le financement des donneurs d'ordre et les partenariats

L'investissement initial dans la résilience est souvent perçu comme coûteux. Les donneurs d'ordre, qu'ils soient nationaux ou internationaux, doivent modifier leur approche du risque :

- financement « résilient » : les banques de développement, comme la Banque africaine de développement (BAD), ont un rôle pivot. La BAD s'engage à garantir que les investissements dans les infrastructures de base soient systématiquement « à l'épreuve du changement climatique » (*climate-proofed*) ;
- partenariats public-privé (PPP) et transfert de savoir : des initiatives comme la *Coalition for Disaster Resilient Infrastructure* (CDRI) offrent un soutien ciblé aux pays les plus vulnérables pour l'élaboration de projets intégrant la gestion des risques et les SBN, favorisant ainsi l'ODD dix-sept (partenariats).

3.3. Les freins à l'adoption et les défis de standardisation

Malgré le consensus sur l'urgence d'agir, l'adoption des solutions de résilience fait face à des obstacles considérables, que l'expert se doit de souligner :

- obstacles scientifiques et techniques : le manque de standardisation est un frein majeur. L'homologation des BBC est lente, car les normes traditionnelles exigent des preuves de performance sur plusieurs décennies. De même, la difficulté à modéliser la performance à long terme des SBN pour des événements extrêmes soulève des questions de fiabilité ;
- obstacles économiques et politiques : les coûts initiaux des technologies de pointe (capteurs IoT, jumeaux numériques) sont élevés et peuvent décourager les collectivités aux budgets serrés. Par ailleurs, la résistance des acteurs industriels établis dans la filière du ciment et du béton traditionnel freine l'innovation. Enfin, le manque d'incitations fiscales claires complique la prise de décision politique, car la résilience exige une vision à long terme.

Conclusion

Transformation systémique et feuille de route de la résilience

L'adaptation des infrastructures urbaines aux défis du changement climatique mondial n'est pas une option, mais une obligation non négociable. Cet article de *Regards d'experts* démontre que le génie civil est à la croisée des chemins : il doit basculer d'une ingénierie réactive à une ingénierie proactive, capable d'anticiper les menaces futures. Ce changement est la condition *sine qua non* pour garantir la pérennité de l'investissement économique et, plus fondamentalement, la sécurité des populations.

Les solutions technico-scientifiques sont matures, mais elles exigent une volonté politique et industrielle pour être déployées à l'échelle. L'analyse d'expert est formelle : le coût de l'inaction – mesuré en vies humaines, en déplacements forcés et en pertes économiques dépassant les deux cents milliards de dollars par an – sera toujours exponentiellement supérieur. Réaliser la résilience exige de considérer l'adaptation comme un investissement stratégique avec un retour de sept pour un, et non comme une simple dépense.

Notre recommandation finale pour les décideurs est claire : la résilience passera par la mise en place de trois leviers d'action immédiats :

- réglementation active : réviser les normes de construction pour rendre obligatoire l'intégration des projections climatiques extrêmes (RGA, événements centennaux) et des matériaux à faible impact carbone ;
- financement innovant : créer des mécanismes financiers qui valorisent le retour sur investissement socio-environnemental des SBN (co-bénéfices santé, biodiversité), au-delà du simple retour sur investissement structurel ;
- feuille de route de la recherche-action : financer des programmes de recherche appliquée axés sur la standardisation et la certification des nouvelles solutions, car sans normes fiables, l'adoption par l'industrie restera marginale.

En acceptant de transformer son modèle d'affaires et ses cadres réglementaires, le génie civil s'impose comme la profession clé de la transition climatique. C'est en bâtissant des infrastructures intelligentes et durables que nous concrétiserons l'ODD onze et assurerons la sécurité et la prospérité des générations futures.

Bibliographie

Banque Mondiale, *Lifelines : The Resilient Infrastructure Opportunity*, rapport, Washington, D.C., 2019.

Coalition for Disaster Resilient Infrastructure, *Global Report on Disaster Risk and Resilience of Infrastructure*, rapport, New Delhi, Inde, 2020.

D'ALOISIO L., FERRETTI F., *Digital Twin for Resilience in Smart Cities: A Review of the State-of-the-Art*, Sensors, vol. 21, n° 3, n° 856, 2021.

European Commission (Directorate-General for Research and Innovation), *Nature-Based Solutions in Europe: Policy, Practice and Challenges*, rapport, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020.

GHOLAMPOUR A., GHASEMI S. M., et al., *A review of cement-free geopolymers for use in concrete and civil engineering*, Journal of Cleaner Production, vol. 276, n° 122822, 2020.

GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), *Rapport de synthèse du sixième Rapport d'évaluation (AR6) : Changement climatique, 2022 – Impacts, adaptation et vulnérabilité*, rapport, Genève, Suisse, 2022.

Global Commission on Adaptation (GCA), *Adapt Now: A Global Call for Leadership on Climate Resilience*, rapport, Rotterdam, Pays-Bas, 2019.

Organisation des Nations unies (ONU), *Rapport sur les Objectifs de Développement durable, 2023*, rapport, New York, États-Unis, 2023.

Organisation météorologique mondiale (OMM), *Atlas de la mortalité et des pertes économiques dues aux phénomènes météorologiques, climatiques et hydrologiques extrêmes (1970–2019)*, rapport, Genève, Suisse, 2021.

WONG N. H., YU C., *Thermal performance of urban green infrastructure for mitigating urban heat island effect*, *Building and Environment*, vol. 142, p. 335-345, 2018.