

**Coût environnemental des matériaux
dans la construction d'une ville
africaine**

**Cas de Bukavu en République Démocratique
du Congo**

**Bossissi Nkuba, Liliane Nabintu Kabagale,
Serge Mukotanyi Mugisho, Bitagirwa Ndele,
Gracia Kabilambali, Didier Mugisho et
Franck Mugisho Zahinda**



The IOB Working Paper Series seeks to stimulate the timely exchange of ideas about development issues, by offering a forum to get findings out quickly, even in a less than fully polished form. The IOB Working Papers are vetted by the chair of the IOB Research Commission. The findings and views expressed in the IOB Working Papers are those of the authors. They do not necessarily represent the views of IOB.

Institute of Development Policy

Postal address:	Visiting address:
Prinsstraat 13	Lange Sint-Annastraat 7
B-2000 Antwerpen	B-2000 Antwerpen
Belgium	Belgium

Tel: +32 (0)3 265 57 70
Fax: +32 (0)3 265 57 71
e-mail: iob@uantwerp.be

<http://www.uantwerp.be/iob>

WORKING PAPER / 2024.05

ISSN 2294-8643

Coût environnemental des matériaux dans la construction d'une ville africaine

Cas de Bukavu en République Démocratique du Congo

**Bossissi Nkuba, Liliane Nabintu Kabagale, Serge Mukotanyi Mugisho,
Bitagirwa Ndele, Gracia Kabilambali, Didier Mugisho et Franck Mugisho
Zahinda**

June 2024

Préface et remerciements

Cette série de working papers est le produit d'un projet de collaboration interuniversitaire, financé par le VLIR-UOS (Conseil Interuniversitaire Flamand) et exécuté par l'Université d'Anvers et la KULeuven en Belgique, et l'Université Catholique de Bukavu (UCB) avec le Centre d'Expertise en Gestion Minière (CEGEMI) en République Démocratique du Congo. Le projet VLIR-TEAM est intitulé *Du gravier fait à la main vers l'urbanisme fait à la main. Travail humain, nature et matériaux dans la chaîne d'approvisionnement de matériaux de construction à Bukavu, République Démocratique du Congo* et court de 2022 à 2027. Les papiers présentés dans cette série sont le produit collectif d'une équipe. Les membres sont : Elvis Amani Zihahirwa, Joseph Bahati Mukulu, Christelle Balegamire, Marie-Rose Bashwira, Divin-Luc Bikubanya, Dag Boutsen, Christian Byaombe, Mac Cubaka Mugumaoderha, Philippe Dunia, Sara Geenen, Olivier Igugu, Francine Iragi Mukotanyi, Gracia Kabilambali, Espoir Kanene, Jean-Claude Katanga, Sarah Katz-Lavigne, Naomi Mputu, Didier Mugisho, Franck Mugisho Zahinda, Serge Mukotanyi Mugisho, Naomi Nabami, Liliane Nabintu Kabagale, Bitagirwa Ndele, Bossissi Nkuba.

Nous remercions le VLIR-UOS qui nous a donné le cadre dans lequel cette collaboration a pu se matérialiser. Divin-Luc Bikubanya remercie le FWO (projet V412924N) qui a financé sa recherche sur le terrain en 2024.

Nous sommes reconnaissants au CEGEMI et à l'UCB, mais surtout à tous les interviewés qui ont accepté de se rendre disponibles et de répondre à nos questions, et toutes les parties prenantes qui s'intéressent à ce projet. Nous remercions Thierry Munga pour sa participation à l'élaboration de la méthodologie et du guide d'entretien, Eric Zihindula pour ses orientations lors de la conception de la recherche, Clémence Nzita et Symphorose Bisomerine pour avoir effectué une partie de la collecte des données et la transcription, et Robby Fivez et Daniel Tenda pour la lecture.

Site web du projet : <https://www.uantwerpen.be/handmade-urbanism>

Bios

Elvis Amani Zihahirwa est juriste, assistant à l'Université d'excellence en Afrique des grands lacs (UEAGL), chercheur au Centre d'Expertise en Gestion Minière (CEGEMI) de l'Université Catholique de Bukavu (UCB) et chargé de suivi et mesure de résultats au sein de Swisscontact.

Joseph Bahati Mukulu est doctorant à l'Institut de Politique de Développement (IOB) à l'Université d'Anvers et chercheur au Centre d'Expertise en Gestion Minière (CEGEMI), Université Catholique de Bukavu (UCB).

Christelle Balegamire Karuta est ingénieure agronome et étudiante en master de spécialisation en gestion des risques et des catastrophes à l'ère de l'anthropocène à l'Université de Liège. Elle est chercheuse au Centre d'Expertise en Gestion Minière (CEGEMI) et assistante à l'Institut Supérieur des Techniques de Développement (ISTD) de Kalehe.

Marie-Rose Bashwira est professeure à l'Université Catholique de Bukavu (UCB), l'Institut Supérieur de Développement Rural (ISDR-Bukavu) et l'Institut de Sciences Informatiques et de Gestion (ISIG-Goma). Elle est chercheur au Centre d'Expertise en Gestion Minière (CEGEMI) et co-promoteur du VLIR-TEAM.

Divin-Luc Bikubanya est assistant à l'Institut de Politique de Développement (IOB) à l'Université d'Anvers et fait son doctorat sur l'industrialisation et le ciment au Sud-Kivu. Il est aussi chercheur au Centre d'Expertise en Gestion Minière (CEGEMI), Université Catholique de Bukavu (UCB).

Dag Boutsen est architecte et professeur à la Faculté d'Architecture de la KU Leuven où il a été doyen. Il enseigne comme guest dans la Faculté d'Architecture de l'UCB depuis sa naissance et co-promoteur du VLIR-TEAM.

Christian Byaombe Malumalu est doctorant au Centre Interdisciplinaire Droit, Entreprise et Société de l'Université catholique de Louvain (CRIDES-UCLouvain). Il est aussi assistant à l'Université Officielle de Bukavu (UOB) et chercheur au Centre d'Expertise en Gestion Minière (CEGEMI), Université Catholique de Bukavu. Il est avocat au Barreau du Sud-Kivu.

Mac Cubaka Mugumaoderha professeur de physique et sciences des matériaux à l'Institut Supérieur pédagogique (ISP) de Bukavu et à l'Université Catholique de Bukavu (UCB). Il est doyen de la Faculté de Polytechnique et directeur de l'Ecole d'Architecture et Urbanisme de l'UCB. Il est orienté sur le R&D, les technologies durables et le développement de curriculum de formation. Il est co-promoteur du VLIR-TEAM.

Philippe Dunia Kabunga est doctorant à l'Institut de Politique de Développement (IOB) à l'Université d'Anvers, enseignant à l'Institut Supérieur de Développement Rural (KAZIBA) et chercheur au Centre d'Expertise en Gestion Minière (CEGEMI), Université Catholique de Bukavu (UCB).

Sara Geenen est professeur à l'Institut de Politique de Développement (IOB) à l'Université d'Anvers. Elle est codirectrice du Centre d'Expertise en Gestion Minière (CEGEMI) à l'Université Catholique de Bukavu (UCB) et promoteur du projet VLIR-TEAM.

Olivier Igugu est chercheur au Centre d'Expertise en Gestion Minière (CEGEMI), Université Catholique de Bukavu (UCB), avec une expérience de recherche pratique dans le domaine de l'exploitation des ressources minières et forestières. Il travaille également comme consultant pour l'évaluation de projets du domaine de la conservation.

Francine Iragi Mukotanyi est professeur à l'Université Catholique de Bukavu (UCB), doyenne de la Faculté des Sciences Economiques et de Gestion, et directrice du Centre d'Expertise en Gestion Minière (CEGEMI).

Gracia Kabilambali est ingénieure agronome phytotechnicienne et chercheur au Centre d'Expertise en Gestion minière (CEGEMI), Université Catholique de Bukavu. Son intérêt porte sur le travail des femmes et des enfants dans les mines et sur la restauration du couvert végétal des carrières minières.

Espoir Kanene est architecte et assistant à la Faculté de Polytechnique et à l'Ecole d'Architecture de l'Université Catholique de Bukavu (UCB). Il est actuellement membre de la commission de suivi des travaux de construction de l'UCB.

Jean Claude Katanga est architecte, spécialisé en arts plastiques, visuels et de l'espace. Il est enseignant à la Faculté de Polytechnique/Ecole d'Architecture de l'Université Catholique de Bukavu (UCB) et Construction Trainer au sein de l'Association des Entrepreneurs belges de grands travaux (ADEB-VBA) dans les Ateliers Construlab à Bruxelles.

Sarah Katz-Lavigne est postdoctorante à l'Institut de Politique de Développement (IOB) à l'Université d'Anvers. Elle est chercheur au Centre d'Expertise en Gestion Minière (CEGEMI) à l'Université Catholique de Bukavu (UCB) et travaille dans le projet Conduire au Changement (FWO).

Naomi Mputu est assistante à l'Université Catholique de Bukavu (UCB), Faculté des Sciences Economiques et de Gestion, et chercheur au Centre d'Expertise en Gestion Minière (CEGEMI). Elle est actuellement inscrite en Master en Mondialisation et Développement à l'Institut de Politique de Développement (IOB) à l'Université d'Anvers.

Didier Mugisho est géographe et étudiant en master à l'Institut Supérieur de Pédagogie (ISP) de Bukavu. Il y est aussi assistant au département de géographie et gestion des ressources naturelles.

Franck Zahinda Mugisho est doctorant au Systemic Physiological and Ecotoxicological Research group (SPHERE) de l'Université d'Anvers. Il est aussi chercheur au Centre d'Expertise en Gestion Minière (CEGEMI), au Département des Sciences de l'Environnement et à la Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université Catholique de Bukavu (UCB).

Serge Mukotanyi Mugisho est ingénieur agronome, option eaux et forêts, chercheur au Centre d'Expertise en Gestion Minière (CEGEMI), assistant à la Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université Catholique de Bukavu (UCB) et détenteur d'un master de l'Ecole Régionale Postuniversitaire d'Aménagement et de Gestion intégrés des Forêts et Territoires tropicaux (ERAIFT). Il s'intéresse principalement à la foresterie et à l'écologie du paysage.

Naomi Nabami est assistante à la Faculté des Sciences Sociales de l'Université Catholique de Bukavu (UCB) et chercheuse au Centre d'Expertise en Gestion Minière (CEGEMI). Elle est détentrice d'un master en Gouvernance et Développement de l'Université d'Anvers.

Liliane Nabintu Kabagale est ingénieur agronome, option sciences du sol, chercheuse au Centre d'Expertise en Gestion Minière (CEGEMI) et assistante à la Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université Catholique de Bukavu (UCB). Elle est actuellement inscrite en Master en ingénierie des ressources en eau à la KU Leuven.

Bitagirwa Ndele a un Master en gestion des ressources naturelles renouvelables de l'Université de Lubumbashi. Il est enseignant et chercheur en sciences de l'environnement, à l'Université Catholique de Bukavu et à l'Institut Supérieur Pédagogique de Bukavu.

Bossissi Nkuba est professeur à l'Institut de Politique de Développement (IOB) à l'Université d'Anvers et postdoc au Musée Royal de l'Afrique Centrale (MRAC) en Belgique. Il est aussi professeur à l'Université Catholique de Bukavu (UCB) et chercheur dans le Centre d'Expertise en Gestion Minière (CEGEMI). Il est promoteur du projet VLIR-TEAM.

Coût environnemental des matériaux dans la construction d'une ville africaine. Cas de Bukavu en République Démocratique du Congo

Bossissi Nkuba, Liliane Nabintu Kabagale, Serge Mukotanyi Mugisho, Bitagirwa Ndele, Gracia Kabilambali, Didier Mugisho et Franck Mugisho Zahinda

Résumé.....	5
1. Introduction	5
2. Bukavu, une ville africaine typique ?.....	7
3. Approche méthodologique.....	11
4. Origine, extraction et transport des matériaux	13
4.1. Le sable et le ciment.....	13
4.2. Le bois	15
4.3. Les briques	15
4.4. Les moellons et les graviers.....	17
5. Quantités extraites, utilisées et réutilisées	18
5.1. Volumes annuels	18
5.1.1. Sable et ciment.....	18
5.1.2. Briques	19
5.1.3. Bois	19
5.1.4. Moellons et graviers	20
5.2. Volumes cumulés.....	20
6. Dommages environnementaux et sanitaires et leur perception locale	23
6.1. Dégradation de l'environnement urbain.....	23
6.2. Risques sanitaires pour les travailleurs	24
6.3. Déforestation et dégradation des écosystèmes terrestres.....	25
6.4. Pollution de l'eau et de l'air	27
6.5. Estimation de l'empreinte carbone de matériaux de construction.....	28
7. Life cycle assessment	30
7.1. Cadre théorique	30
7.2. Historique de l'analyse du cycle de vie dans le domaine de la construction	32
8. Vers une construction plus durable de la ville	33
Références.....	36

Résumé

Pour faire face à l'urbanisation et la croissance démographique, l'industrie de la construction utilise d'énormes quantités de sable, pierres, argiles et bois. Leur extraction place les écosystèmes environnants sous un stress croissant. L'ampleur de cette pression à proximité des villes pauvres, à croissance rapide et dans des pays ayant des difficultés à appliquer la législation environnementale demeure largement incomprise. Cette étude a conduit une enquête dans la ville de Bukavu, auprès de différentes parties prenantes intervenant dans la construction ou dans sa chaîne d'approvisionnement en vue d'analyser le coût écologique de l'extraction, la préparation, le transport, l'utilisation et la réutilisation de matériaux de construction. Les résultats montrent un rayon d'impact de 65 km au sein duquel les impacts sont localisés à certains sites précis mais d'une grande variété. Ils incluent la déforestation, l'érosion, les glissements de terrain, la pollution de l'eau et d'autres conséquences néfastes sur la santé humaine. Aussi, bien que l'extraction de ces matériaux soit essentiellement manuelle, leur transport vers la ville contribue au réchauffement climatique. Les dommages environnementaux demeurent relativement faibles suite à la faible consommation de matériaux due à la pauvreté du milieu, freinant beaucoup de résidents de se construire un habitat confortable et la proximité des sites d'extraction et production de matériaux. Cependant, la faible application des lois amplifie les risques sur la santé des résidents et des travailleurs. Les acteurs du secteur de la construction et sa chaîne d'approvisionnement sont conscients de ces effets négatifs sur leur santé, la santé de la communauté et l'environnement, mais demeurent impuissants face à ceux-ci. Des politiques et des initiatives visant à promouvoir la réutilisation des matériaux sont donc nécessaires pour soutenir la transition vers une construction plus durable.

1. Introduction

La population humaine s'est accrue très rapidement ces 100 dernières années. Elle est passée de moins d'un milliard en 1800 et moins de deux milliards en 1927, à plus de huit milliards, moins de 100 ans après, en 2023. Ceci a créé un énorme besoin de logements supplémentaires. Ce besoin est encore plus important en milieu urbain. En effet, bien qu'il y a 100 ans les villes abritaient moins de 20% de la population humaine, aujourd'hui elles logent 56%, et atteindront 70% d'ici 2050 (Worldbank, 2023; Zinkina, 2017). L'extraction, le transport et l'utilisation de matériaux nécessaires à ces logements peut en affecter les écosystèmes autour de ces villes et bien plus loin encore. Tout d'abord, la production de matériaux contribue au réchauffement climatique, avec le ciment à lui tout seul contribuant plus de 5% du CO₂ total émis dans le monde (Benhelal et al., 2021). En Europe, le secteur de la construction est à lui seul responsable de la consommation de 40% d'énergie et de l'émission de 36% des gaz à

effet de serre (Herinjaka, 2022). En plus de sa contribution au réchauffement climatique, ce secteur impacte la biodiversité forestière et aquatique. En effet, l'exploitation du sable de rivière perturbe de l'habitat, altère des zones riveraines et modifie le transport des sédiments en aval (Bhatawdekar et al., 2021), perturbe la dérive des macroinvertébrés, les mouvements des poissons, l'abondance des espèces et les structures des communautés, ainsi que la dynamique du réseau trophique (Koehnken et al., 2020). Bien au-delà, les matériaux de construction génèrent des micropolluants fortement toxiques pour les organismes aquatiques. En Europe, plus de 800 produits toxiques sont enregistrés, notamment provenant du milieu urbain (Paijens, et al., 2019).

L'ampleur de ces impacts dans les pays du Sud ne pourrait pas être assimilée à celle dans les pays riches, suite aux différences en dynamiques de population, en préférences de construction, en capacités financières, et en capacités institutionnelles à protéger l'environnement. En effet, malgré que la population humaine est prévue de plafonner ou décroître dans les prochaines décennies (UN, 2022; Bricker and Ibbitson, 2019; Lee, 2011), celle de l'Afrique Subsaharienne vu son taux de fertilité double de la moyenne mondiale (soit respectivement encore à 5,1 enfants par femme de 2,4), est prévue de continuer à augmenter au-delà du 21^e siècle. De surcroît, le taux d'urbanisation en Afrique augmente très rapidement (anticipée d'atteindre 56% en 2050 (Soulemana et al., 2019)). La croissance démographique et l'urbanisation rapide causent le phénomène de villes à croissance très rapide. Ces villes souvent créées il y a une centaine d'années lors de la colonisation du continent connaissent une croissance liée à la fois à la forte natalité et à l'exode rural des villages les avoisinant. Ces villes sont non seulement en croissance, mais aussi en train de croître leur proportion de logement 'confortable' (en dût, avec eau, assainissement et suffisamment d'espace de vie). L'accès à ces logements dans les villes d'Afrique Sub-Saharienne est passé de 11% à 23% entre 2000 et 2015 et continue à croître (Tusting et al., 2019).

La combinaison d'une plus forte croissance démographique, d'une rapide urbanisation et d'une augmentation de l'accès au logement 'confortable' augmente sensiblement le besoin en termes de logement et autres infrastructures. Cependant, le niveau de construction est atténué par le peu de ressources financières dont disposent les populations de cette région (avec un PIB de 1.600\$ alors que la moyenne mondiale est de 12.600\$ (Macrotrend, 2023)). Le manque de ressources en Afrique Sub-Saharienne apporte aussi son lot de problèmes. En effet, les gouvernements locaux de cette région ont peu de ressources comme leurs populations. Cela les rend moins aptes à développer des politiques de protection de l'environnement appropriées à leurs situations. Et dans les cas où ces politiques seraient en place, les institutions chargées d'appliquer les lois manquent de ressources et/ou sont rongées par la corruption (Nkuba et

al., 2017). Cette incapacité à mettre en place et appliquer des politiques de protection de l'environnement s'étend également sur la faible implémentation des plans urbains. En effet, c'est plutôt le marché et des forces non étatiques qui orientent comment se forment plusieurs villes africaines (Andersen et al., 2015).

Toutes ces circonstances mises ensemble, il devient de moins en moins clair de savoir si des villes en croissance rapide dans cette région ont un impact environnemental comparable que celui des villes dont la croissance est en ralentissement, mais dont les moyens financiers privés et étatiques facilitent à la fois la construction et les politiques de protection de l'environnement des effets de cette construction. De plus, dans les pays en développement, des pratiques de réutilisation de matériaux sont fréquemment adoptées dans le secteur de la construction, non pas pour des raisons écologiques, mais plutôt pour des raisons économiques. Ainsi, il serait nécessaire de réajuster l'analyse de l'impact environnemental en y intégrant le potentiel de réutilisation que portent certains matériaux, particulièrement dans les contextes locaux.

Ce travail vise à inventorier les impacts environnementaux du secteur de la construction en analysant la chaîne d'approvisionnement. Il vise également à quantifier le niveau de consommation de ressources pour comprendre l'ampleur des impacts observés. Enfin, il vise à mener des réflexions vers d'éventuelles solutions protectrices de l'environnement applicables au contexte local de la ville de Bukavu.

2. Bukavu, une ville africaine typique ?

Notre choix du milieu d'étude s'est porté sur une ville de taille moyenne (près d'un million d'habitant) dont les problèmes reçoivent souvent moins d'attention contrairement aux mégapoles. Située à l'Est de la République Démocratique du Congo (RD Congo), Bukavu (figure 1) est localisée dans la région des Grands Lacs Africains. Elle est une agglomération densément peuplée qui a connu une croissance rapide ces dernières décennies pour des raisons la rendant relativement atypique.

En effet, Bukavu a connu une augmentation spectaculaire de sa population, avec une croissance allant 18.850 habitants avant 1948 à 142.181 en 1970 (De Saint Moulin, 1976), 450.000 en 2002 (Tréfois et al., 2002), jusqu'à environ 1,2 millions d'habitants en 2022 (Bisimwa et al., 2022). La ville enregistre souvent l'arrivée de flux migratoires atteignant jusqu'à 30 000 personnes par an et une demande foncière de plusieurs milliers de nouvelles parcelles (et maisons) chaque année (ONU-Habitat, 2014). L'expansion récente de la ville a été

fortement liée aux conflits armés depuis 1996 (Paul, 2019). De nombreuses personnes ont cherché refuge dans la ville dans l'espoir d'éviter les affrontements entre les groupes rebelles, les forces gouvernementales et les milices locales (Vlassenroot et Verweijen, 2017). Elles ont également fui les pillages, les attaques contre les communautés villageoises, les viols et autres crimes. Cette augmentation de la population, de besoin en parcelles et maisons se fait sur une superficie quasi constante depuis la création de la ville (Sadiki, 2009), et ce dans une zone sujette aux aléas et contraintes naturels. L'impact anthropique de l'étalement urbain non coordonné et du changement d'occupation du sol dans la ville contribuant à la vulnérabilité des quartiers (Van Overbeek et Tamas, 2018).

L'administration coloniale avait aménagé la ville en deux parties. Une réservée aux colons, appelée ville (actuellement commune d'Ibanda) et l'autre, réservée aux indigènes nommée centre extra-coutumier (actuellement communes de Kadutu et Bagira). Ce plan initial séparait donc, les zones résidentielles des colons des cités réservées aux noirs. Malgré cette discrimination, les colons avaient aménagé Bukavu sur base des règles urbanistiques afin de rendre vivables ces deux entités séparément. Cependant, la structure de la ville a complètement changé dans les décennies qui ont suivi l'indépendance en 1960. C'est vers 1973 que tout cela a commencé à périlcliter : le développement de nouvelles cités formées de constructions spontanées et non planifiées a élu domicile dans la ville. L'occupation accrue de tous les terrains disponibles, propices ou non (notamment ceux à fortes pentes et ceux occupant des routes, canaux et autres structures publiques) précarise l'habitat de la ville de Bukavu (Michellier, 2017). Ainsi, assiste-t-on aux catastrophes : incendies des maisons, érosions, inondations, éboulements/glislements, affaissement; tributaires du mauvais aménagement et de l'anarchie dans les services fonciers (Wand'arhasima et al., 2020). La forte pression démographique est à l'origine d'une spéculation foncière qui, sans se conformer aux dispositions légales, procède aux morcellements parcellaires successifs en des terrains de plus en plus petits ou il est quasiment impossible de construire décemment. Dès lors, les conséquences sur l'environnement urbain ne cessent de prendre son ampleur, rendant la vie dans la ville de plus en plus inconfortable.

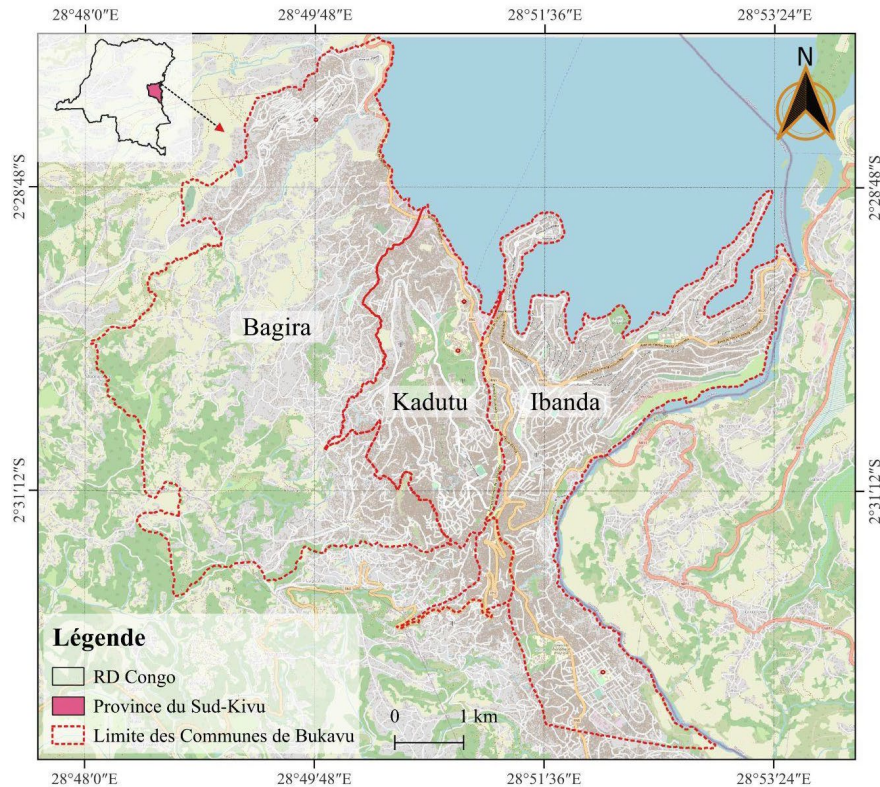


Figure 1: Carte administrative de la ville de Bukavu

La ville de Bukavu s'étend sur 62,9 km², dont 43,2 km² sur terre ferme et 19,7 km² sur le lac Kivu. Elle a un relief à dénivelé de plus de 700 mètres entraînant d'importantes érosions et exigeant un type particulier d'architecture (figure 2). Séparée du Rwanda par le lac Kivu et la rivière Ruzizi, elle est divisée en trois municipalités (communes) dont celle de Kadutu (6,67 km²), Ibanda (13,3 km²) et Bagira (23,2 km²) (Muhaya et al., 2022). Bien qu'à Ibanda, l'accès à la population noire était limitée jusqu'aux années 60, elle est également devenu densément peuplée suite au grand nombre de maisons y construites au cours des deux dernières décennies et au morcellement des parcelles jadis plus grandes (Karume et al., 2017).

Bukavu se trouve dans une région sismiquement "active", avec de nombreuses fractures visibles dans la zone, dont l'une traverse la ville (Mugaruka et al., 2017). Bukavu se caractérise également par des pentes abruptes (figure 2) et un relief montagneux ; toute la ville est construite dans un environnement extrêmement vallonné, avec presque aucune partie de la ville construite sur une surface complètement plate (Balegamire et al., 2017). En conséquence, des catastrophes naturelles, notamment des glissements de terrain dévastateurs, ont frappé à plusieurs reprises Bukavu.

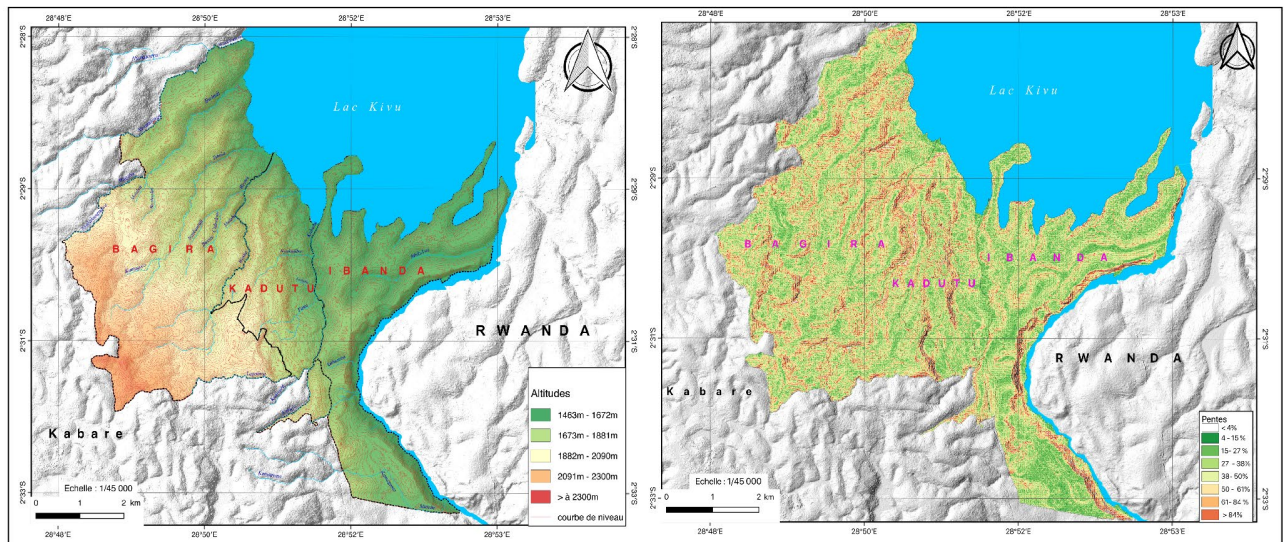


Figure 2: Altitudes et pentes dans la ville de Bukavu

Ces glissements de terrain, dont l'activité récente peut aussi être influencée par le développement de la ville et l'anthropisation du paysage, présentent des processus et des stades d'activité variés qui font que les déformations du sol qui y sont associées sont diverses. Dans certains cas, ils sont même d'origine purement anthropique, en relation avec, par exemple, des affouillements au pied de versant, des modifications du drainage de surface, des surcharges de pente et le déboisement (Mugaruka et al., 2017). En outre, l'alternance saisonnière du climat en une saison humide et sèche, associée à une couverture végétale parfois contrastée, et l'anthropisation du territoire favorisent l'érosion des sols, qui se traduit entre autre sous la forme de grandes ravines aux versants souvent instables (Moeyersons et al., 2004; Balegamire et al., 2017; Muhaya et al., 2022).

Dans ses périmètres urbains, des centres émergents s'imposent et constituent un potentiel important dans les tendances extensives de la ville de Bukavu ainsi que dans l'approvisionnement de la ville en plusieurs biens de première nécessité tels que les denrées alimentaires (légumineuses), les matériaux de construction (briques, pierres, sable, bois etc.). Dans un rayon de 50km autour de la ville de Bukavu (du côté congolais), Nyantende, Kamisimbi, Nyangezi, Cidaho, Mudaka, Katana, Cirunga, Birava, Idjwi et Kalehe se présentent comme de 'zones-solutions' capables de répondre efficacement aux demandes en termes d'approvisionnement non seulement en denrées alimentaires et en matériaux de construction, mais aussi en main d'oeuvre (Mugisho et al., 2022).

3. Approche méthodologique

Des recherches méritent d'être effectuées pour comprendre comment l'utilisation des matériaux et la dégradation des écosystèmes se réalisent dans ce contexte de croissance et d'urbanisation rapides à Bukavu, mais avec des ressources limitées. Cette recherche poursuit donc comme objectif principal d'évaluer les impacts environnementaux des matériaux de construction depuis leur extraction jusqu'à leur fin de vie. Ceci passera par un inventaire et une quantification des matériaux de construction utilisés dans la ville de Bukavu ainsi que la détermination des facteurs qui influencent leur choix dans la construction.

Afin de collecter les informations sur l'origine et la destination des matériaux de construction, quantifier leur utilisation et impacts environnementaux à chaque niveau ; des entretiens ont été organisés avec les différents acteurs impliqués tout au long de la chaîne de valeur des matériaux de construction tel que proposé dans le modèle de Huang et al. (2020) (figure 3). Il s'agit des armateurs, camionneurs, taxateurs, vendeurs des matériaux de construction, ingénieurs et/ou architectes et les maçons, ainsi que les autorités politico-administratives chargées de réglementer le secteur.

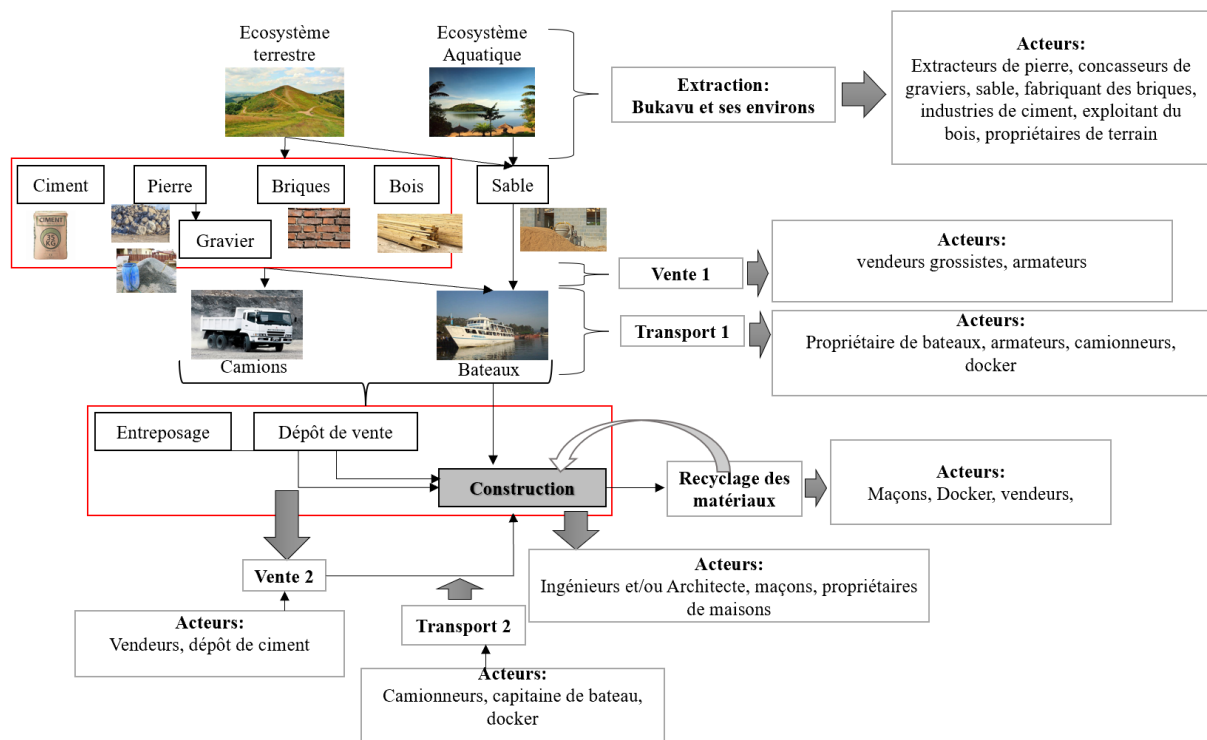


Figure 3: Chaîne d'approvisionnement des matériaux de construction (Huang et al., 2020; Iragi et al., même série)

Selon le type d'acteur et en fonction du guide d'entretien établi, les informations suivantes ont été collectées : (i) Le récit de vie en liaison avec les matériaux de construction, (ii) les origines et les destinations des matériaux de construction, (iii) les différents moyens de transport utilisés, (iv) la quantité extraite et/ou transportée, (v) les différentes dépenses faites, et (vi) les impacts environnementaux et sanitaires du travail fait. La méthode boule de neige a été utilisée, jusqu'à atteindre le point de saturation et au total 45 interviews individuels et 6 focus groups ont été réalisés.

Les entretiens ont été complétés par des observations de terrain (comme les surfaces urbanisées, les effets de l'urbanisation sur les écosystèmes, la perte de biodiversité et la dégradation des terres). Pour faire la quantification des bâtiments de la ville de Bukavu, les données *OpenStreetMap* (OSM) ont été utilisées¹. Cette base de données a permis d'identifier tous les bâtiments de la ville (figure 4) et de calculer pour chaque commune le nombre total des bâtiments, la densité des bâtiments (nombre de bâtiments/km²), la superficie totale qu'occupe les bâtiments, la superficie moyenne d'un bâtiment ainsi que la superficie maximale et minimale.

La connaissance des données sur les bâtiments de la ville de Bukavu a permis d'établir des estimations en termes de consommation de matériaux de construction. Ces estimations ont été réalisées en croisant les données collectées sur le terrain lors des entretiens avec les données disponibles sur les bâtiments de juin 2023. En effet, lors des entretiens, il a été recueilli auprès des ingénieurs civils et architectes des données sur les quantités approximatives de différents matériaux de construction (sable, graviers, briques, moellons et planches) nécessaires à la construction d'une maison typique selon les différentes communes. Ensuite, grâce aux données obtenues sur la plateforme OSM, ces quantités ont été ramenées à la superficie moyenne estimée afin d'obtenir les estimations de la consommation des matériaux de construction.

Les entretiens collectifs et individuels ont duré plus ou moins une heure et ont été enregistrés, retranscrits puis analysés avec le logiciel NVivo 1.2. La confidentialité des informations partagées a toujours été respectée.

¹ Voir <http://extract.bbbike.org/>.

4. Origine, extraction et transport des matériaux

Cette section présente l'inventaire des différents matériaux de construction utilisés dans la ville de Bukavu. Trois points majeurs sont examinés: l'origine des matériaux, leur quantification ainsi que leur réutilisation. Une attention particulière a été portée sur le transport de ces matériaux, leur destination finale ainsi que sur les changements technologiques observés surtout dans leur fabrication.

4.1. Le sable et le ciment

Le sable est le matériau de construction le plus utilisé au monde. Il est même la deuxième ressource la plus exploitée après l'eau (Abderrahmane, 2022). A Bukavu, il est exploité sous deux formes correspondant à des utilisations différentes. Le sable "lavé" est entraîné par les eaux de pluie vers les berges en provenance des montagnes (*I.AX 202304 GP24, 6,84%*) et le sable "non lavé" qui provient des carrières (*I.Ar 202304 LS8, 11,20%*). Le sable "lavé" est plus apprécié et demandé, car il est fin, propre, exempt d'impuretés et présente une granulométrie régulière (*I.AX 202304 GP24, 3,75%*). Ces propriétés le rendent idéal pour plus d'usages, tels le béton et les fondations. Le sable "non lavé", est utilisé pour les travaux de finissage et n'est pas très recherché malgré son faible prix (*I.AX 202304 GP24, 2,09%*). *"Le sable lavé est cher. Tu comprends que lui, il n'est pas comme l'autre ; il ne sélectionne pas de travail à exécuter. Il fait toutes sortes de travail. Mais celui qui est utilisé pour un type de travail seulement a son propre prix. Jusqu'à présent, celui-ci, je le vends à 12 dollars le mètre cube, et celui-là, je le vends à 13 dollars le mètre cube."* (*I.VES 202304 LS3, 2,23%*), nous explique une vendeuse. Son exploitation détruit des bancs de sable et zones humides. Ces habitats sont importants pour la biodiversité, car ils abritent une variété de plantes et d'animaux. Les poissons fuient les berges à cause des herbes qui disparaissent à cause des couches des sols qui se succèdent dans le lac pendant l'exploitation des pierres dans les carrières (*I.VGr 202306 LS, 15, 77%*).

L'extraction et le transport du sable "non lavé" nécessitent plus d'énergie et de ressources que le sable lavé. En effet, ce dernier est extrait manuellement dans les rivières et transporté à tête d'homme jusque dans les barges accostées à proximité du point d'extraction. Le sable non lavé par contre, est parfois extrait par des engins motorisés et transporté vers les barges par des camions (*I.AX 202304 GP24, 6,19%*), contribuant ainsi beaucoup plus à l'empreinte carbone de la chaîne d'approvisionnement du sable.

Ils sont extraits dans les territoires d'Idjwi et Kalehe en RDC (Ishara et al., 2023) et dans certaines parties du Rwanda. En effet, de manière surprenante, la consommation de sable de

Bukavu va au-delà des frontières de la RDC. *“Il y a le sable lavé, comme celui-ci ; il provient du Rwanda...Oui, le Rwanda descend aussi jusqu’au lac. Les rwandais eux-mêmes chargent sur des barges, et ils l’apportent jusqu’ici...surtout quand il s’épuise”* déclare une vendeuse de sable. Ces sites d’extraction dans la région sont principalement accessibles par le lac Kivu (situés à environ 50 km et 65 km de Bukavu). Idjwi est une île située au milieu du lac, avec le Rwanda à l’Est et Kalehe à l’Ouest (figure 4). L’exploitation du sable est faite dans les lits des rivières, sur les rives du lac Kivu (Ngabo et al., 2022) et dans les carrières, au Congo comme au Rwanda, entraîne l’érosion des berges, la pollution des eaux et la destruction des habitats naturels (Nyakabeji et al., 2023).

La proximité de la ville avec le lac permet d’extraire le sable directement au bord de l’eau et de le transporter facilement vers les lieux de vente et/ou d’utilisation à Bukavu par barge (*I.AX 202304 GP24, 5,59%*). Il est chargé manuellement (à tête d’hommes ou à dos de femmes) depuis le lit des rivières exploitées (pour le sable lavé) directement vers des barges dont la capacité varie entre 100 et 400 m³. Cependant, il peut présenter des risques environnementaux, notamment la pollution des eaux du lac par les déversements de carburant vu la vétusté des moteurs utilisés. Le contenu des barges est ensuite déchargé par les dockers sur les points de vente, au port Beach Muhanzi, situé dans la commune d’Ibanda et à distance similaire des 3 communes. De là, il emprunte la voie routière, dans des camions jusqu’aux chantiers où il sera utilisé; excepté pour les rares cas où il est livré par barge directement aux chantiers au bord du lac. Ceci permet de réduire considérablement les coûts de transport et sa pollution hors de la ville. En effet, le transport sur lacs et rivières est de 33 grammes de CO₂ par tonne-kilomètre, pendant que le transport en camions est d’au moins quatre fois plus élevé (137 grammes de CO₂ par tonne-kilomètre) (EEA, 2021). Cependant, une fois à Bukavu, le transport du sable vers les chantiers contribue à la pollution sonore et aérienne dans la ville. Le ciment est essentiel pour la construction de Bukavu. La majorité du ciment utilisé provient d’autres régions, situées à environ 50 Km de la ville, notamment au Rwanda voisin. Cette situation est due à la forte demande locale, qui n’est pas satisfaite par la production de la seule cimenterie de la ville, située à Katana en territoire de Kabare. En effet, selon une étude de Dejeant et al. (2021), plus de 60% des pays africains importent entre 50 et 100% du ciment consommé. En outre, l’industrie du ciment est l’une des plus grandes sources d’émissions de CO₂, ce qui constitue un autre défi environnemental (Al-Sinan, et al., 2022). Les émissions en CO₂ du secteur de la construction sont principalement liées à l’importation et à la production de matériaux à forte intensité de carbone, tels que le ciment. Si au niveau français, elle contribue à 2,9% des émissions de CO₂, à l’échelle mondiale ce taux atteint 6% (Bougrain and Doutreleau, 2022).

4.2. Le bois

Le bois est utilisé pour la construction de maisons en bois, la fabrication de meubles et de coffrages, ainsi que pour la cuisson de briques. Cependant, son utilisation en construction est une cause majeure de la disparition de la flore ligneuse dans les environs de Bukavu (Ngabo et al., 2014). En effet, l'agriculture en est la première cause (36%) suivie de la braise et du bois de chauffe (20%), de la construction (17%), du bois d'œuvre (15%) et enfin de la briqueterie (12%).

Ce bois provient des forêts (43,7 %), des jachères forestières (12,7 %), de l'ouverture des champs (11,3 %) et de plantations d'eucalyptus (32,4 %) (Imani, 2021). En effet, bien que certaines plantations d'arbres soulagent la pression sur les forêts, leur exploitation non durable accélère la déforestation autour de la ville (Chuma et al., 2021, Ngabo et al., 2014). L'exploitation du bois de construction ou d'œuvre dans les forêts du Sud-Kivu, elle aussi se fait souvent illégalement et en toute ignorance des normes de conservation (Imani, 2021; Isumbisho et al., 2013). Les forêts de Mwenga, de Kalonge et de Bitale sont les principales sources de provenance du bois qui atteint la ville de Bukavu malgré le mauvais état des routes (*I.VEB 202304 LS2, 14,11%*) et la difficulté des camions à s'y déplacer en saison de pluies (Isumbisho et al. 2013). Il est aussi noté que les espèces Buchai (*Lebrunia buchaie*), Kibale (*Beilschmedia oblongifolia*) et Licheche (*Ocotea michelsonii*) sont endémiques du Kivu et encore plus utilisées dans le commerce du bois.

Dans la construction des charpentes, le bois le plus utilisé est *Grevillea robusta* vu qu'il est plus résistant au soleil, n'absorbe pas de l'eau et ne se plie pas. Dabral et al. (2021) précisent que les espèces exotiques comme le *Grevillea robusta*, à croissance rapide, avec une grande importance écologique et économique ; sont souvent utilisés en agroforesterie dans le milieu et à part la production du bois, assouplissent, fertilisent et humidifient le sol, réduisent la présence des mauvaises herbes, facilitant la culture ultérieure sur les parcelles (Kull et al., 2019). Toutefois, ce choix porté sur le *Grevillea* pourrait conduire à la surexploitation de cette espèce. En dehors du *Grevillea*, le *Libuyu* est aussi utilisé à des endroits où il sera en contact avec de l'eau car il l'absorbe alors que le *Buchai* se déforme au contact de l'eau (*I.Ir 202304 LS6, 2,77%*).

4.3. Les briques

A Bukavu, les briques sont utilisées autant pour construire des maisons simples que des très grands bâtiments, ou même comme éléments décoratifs d'arcs, de piliers ou dans la couverture de maisons faites d'autres matériaux. Elles proviennent principalement de

Nyangezi et Ngweshe en territoire de Walungu (*I.VEBR 202304 SN16, 2,41%*), deux zones rurales situées à 20 à 30 km au sud et sud-ouest de Bukavu, et dotés marais à sols argileux et d'une grande quantité d'eau. Elles sont acheminées en ville par camions.

Après l'agriculture, la deuxième utilisation des marais dans les territoires de Walungu et Kabare est la production de briques (Chuma et al., 2021). Avec la croissance démographique de Bukavu, la briqueterie est passée d'une activité à petite échelle, à un principal pourvoyeur d'emplois et de revenus aux ménages avec un effet multiplicateur sur l'économie des zones environnantes. Cependant, elle a également augmenté son impact négatif sur l'environnement, tels que la réduction de la diversité végétale des écosystèmes et l'impact négatif sur la production agricole de la région concernée (Chuma et al., 2022).

En effet, pour la fabrication des briques dites "cuites", il est nécessaire de décaper le sol, de le modeler et de le recouvrir d'espèces végétales (généralement celles qui poussent dans les marais) (Bahati et Bitijula, 2018). Ces espèces végétales sont *Cyperus sp.*, *Carex sp.*, etc. et d'autres herbes hygrophiles poussant dans ces marais. C'est la raison pour laquelle ce matériau est aujourd'hui critiqué du fait de la raréfaction du bois et de la pollution atmosphérique due à la cuisson (Chuma et al., 2021). Par la suite, les briques sont séchées pendant une semaine à l'ombre, puis pendant deux à trois mois au soleil. Les briques sont ensuite empilées au niveau de la route, à tête d'hommes et à dos de femmes, après avoir été grillées pendant un jour et une nuit dans un four. De là, elles sont disposées dans des camions à destination vers les chantiers (*FG.EBri 2023.06 LSB, 23,09%*).

Les briques de Ngweshe sont préférées à celles de Nyangezi en raison de leur dureté et de leur résistance. Certains interlocuteurs rapportent cette appréciation dans ce sens : "*...Il y a également des briques qui proviennent de Ngweshe. Elles sont bonnes que celles de Nyangezi selon moi parce qu'elles sont dures et ont un bon comportement dans le long terme. Cela se remarque même lors du déchargement des briques*" (*I.IR 202304 LS10, 18,73%*), "*.. Par exemple, en déchargeant 1000 briques de Nyangezi, tu peux en casser par exemple 100 alors que pour les briques de Ngweshe, tu peux avoir seulement 30 casses.*" (*I.VEBR 202304 SN1 6,31%*). "*Elles sont plus achetées ici et ont une bonne forme plate que celles de Ngweshe. Elles sont plus aimées par nos acheteurs*" (*I.VEBR 202304 LS, 5,01%*).

En effet, les routes qui connectent Nyangezi et Bukavu constituent un atout essentiel pour la région, car elles stimulent la demande de briques et d'autres fournitures pour le secteur de la construction comme également le bois (Ferdinand et al., 2014). Cependant, malgré leurs formes plates, elles coûtent plus cher que celles de Ngweshe. Le facteur le plus dominant pour la

détermination du prix reste la dureté ou la capacité à résister au choc qui reste influencée par le type de terre utilisé ainsi que le temps de cuisson. Il y a aussi d'autres aspects pris en compte pour la détermination du prix des briques, à savoir : la qualité de l'argile, les dimensions de la brique, la saison de production, les différentes taxes (chefferies, péage route), la location du camion, le coût du chargement, le coût du déchargement, le mode de cuisson ("briques industrielles" pressées et cuites; et "briques locales", cuites mais non pressées).

4.4. Les moellons et les graviers

Contrairement aux sable, bois et briques exploités quasi-exclusivement assez loin de la ville, les moellons et les graviers sont exploités dans des carrières dans ou très proche la ville (*I.VEG 202304 SN21, 2,95%*). Ils sont exploités artisanalement (généralement par les hommes) dans des carrières utilisant des outils rudimentaires tels que le marteau, la barre des mines, les lames des voitures et les burins (*I.VEG 202304 LP22, 3,44%*). Cependant, dans certaines carrières facilement accessibles par route, la production est parfois mécanisée. Ceci permet d'augmenter la production et de réduire certains risques. Les matériaux sont ensuite transportés par camion vers les chantiers. Parfois, certains camions entreposent les matériaux en périphérie de la ville, d'où ils sont vendus progressivement.

Le mauvais état des routes ne permet pas aux camionneurs de bien effectuer leur travail et cela a des répercussions sur le prix du transport étant donné que ce dernier dépend du trajet (Chokola et al., 2019). Une particularité s'observe pour les graviers (parfois les moellons), le trajet n'est pas long étant donné qu'ils sont récupérés au niveau de Bwindi (dans la commune de Bagira) et que certains exploitants préfèrent acheter les moellons un peu loin de la ville et le transformer en graviers tout au long des routes de Bukavu où les acheteurs peuvent facilement les prendre. C'est ainsi qu'on remarque la naissance des carrières à certains endroits (ceux de Bwindi, ou de Giyamba en commune d'Ibanda par exemple).

Il arrive que certains propriétaires terriens créent des carrières de pierres et de moellons issus de couches superficielles de sol dans la ville, pour agrandir leurs parcelles en vue d'une future utilisation (Bunduki et al., 2015). Cependant, les moellons et graviers issus des parcelles privées, localement appelés "kirabuye", ne répondent pas aux normes de résistance à la compression (*I.VEG 202304 SN20, 4,89%*). Aussi, leur extraction est à la base de nombreux glissements des terrains dans la ville (Butara et al., 2015). Ils sont cependant moins chers et appréciés des concasseurs car plus faciles à travailler. Pour réduire les coûts mais maintenir la qualité, les constructeurs préfèrent les mélanger à ceux de Kabare, Katana et Kashandja. La figure 4 montre l'origine des différents matériaux utilisés dans la ville de Bukavu.

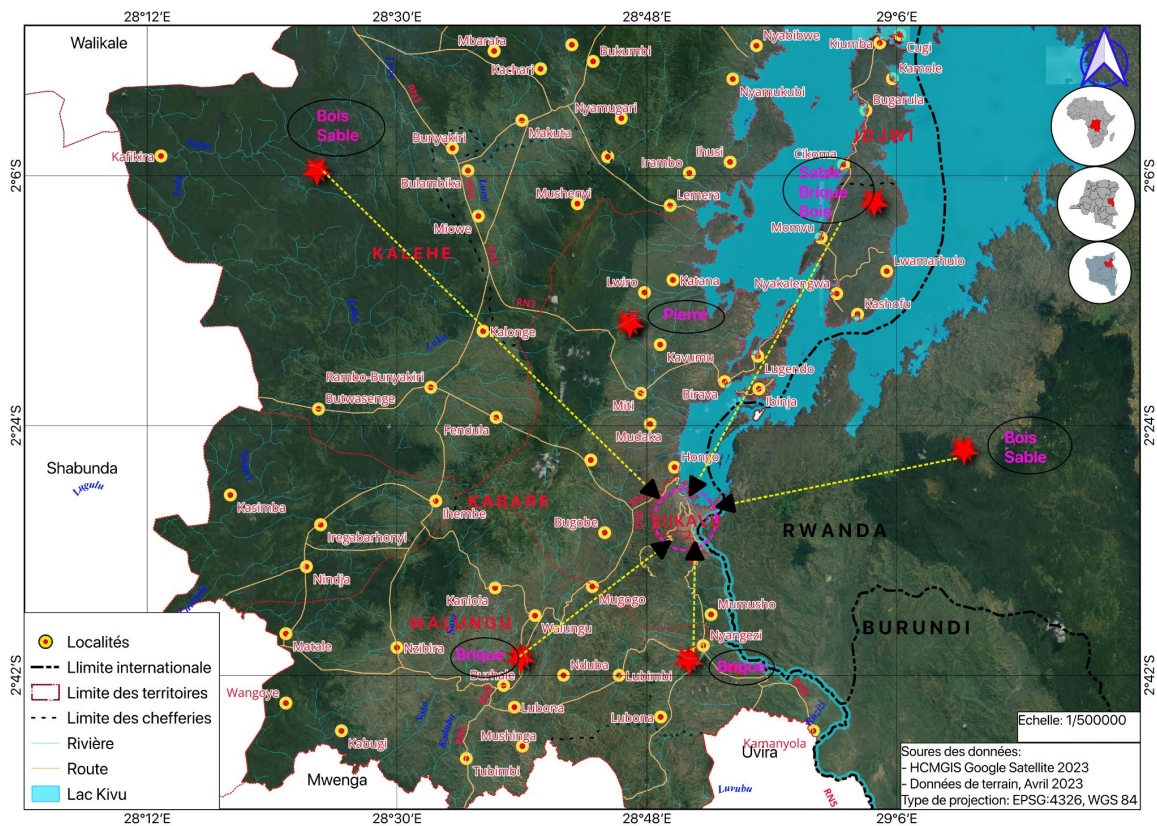


Figure 4 : Origine des différents matériaux de construction utilisés à Bukavu

5. Quantités extraites, utilisées et réutilisées

5.1. Volumes annuels

D'importantes quantités de sable, briques, graviers, bois et moellons sont écoulées chaque mois sur les marchés des matériaux de construction. Les sables et les graviers sont les agrégats représentant le plus gros volume de matière solide extraite à l'échelle mondiale (PNUE, 2019).

5.1.1. Sable et ciment

Entre 40 et 50 milliards de tonnes de sable sont exploitées chaque année dans le monde, du fait principalement de la demande du secteur de la construction (Abderrahmane, 2022). A Bukavu, des armateurs travaillent par cycles de 1 mois d'extraction et 1 mois de repos vu que les parcelles d'entreposage sont souvent petites. Ces parcelles accueillent environ 4500 m³ de sable et donc une moyenne de 117.000 m³ par an, soit 187.200 tonnes de sable (la masse volumique du sable étant de 1.600 Kg/m³) par an (*J.Ar 202304 LS8, 2,39%*). Bien qu'inférieure à la moyenne mondiale (0,15 plutôt que 5 tonnes/personnes), cette extraction exerce un stress

permanent sur le lac, qui est déjà fragilisé par la pollution et la pêche intensive. Sachant qu'il faut une dose de ciment pour trois doses de sable, on peut déduire que la consommation annuelle en ciment est de 62.400 tonnes dans la ville de Bukavu. En effet, la construction des grandes villes nécessite généralement des grandes quantités de sable et de ciment. Balegamire et al. (2022) montrent que la demande en sable naturel quoiqu'elle soit une ressource non renouvelable est en train de monter en flèche. Le béton, le matériau de construction le plus utilisé dans le monde, est principalement constitué de sable et de ciment (Guyard et al., 2022). En moyenne, 285 kg d'équivalent CO₂ sont libérés par m³ de béton si l'on tient compte des 280 kg de ciment. La consommation mondiale annuelle de béton (6 milliards de m³) entraîne donc des émissions d'équivalent CO₂ d'environ 2 milliards de tonnes principalement liées à la présence du ciment (Feraille et al., 2022).

5.1.2. Briques

Les vendeurs de briques estiment qu'ils écoulent généralement un camion chacun, soit 4.000 à 5.000 briques, par semaine (*I.VEBR 202304 LP17, 4,31%*). Le nombre de camions vendus par les producteurs est l'élément sur lequel les Coopératives des Briquetiers fondent leurs projections. A Nyangezi, ceux-ci varient entre 150 et 160 camions par mois en saison sèche et 80 camions pendant la saison de pluie de 5.000 briques (*FG.COBri2 2023.06 LSB, 8, 72%*). Ceci équivaut à environ 6.675.000 briques par an, le poids d'une brique étant de 1,8 kg (Ferf et al., 2014), on a une production de 12.015 tonnes des briques.

Cependant, la Coopérative de Nyangezi a affirmé avoir vendu environ 13,6 millions de briques en 2022 sans même tenir compte des fraudes potentielles de certains camionneurs renégats et de la présence d'autres coopératives dans la région (*FG.CoBri. 2023.06 LSB, 2,08%*). Ces chiffres demeurent inférieurs à ceux trouvés par Bahati et Bitijula (2018) rapportent que 60.000 à 120.000 briques sont chargées chaque jour dans des camions pour Bukavu, soit environ 22 à 44 millions des briques chaque année. Cette différence serait en effet dû au fait que certains exploitent opèrent en dehors des procédures prévues par les coopératives et retrouvent ainsi leur production non enregistrée sur le total annuel rapporté par les coopératives.

5.1.3. Bois

Les vendeurs suggèrent que la quantité de bois vendue à Bukavu est variable et dépend de nombreux facteurs, tels que la demande du marché, la disponibilité du bois et le coût du bois. Il est donc difficile de quantifier précisément la quantité de bois utilisée pour construire la ville. Cependant, se basant sur le fait que certains vendeurs peuvent écouler leur stock rapidement et se réapprovisionner plusieurs fois par semaine, tandis que d'autres peuvent écouler leur stock plus lentement et se réapprovisionner moins souvent. On a trouvé une moyenne qui

varie entre 200 et 1000 pièces vendues par mois par vendeur. Un ingénieur a ajouté ceci sur le bois: “ *On peut aller jusqu’à 700 planches pour le coffrage et la dalle d’une maison classique (I.IR 202304 LS4, 5,52%)*”.

Ainsi chaque année, la construction à Bukavu utilise environ 186.900 planches. Cette quantité est calculée à partir du ratio briques/planches dans les maisons moyennes de Bukavu (tel que donné par les ingénieurs), qui est de 25 000 briques pour 700 planches. Les dimensions moyennes des planches à Bukavu étant de (m^3) 4,2x0,27x0,035, ce qui correspond à un volume annuel de 7.418 m^3 , soit 3.709 tonnes de planches par an (la densité moyenne du bois étant de 500 kg/m^3).

5.1.4. Moellons et graviers

Pour ce qui est des moellons et des graviers, les propos sur leur quantification ont été recueillis auprès des vendeurs et des extracteurs. Encore une fois, la clientèle apparaît comme étant le facteur clé de quantification. L’estimation de la quantité vendue est basée sur le nombre des camions écoulés (*I.VEG 202304 LP23, 8,00%*). Certains vendeurs peuvent vendre jusqu’à 20 camions de graviers par jour (*I.VEG 202304 SN21, 5,47%*). Selon les calculs des ingénieurs, il faut 24 m^3 de gravier pour construire une maison classique de 25.000 briques. Si la ville consomme annuellement 6,675 millions de briques, elle consomme donc environ 6.408 m^3 de gravier, soit 10.252,8 tonnes (la masse volumique moyenne du gravier étant de 1.600 kg/m^3).

5.2. Volumes cumulés

Les ingénieurs de construction estiment la quantité des matériaux qu’il faut pour construire une maison moyenne (trois chambres, un salon, une cuisine et deux salles de bain) nécessitant : “*au moins 25 000 briques, 4 bennes de sable de 6 m^3 , 2 bennes de graviers de 6 m^3* ” (*I.IR 202304 LS9, 5,52%*) et “*pour la dalle (de cette maison standard), on utilise un camion de sable de 6 m^3 et 2 camions de graviers*” (*I.IR 202304 LS7, 3,51%*). Il convient de préciser que ces dimensions sont inférieures aux besoins de famille vu qu’en RDC le nombre d’enfant par femme est de plus de 5.4, soit plus de 7 personnes par ménage, et très fréquemment plus de 10. Cependant, le coût de construction d’une maison correspondant aux besoins du ménage est hors de portée pour la plupart des résidents de la ville de Bukavu. Ceci est encore plus évident dans des quartiers plus pauvres des communes de Kadutu et Bagira. De surcroît, la taille élevée des ménages réduit sensiblement le nombre de ménages comparativement à une ville de plus faible natalité mais à population similaire. Ces deux facteurs ont pour conséquence de réduire sensiblement la quantité de matériaux consommées pour loger le 1,25 de personnes que représente la population de Bukavu.

Connaissant le nombre de maisons dans la ville et leurs dimensions (tableau 1), il est donc possible de faire des extrapolations sur les quantités de matériaux utilisées dans la ville et pour chaque commune.

Tableau 1: Paramètres structuraux sur les bâtiments de la ville de Bukavu

Paramètres	Commune			Nbre/ Moyenne
	Bagira	Ibanda	Kadutu	
Nombre de bâtis	43322	48937	30618	122877
Densité de bâtis (Nbre/Km ²)	1868.9	3673.9	4590.4	3377.7
Superficie totale (Km ²)	2.3	3.6	1.8	7.7
Superficie couverte par les bâtiments (%)	9.8	27.3	27.6	64.7
Superficie moyenne (m ²)	52.6	74.4	60.1	62.4
Briques (tonnes)	2563579.35	4096026.9	2070159.53	8729765.78
Sable (tonnes)	2734484.64	4369095.36	2208170.16	9311750.16
Ciment (tonnes)	911494.88	1456365.12	736056.72	3103916.72
Graviers (tonnes)	3327129.6	3495276.288	1766536.13	8588942.02
Planches (tonnes)	19938950.5	31857987	16101240.8	67898178.3

Source: Calculs effectués à partir des données OSM (2023)

Les résultats issus du tableau 1 montrent qu'en termes de nombre des bâtis, la ville contient environ 122.877 maisons, avec la commune d'Ibanda contenant le plus grand nombre. En effet, Ibanda abrite le centre-ville ainsi que de nombreux bâtiments gouvernementaux et commerciaux depuis la création de la ville de Bukavu (Bikubanya et al., dans la même série). Dans les villes africaines horizontales comme Bukavu, la majorité des habitations sont construites en un seul étage et rez-de-chaussée. Cela signifie que les quantités de matériaux nécessaires pour construire une maison ont été multipliées par deux. Ce tableau illustre donc

que la pression sur les matériaux de construction est également d'actualité à Bukavu. On peut constater que la ville a déjà consommé près 8,7 millions de tonnes de briques, 9,3 millions de tonnes de sable, 3,1 millions de tonnes de ciment, 8,5 millions de tonnes de graviers et 67,9 millions de tonnes de bois. Sachant également qu'un four de 1000 briques consomme environ 1m³ de bois pour la cuisson, on peut donc constater que plus de 4,849 millions de m³ de bois ont déjà été consommés pour la fabrication des briques des maisons de la ville de Bukavu.

Ces chiffres sont alarmants, car ils montrent que Bukavu consomme une quantité importante de matériaux de construction. Cette consommation a un impact négatif sur l'environnement, car elle contribue à la déforestation et à l'épuisement des ressources naturelles. Cependant, il faut noter que cette estimation ne prend pas en compte le fait qu'une superficie non négligeable de la ville est construite en matériaux non durables, principalement les planches. Cela signifie que la pression sur la forêt serait beaucoup plus grande que celle issue de l'estimation ci-dessus.

En effet, déjà en 2020, Huang et al., ont montré que la consommation mondiale de matériaux de construction a triplé, passant de 6,7 milliards de tonnes en 2000 à 17,5 milliards de tonnes en 2017. Entre 20 et 50 milliards de tonnes de sable sont extraites par an et ce chiffre est anticipé de croître jusqu'à 60 milliards de tonnes d'ici 2030 (Gallager et Peduzzi, 2019). Dans certains pays, cette croissance peut avoir de fortes implications financières. En effet, Les sables et graviers sont les matériaux de base méconnus de nos économies. Ils sont exploités dans le monde entier, les agrégats représentant le plus grand volume de matériaux solides extraits à l'échelle mondiale (Peduzzi, 2014). En Inde par exemple, l'industrie du sable représente une valeur de 2 milliards de dollars américains (Mahadevan, 2019).

Cependant, la densité des maisons est plus élevée à Kadutu (figure 5). Cela est probablement dû au fait que Kadutu est une commune jadis consacrée au logement de la population noire pendant la colonisation et certaines dynamiques y installées jadis n'ont pas encore changé même plus de 60 ans après l'indépendance (Bikubanya et al., dans la même série). La répartition et l'occupation spatiale des espaces se font beaucoup plus anarchiquement dans la commune de Kadutu. Tel est le cas des quartiers Kabwa Kasire, Nyakaliba et Kahuzi (Marhegane et al., 2021; Musobwa et al., 2022). Cependant, il faut noter de plus en plus, un fort morcellement se produit dans la commune d'Ibanda et sa densité augmente assez rapidement par manque d'extension de la ville alors que sa population double tous les 15 ans.

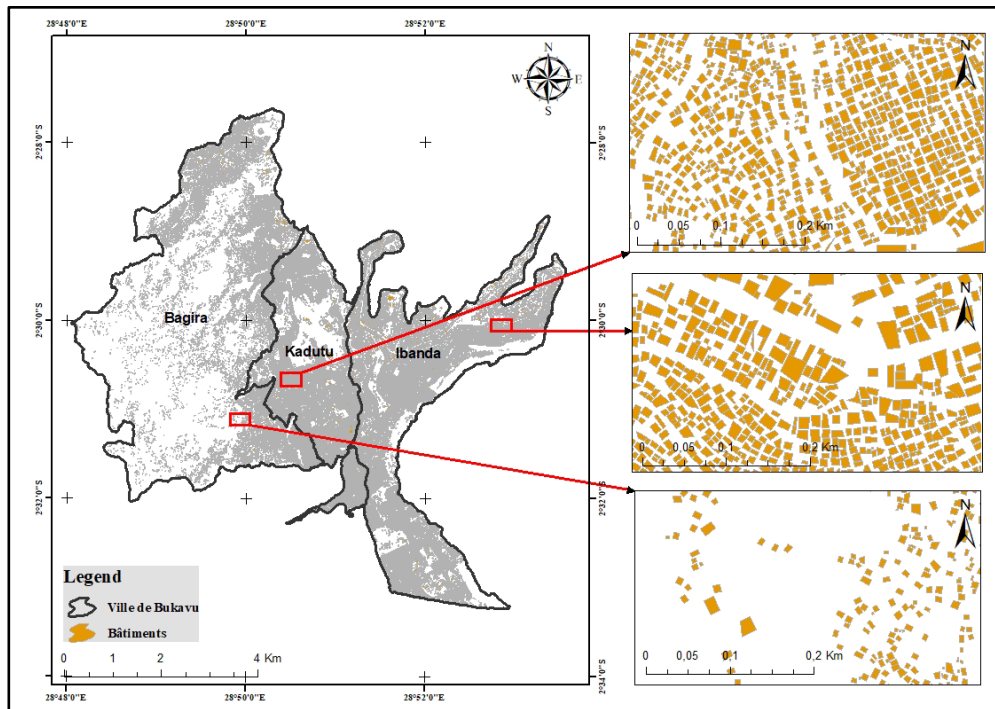


Figure 4 : Carte OSM de la ville de Bukavu montrant la densité des bâtiments avec un zoom sur l'arrangement des bâtis dans les trois communes

6. Dommages environnementaux et sanitaires et leur perception locale

6.1. Dégradation de l'environnement urbain

Suite à une urbanisation concentrée et fortement localisée à certains endroits, le changement dans les dimensions des parcelles, les types de maisons, le non-respect des règles d'urbanisme, il s'observe un type de construction ne laissant pas d'espaces verts dans la ville (*I.IR 202304 LS 10 ; 8,19%*) privant les résidents des services écosystémiques tel la purification de l'air et de l'eau, l'amélioration du microclimat et le bien-être psychologique (Sikuzani et al., 2017). En second lieu, les nouvelles constructions sont faites en remplacement des anciennes constructions consommant plus de matériaux et par ricochet induisant des impacts complémentaires à l'exploitation de ces matériaux.

Bukavu a beaucoup s'est de plus en plus éloigné de son plan d'origine qui était un plan colonial, en subissant seulement des faibles élargissements vers les milieux ruraux, mais plutôt une grande concentration de l'intérieur vers l'extérieur avec des densités de plus en plus importantes (Nyenyezi & Ansoms, 2014) . Un changement architectural s'orientant vers la gestion des petits espaces, des parcelles de 5 m*10 m (*I.Ir 202304 LS5*), par des constructions en étages irrespectueuses des normes urbanistiques. Le *saucissonnement* (morcellement

excessif) des parcelles se complicité avec les mêmes organes de l'Etat qui devraient l'empêcher (I.IR 202304 LS6 ; 6,49%). La hauteur de construction en ces petits espaces en l'absence de certaines études préalables sur le sol, les mauvais dosages de matériaux et d'autres problèmes sont la cause de plusieurs catastrophes affectant les maisons construites, leurs occupants ou leur environnement (problèmes de canalisations, d'humidité excessive, inondations, incendies, chute des maisons ou éboulement des terrains, etc) directement ou des années après leurs constructions (Bunduki et al., 2015). Malgré ces problèmes récurrent, il s'observe une absence de vision prospective des autorités urbaines sur l'aménagement, l'absence des politiques et actions publiques tenant compte de la croissance de la population, l'offre des services sociaux et des infrastructures de base comme défis de la planification urbaine (Marhegane et al., 2022). Il s'observe aussi peu d'investissement vers l'extension horizontale de la ville. En effet, Nyantende et Miti-Murhesa disposent respectivement 38 et 125 Km² des zones adéquates pour assurer un environnement urbain durable en cas d'extension aux 45 km² actuels de la ville (Muhaya et al., 2022).

6.2. Risques sanitaires pour les travailleurs

Avant d'analyser les impacts environnementaux, il est important de mentionner les risques sanitaires des travailleurs de la construction et de sa chaîne d'approvisionnement. En effet, ceux-ci perçoivent clairement les risques, surtout quand ils n'ont aucun matériel de protection : « *Le moellon peut avoir un impact lorsque tu fais la fondation et qu'une pierre tombe sur ton pied, ça crée un danger. Et lorsque tu fais le mortier, avec le ciment, si tu le touches longtemps, il fait durcir la main. D'où les mains des maçons sont dures. Il peut aussi enlever la peau (I.IR 202304 LS 6 ; 2,33%).* » « *Oui, il y en a, par exemple le ciment. Il est composé de produits chimiques. Et tout produit chimique a un impact sur la santé car si tu l'aspirez, il peut t'étouffer (I.IR 202304 LS 6 ; 2,33%).* » Parmi tous les polluants de la construction, la poussière est le polluant le plus important qui menace la santé des travailleurs. Les activités telles que l'extraction primaire ou l'exploitation de roches contenant du quartz, en particulier le creusement de tunnels et l'exploitation de carrières ; le forage, le découpage, le broyage à sec, le grattage, le sablage et la démolition de bâtiments et d'autres matériaux contenant du quartz ou de la cristobalite ; et la manipulation de matériaux finement broyés dans la fabrication de céramiques et de briques, le découpage, le meulage et le forage du béton et de la pierre sont des activités courantes qui génèrent des quantités considérables de poussière (Li et al., 2019).

6.3. Déforestation et dégradation des écosystèmes terrestres

L'urbanisation exerce une pression touchant non seulement les forêts mais aussi d'autres écosystèmes autour des villes. Bukavu et ses environs ne sont pas épargnés (Chako et al., 2022). La quantité de bois mobilisée lors de la cuisson des briques entraînant un vaste déboisement des forêts naturelles et/ou plantées. Les 4,8 millions de m³ de bois estimés par la consommation moyenne des briquetiers (FG.EBri.LSB.2023.06) constituent un grand problème environnemental. Cette déforestation n'est pas ignorée par les acteurs, mais aucune action n'est hélas entreprise pour ralentir la coupe. L'Etat se limite à collecter les taxes pour le reboisement, plutôt que de s'en assurer. Cette perception de l'Etat qui abandonne sa responsabilité à la protection des forêts s'étend aussi aux extracteurs de sable qui doivent défricher des bois avant de commencer leur exploitation, mais n'ont aucune pression pour restaurer les espaces qu'ils ont exploité. *“Dans le passé, l'exploitation était bien organisée et là, on exigeait aux exploitants de reboiser dans les sites où ils exploitent du sable. Parce qu'on déboisait les endroits exploités (I.AX 202304 GP 24 ; 2,46%)”* dit un armateur. Un vendeur de briques explique: *« Oui, nous le (la déforestation) savons, cependant quoi faire ? Que les arbres restent dans la forêt alors qu'ils peuvent nous procurer de l'argent ? C'est l'homme qui plante les arbres, donc à un moment il faut planter ensuite couper et planter les autres et c'est pourquoi nous payons les taxes, pour voir si 'on' va planter d'autres arbres après abattage. Le nombre d'arbres a diminué. Les forêts sont déjà éloignées. Avant on faisait nos achats un peu plus près de Kavumu à INERA mais aujourd'hui les forêts sont devenues très éloignées car plus les gens coupent les arbres, plus les forêts s'éloignent (I.VB 202304 SN05 ; 6,21%).*

La production de briques participe aussi à la dégradation des sols surtout les sols argileux des marais qui sont plus utilisés dans la fabrication des briques. A la fin de l'exploitation d'un marais, celui-ci est abandonné et avec une flore perturbée. Les plantes herbacées qui se trouvent autour des marais sont utilisées dans la cuisson comme couverture des briques sur les fours. Une utilisation qui attaque la biodiversité non seulement des herbes utilisées mais aussi des organismes biologiques vivants qui ont ces herbes comme biotopes. Il faudrait au moins 5 ans pour que la terre puisse se reformer et que le terrain soit de nouveau exploitable. Ce terrain utilisé de nouveau est appelé: *“Prolongation”* (FG COBri LSB.2023.06). Bien que ce terrain a à nouveau emmagasiné de l'argile, cette période de repos ne suffit pas à la restauration de son rôle écosystémique. De plus, il pourrait y avoir des problèmes sanitaires chez les ceux qui s'occupent de la cuisson des briques suite à leur exposition à la chaleur et la fumée. On enregistre également des cas de noyade dans les fossés où l'argile a été extraite. *“Oui oui, nous avons eu ce mois de mai un accident, un jeune homme de 18 ans s'est noyé dans un trou dans un chantier, en 2022 on a enregistré autour de 3 accidents mortels (FG COBri2 LSB 2023.06, 11,38%).”* explique une responsable de coopérative.

En effet, les effets de la production des briques sur la déforestation ont été documentés par Bahati & Bitijula (2018) dans le groupement de Karhongo-Nyangezi. Pour ces auteurs, plus de 32,9 millions briques en moyenne sont produites annuellement afin d’approvisionner la ville de Bukavu, entraînant une énorme pression sur les bois et les herbes qui servent pour la cuisson et la couverture de ces briques.

Le bois est utilisé non seulement dans la cuisson des briques mais aussi directement dans la construction (fabrication des échafaudages, coffrage pour la coulée du béton). Pendant que les fabricant des briques acceptent le gros des espèces de bois pour leur cuisson, les acteurs de la construction et du bois d’œuvre sont beaucoup plus sélectifs. Cela exerce une pression beaucoup plus accrue sur certaines espèces prisées. Il observe aussi la rareté de certaines espèces sur le marché, remplacée par d’autres non utilisées auparavant (*I.VEB 202304 LS2*). Après les quantifications indirectes, plus de 65.700 m³ des planches ont déjà été coupés dans certaines espèces de bois pour être utilisés dans la construction.

Le changement de l’occupation de sol, principalement la déforestation, met donc le sol à nu, l’exposant à l’érosion. Dans les alentours de Bukavu, précisément dans le territoire de Kalehe, source importante de bois qui alimente la ville, il a été observé dernièrement une profonde érosion citée comme une catastrophe naturelle (Le Monde, 2023; VOA, 2023). Certains rapports attribuent cette catastrophe à une déforestation non contrôlée dans le bassin versant, le long des berges de rivières (CEREIAD, 2023). Les mêmes dégâts d’érosion sont directement observés lors de l’exploitation des pierres et mettent en danger la santé et la vie des exploitants. En effet, le défrichage de terrain suivi de leur exploitation pour l’extraction de pierres, s’accompagne en plus des dégâts sanitaires considérables allant des blessures graves jusqu’à la mort des exploitants : « *oui tu peux te blesser, tu peux être en train de couper (tracer) un terrain et puis la colline te tombe dessus, si tes collègues ne sont pas là tu deviens MIMILELO, et tu ne boiras pas sur le KALEOLEO (I.VEG 202304 LP 22 ; 2,48%)* » ; un exploitant des graviers ajoute : « *Beaucoup de gens sont handicapés à cause de ce travail (I.VEG 202304 LS 4 ; 7,06%)*. Malheureusement, conscients des différents dangers, les exploitants et même les maçons et aide-maçons n’utilisent pas des protections : « *On utilisait les protections, lorsqu’on portait de cache-nez, on a vu que ça nous fatiguait et on a laissé ça, et nous on peut vouloir avoir (P : des gants, casque, etc) ; mais on a pas des moyen (I.VEG 202304 LP 22 ; 2,48%)*”.

Si nous rentrons dans la ville, le déboisement est à l’origine de plusieurs éboulements et cause plusieurs dégâts matériels et humains (Marhegane, 2022). Les études de Chako et al. (2022) et Muhaya et al. (2022) reviennent sur les risques d’érosion dans la ville de Bukavu en donnant

les endroits à hauts risques d'érosion sur lesquels malheureusement se font la construction des maisons.

6.4. Pollution de l'eau et de l'air

L'extraction du sable « lavé » entraîne non seulement une perte de la biodiversité mais aussi perturbe le biotope du lit de la rivière. Elle peut occasionner la perturbation de l'habitat, l'altération des zones riveraines et les modifications du transport des sédiments en aval, très variables et dépendant des caractéristiques de la rivière; les attributs de l'écosystème affectés comprennent la dérive des macroinvertébrés, les mouvements des poissons, l'abondance des espèces et les structures des communautés, ainsi que la dynamique du réseau trophique (KoeHNken et al., 2020). L'extraction illégale et incontrôlée de sable est la plus courante, entraînant la réduction du niveau des eaux souterraines et de la transparence de l'eau, l'augmentation de la turbidité de l'eau et même un impact négatif sur les oiseaux vivant de ces eaux (Bhatawdekar et al., 2021).

L'industrie de la construction contribue également à la pollution de l'air. La production de briques est une source importante de rejet de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'air comme l'explique les briquetiers: *“La fumée produite des fours contient du CO₂ et peut polluer l'environnement. En grande quantité, cela peut nuire à l'environnement. Cependant, nous n'en produisons pas tant que ça, car nous avons de petits fours. Si c'était une production industrielle, cela aurait beaucoup plus d'impact car ça produirait plus de gaz toxique (FG.COBri 2023.06 LSB, 5.06%).”* Ce qui est souvent ignoré, est que la cuisson incomplète produit du monoxyde de carbone (CO) et d'autres gaz toxiques à l'homme. Il est cependant important de préciser que la contribution de la cuisson des briques au réchauffement climatique n'est pas similaire causé par les énergies fossiles dans les transports et la machinerie. En effet, celle-ci provient du bois et a été capturé de l'atmosphère seulement quelques années avant son utilisation. Le CO₂ perturbant l'équilibre climatique de la planète est celui produit par des sources capturées depuis plusieurs millions d'années et fossilisées sous forme de carburant. C'est le cas par exemple des extractions motorisées de sable 'non lavé' dans les carrières : *“À Kalehe, on utilise des machines. Ces machines font en même temps l'extraction et le chargement du sable dans des camions. Ces machines quittent la ville et se dirigent vers Kalehe par la route, vu que celle-ci est bonne et qu'il y a beaucoup de sable à Kalehe. (I.Ar 202304 LS8, 11, 20%).”*

En plus de la pollution liée à l'exploitation des matériaux, il y a une pollution issue de la vie urbaine. En effet, la croissance urbaine s'accompagne d'une production importante de déchets qui en rencontrant une mauvaise gestion urbaine de déchets est à la base de la pollution des

eaux. Outre les déchets ménagers, il y a les déchets de construction, entreposés ici et là dans la ville et finissent dans les caniveaux et rivières. A Bukavu, Zirirane et al. (2014) signalent la pollution des eaux des rivières Kahwa et Mpungwe, deux affluents du lac Kivu en attribuant le déversement des déchets, les ruissellement des eaux usées et des fosses septiques, l'agriculture et le lessivage de terre comme causes de la pollution. Il se dégage des conséquences sur la biocénose des rivières et du lac Kivu. Par rapport à la biocénose du lac, les parties littorales dans lesquelles se trouve la plupart des zones de frayères sont menacée par les constructions anarchiques, la sédimentations et la boue issue du sol qui se déverse du jour au jour dans le lac par les activités anthropiques (Tchangaboba et al., 2018). Ces actions anthropiques en plus de la pêche des alevins de poissons constituent un risque d'extinction de certaines espèces de poissons dans le lac (Akonkwa et al., 2017).

En général l'urbanisation avec toutes les activités connexes qu'elle implique a des sérieux impacts sur l'environnement et sur la santé humaine. Ces problèmes sont encore plus accentués par le non-respect de règles sur l'urbanisation et la construction. Utilisant des matériaux dont la plupart sont non renouvelables et dont les dommages ne sont pas facilement remédiables à l'échelle de la vie humaine, une gestion rationnelle devrait s'imposer dans ce domaine. Malheureusement même pour les différents acteurs qui interviennent dans ce secteur, les matériaux, un don de Dieu ne s'épuisent pas et négligent ainsi les impacts de leurs activités sur l'environnement :

« Il n'y en a pas. En tout cas, je ne les vois pas. Nous faisons notre activité ici et on finit tout ici. Ces briques, c'est de la poussière en quelque sorte. Ça ne peut pas détruire l'environnement (I.VBR 202304 LP18 ; 2,73%) » ; « on s'est rendu compte qu'après l'exploitation le sable resurgit encore dans la carrière. Après 2 à 3 ans quand on rentre dans la même carrière on a l'impression que le sable est de nouveau là », il ajoute en disant : « je ne crois pas que cette activité perturbe les poissons parce qu'on n'accoste pas à des endroits ou le lac est profond (I.Ar 202304 LS 8) » ; « Non, ça ne peut jamais s'épuiser, les pierres grandissent. Si ça s'épuise à un endroit, tu creuses à un autre endroit et tu vas trouver encore plus de pierres (I. VEG 202304 SN 20 ; 9,95%) ».

6.5. Estimation de l'empreinte carbone de matériaux de construction

Bien que moins perceptible à l'échelle locale, l'empreinte carbone des matériaux de construction est un facteur important à prendre en compte dans le développement durable. Dans la ville de Bukavu, cette empreinte est relativement faible (1597,98 tonnes de CO₂ par

an). Ceci est dû au fait que la quantité de matériaux utilisée est faible et que l'extraction et l'utilisation sont principalement manuelles, le gros de l'énergie motorisée étant utilisée pour le transport; en effet, l'extraction des matériaux de construction se fait souvent à des distances assez faibles de la ville. Cela entraîne moins d'émissions de gaz à effet de serre (Dejeant et al., 2021). En comparaison, une étude a estimé l'empreinte carbone d'une seule tour résidentielle sur une superficie de 5 000 m² à Téhéran, en Iran, à 13 076,39 tonnes de CO₂, dont 83 % et 14 % provenant du transport des matériaux et des déchets, respectivement. En effet, dans cette région, la construction est généralement réalisée à l'aide de matériaux et de méthodes de construction plus intensives en énergie. De plus, on y retrouve une infrastructure de transport plus développée, ce qui entraîne des émissions de gaz à effet de serre plus élevées pour le transport des matériaux de construction (Jafary et al., 2020).

Cependant, le transport terrestre est le mode de transport le plus utilisé pour le transport des matériaux de construction, tels que les briques, le bois et les graviers. Les camions sont responsables de la majeure partie des émissions du carbone liées à ce transport, avec des émissions de 137 g de CO₂/tonne-Km. Le sable, quant à lui, est transporté par barges sur le lac Kivu. Selon un rapport de l'Agence Européenne de l'Environnement (EEA) publié en 2021, le transport lacustre est moins polluant que le transport terrestre, avec des émissions de 33 g de CO₂/tonne-Km. Se basant sur le fait que l'émission du carbone dépend des infrastructures de transport et de la distance entre les fournisseurs de matériaux et chantiers de construction (Hao et al., 2020), une estimation de l'empreinte carbone annuelle liée au transport des matériaux de construction est présentée dans le tableau 2.

Tableau 2: Estimation de l'empreinte carbone liée au transport de matériaux de construction dans la ville de Bukavu

Matériaux	Distance (km)	Quantité annuelle (tonnes)	CO ₂ émis en tonnes
Briques	25	12015	9,91
Sable	60	187200	1474,67
Graviers	20	10252,8	6,77
Bois	30	3709,03	3,67
Ciment	50	62.400	102,96

Total	1597,98
-------	---------

A partir de ce tableau, il est clair que le transport des matériaux de construction est un important contributeur aux émissions de CO₂ (Karlsson et al., 2020). Le transport terrestre est responsable de la majeure partie de ces émissions, car il est le mode de transport le plus utilisé. En effet, le transport des briques est responsable du rejet de 9,9 tonnes de CO₂ par an, tandis que le transport du bois est responsable de 3,67 de tonnes de CO₂ par an, celui du ciment 102,96 tonnes et celui des graviers 2,03 tonnes. Ensuite, on peut noter que le sable, qui est un matériau moins polluant à transporter, est celui qui provient le plus loin. Il provoque des émissions de l'ordre 1474, 67 tonnes CO₂ .

Le transport de matériaux constitue également une source majeure de bruits, en particulier en milieux urbains. Outre son caractère désagréable, le bruit est à l'origine de problèmes de santé comme le stress, les troubles du sommeil, les maladies cardio-vasculaires et la perte d'acuité auditive. Le transport sur l'eau présente des risques de plus sur l'environnement par l'évacuation ordinaire de fond de cale contenant des hydrocarbures, les décharges de résidus ordinaires non biodégradables, la construction et l'exploitation des canaux à l'intérieur des terres et des ports ainsi que l'introduction d'espèces exogènes transportées par les barges (OCDE, 1997).

7. Life cycle assessment

7.1. Cadre théorique

Les aspects environnementaux, économiques et sociaux de la durabilité sont tous fortement influencés par le secteur du bâtiment (Bakchan et al., 2019). L'industrie de la construction génère cependant des enjeux environnementaux importants tout au long du cycle de vie des bâtiments, en particulier pendant les phases d'exploitation et de fin de vie, en plus de ses avantages économiques et sociaux (Lopez Ruiz et al., 2019). En fait, les bâtiments sont responsables d'un tiers des émissions mondiales de gaz à effet de serre, les impacts intrinsèques des matériaux de construction représentant la majorité de leurs effets sur le cycle de vie. L'augmentation des émissions de carbone reste un problème actif malgré les nombreux efforts déployés. Les émissions de carbone associées à l'environnement bâti représentent la fraction dominante de l'empreinte carbone totale de la société. Cela s'explique principalement par le fait qu'il représente l'intersection des trois principaux émetteurs : l'énergie, les transports et les bâtiments.

Actuellement, l'évaluation des émissions de carbone sur l'ensemble du cycle de vie, les normes relatives à l'empreinte carbone et le protocole CHG font l'objet d'une attention accrue. Cependant, il n'existe pas de méthode internationalement reconnue pour mesurer, déclarer et vérifier les émissions de GES des bâtiments existants de manière cohérente et comparable. L'analyse du cycle de vie du carbone des bâtiments a suscité un intérêt croissant de la part des chercheurs, des gouvernements et des parties prenantes à mesure que les conséquences du changement climatique devenaient plus perceptibles (Fenner et al., 2018). L'analyse du cycle de vie (ACV) est une méthode qui permet d'évaluer l'impact environnemental d'un bâtiment ou d'un matériau de construction sur l'ensemble de son cycle de vie. Elle prend en compte l'extraction des matières premières, la production, le transport, l'utilisation et l'élimination. L'ACV est un outil important pour la conception de bâtiments durables, car elle permet de comparer les impacts environnementaux de différents matériaux et de prendre des décisions éclairées (Fenner et al., 2018). Dans le cas des matériaux de construction, l'ACV permet de réduire l'utilisation de ressources et les émissions de gaz à effet de serre. Elle peut également contribuer à améliorer la recyclabilité des matériaux et à réduire les déchets (Huang et al., 2021).

Akanbi et al. (2018), Fenner et al. (2018) et Bayer et al. (2010) ont proposé quatre étapes spécifiques lors de l'évaluation du cycle de vie des bâtiments. Elles sont définies comme suit : fabrication des matériaux, construction, utilisation et entretien, et fin de vie. La fabrication des matériaux comprend l'extraction des matières premières de la terre, le transport des matériaux vers les sites de fabrication, la fabrication des matériaux de construction, la fabrication des produits de construction, l'emballage et la distribution des produits de construction. La phase de construction couvre toutes les activités liées à la construction du projet de bâtiment, tandis que la phase d'utilisation et d'entretien semble tenir compte de l'exploitation du bâtiment, y compris la consommation d'énergie, la consommation d'eau, la production de déchets environnementaux, la réparation et le remplacement des assemblages et des systèmes du bâtiment, ainsi que le transport et l'utilisation d'équipements pour la réparation et le remplacement. Enfin, la phase de fin de vie contribue à la consommation d'énergie et à la production de déchets dues à la démolition du bâtiment et à l'élimination des matériaux dans les décharges, ainsi qu'au transport des déchets.

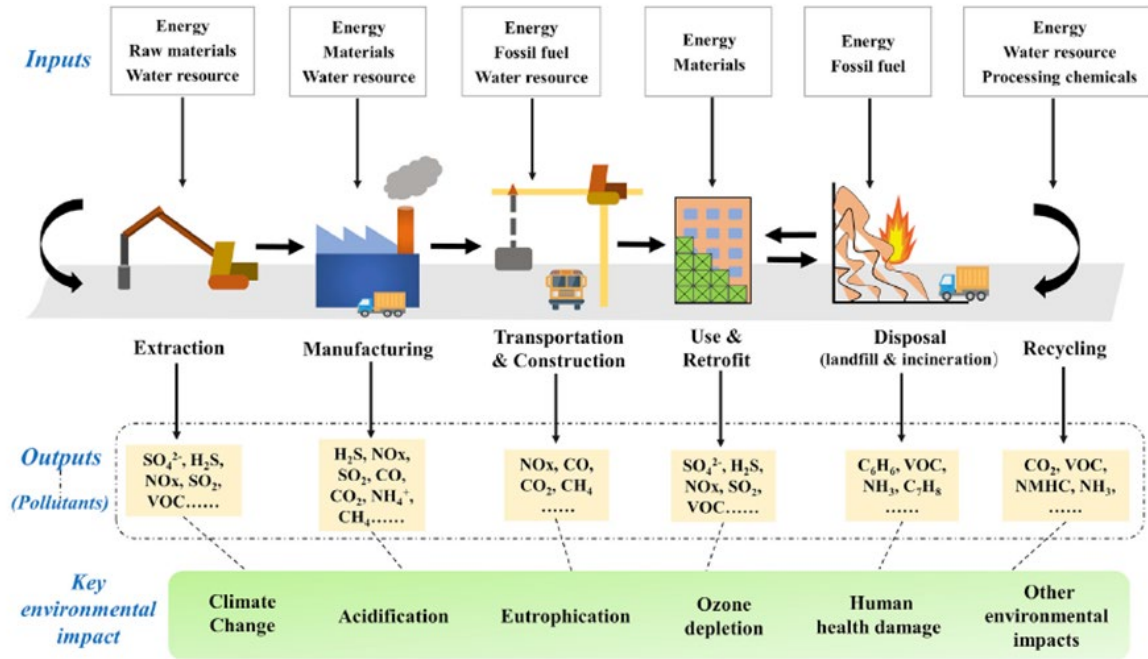


Figure 5: Empreinte carbone de l'industrie de construction

7.2. Historique de l'analyse du cycle de vie dans le domaine de la construction

Depuis une vingtaine d'années, un nombre considérable d'études ont été menées pour utiliser l'ACV afin de quantifier les interventions environnementales de l'industrie de la construction et du bâtiment (Bahramian et Yetilmezsoy, 2020). Cela s'explique par les défis uniques posés par les bâtiments, qui ont une longue durée de vie, subissant des changements importants tout au long de leur vie et impliquant de nombreuses parties prenantes. En outre, l'impact environnemental des bâtiments est fortement influencé par leur conception et la sélection des matériaux, et la normalisation est limitée en raison de la nature individuelle de la conception des bâtiments.

En effet, les coûts environnementaux des matériaux de construction se manifestent tout au long de leur chaîne de valeur, de l'extraction à la fabrication et au traitement après démolition. C'est au cours de leur fabrication que le ciment, l'acier et le béton ont la charge environnementale la plus lourde. Au stade de l'élimination du cycle de vie des matériaux, la pierre, le métal, le ciment et le bois libèrent des émissions de lixiviats contenant des acides organiques, des bactéries, des ions de métaux lourds et de nombreux polluants atmosphériques (Huang et al., 2021).

Huang et al. (2021) ont trouvé que la toxicité humaine (les métaux lourds émis lors de l'extraction des matières premières et du processus de fabrication du ciment et du béton), la

consommation de combustibles fossiles (la demande de charbon, de pétrole, d'électricité et de gaz naturel pour la fabrication du fer, des briques, du gravier et du ciment), le réchauffement de la planète et la consommation de métaux (la consommation d'énergie dans la fabrication de l'acier, du ciment et du béton. Les réactions chimiques dans la production de clinker utilisé dans la production de ciment) sont les principaux impacts environnementaux tout au long du cycle de vie des matériaux de construction. Les biomatériaux renouvelables, tels que le bois et le bambou, peuvent réduire l'impact sur l'environnement et l'épuisement des ressources en combustibles fossiles et en métaux. Le recyclage du béton, de l'acier et du bois sont des mesures efficaces pour atténuer les charges le fardeau environnemental du traitement des déchets.

Ces facteurs nécessitent le développement de méthodologies d'ACV harmonisées et normalisées afin d'évaluer et de comparer efficacement la performance environnementale des bâtiments. Bien que certaines initiatives nationales aient été lancées, une collaboration et une coordination plus larges sont essentielles pour aborder pleinement les complexités de l'ACV dans le secteur du bâtiment (Khasreen et al., 2009; Ben-Alona, 2019).

8. Vers une construction plus durable de la ville

L'explosion démographique de la ville de Bukavu, causée surtout par un exode rural massif suite à l'insécurité, au manque d'infrastructures et à la baisse de la production agricole dans les zones rurales, a occasionné un boom de la construction. Cependant, le secteur de la construction de Bukavu est confronté à des nombreux problèmes, parmi lesquels les erreurs d'aménagement, les défauts de construction (Zahinda et al., dans la même série), la construction sur des sites impropres, les constructions anarchiques ainsi que les nombreuses catastrophes (éboulements et glissements de terrains, incendies, inondations). En outre, comme prouvé dans cette étude, le secteur de la construction de la ville utilise une quantité importante de matériaux dont l'exploitation est accompagnée des impacts sur l'environnement et la santé des travailleurs et des résidents.

Les matériaux de construction ont en effet toute une série d'impacts environnementaux tout au long de leur cycle de vie, depuis l'extraction, la transformation et le transport des matières premières jusqu'à la construction, l'utilisation et la démolition et le gaspillage éventuels des bâtiments. Des mesures d'atténuation ciblant des matériaux ou des étapes spécifiques de la chaîne de valeur sont donc nécessaires (Huang et al., 2020). Ainsi, les solutions proposées ici seraient d'évoluer vers une construction plus durable de la ville de Bukavu et possiblement

vers une industrie circulaire des matériaux et de tout le secteur. Ce système permettrait de conserver la valeur ajoutée des produits et matériaux le plus longtemps possible et réduire les déchets. Dans la ville de Bukavu, cela impliquerait (1) la réutilisation des matériaux de construction, (2) l'utilisation des matériaux écologiques, et (3) un changement structurel de l'utilisation des terres et une planification urbaine durable.

En ce qui concerne la réutilisation des matériaux de construction, à Bukavu, les bois et les briques font partie des matériaux qui sont les plus couramment réutilisés, contrairement aux pierres. Comme le signalent Jiménez Rivero et al. (2016), pour évoluer vers une économie circulaire, cette stratégie consistant à transformer les déchets en matériaux réutilisables est un élément essentiel pour accroître l'efficacité des ressources et « boucler la boucle ». « *Nous arrivons à perdre le sable et le ciment. Mais nous pouvons quand même récupérer quelques briques, des pierres et des planches. Il nous arrive de réutiliser les planches* » (I.IR 202304 LS10, 2,43%) dit un maçon. Toutefois, selon les ouvriers travaillant dans la construction des bâtiments, la réutilisation du bois est possible seulement 2 fois et cela dépend de sa capacité à recueillir et évacuer l'eau. *Grevillea robusta* est l'une des espèces de bois les plus réutilisées dans la ville. Cependant, lors des travaux de construction, il faut suppléer les bois réutilisés avec du bois neuf, avec une quantité équivalente à la moitié de la quantité totale de bois. « *Déjà deux fois c'est suffisant, bien sûr si tu préfères. Les bois déjà utilisés sont secs. Par conséquent, ils ne sont pas capables de supporter une grande charge. Et lorsqu'on décide de les utiliser on doit alors faire usage d'un grand nombre de bois, un grand nombre de piliers pour le support du poids* » (I.IR 202304 LS9, 8,20%) dit un autre maçon.

Au cours de nos enquêtes, on a trouvé un marché dont la spécialité était la vente du bois de réemploi. Pour ces bois, une fois que leur cycle de vie prend fin (après la deuxième réutilisation), ils sont vendus aux particuliers qui les utilisent comme bois énergie pour la cuisson. Quant aux briques, leur réutilisation est possible dans le cas où la démolition du bâtiment où elles ont été tirées a été bien réalisée. Dans le cas contraire, elles sont utilisées pour des travaux autres que l'élévation, comme la construction des fosses septiques et les travaux de nivellement du rez-de-chaussée. En effet, selon Hubency (2023), près de 95 % des déchets de terre cuite sont revalorisés (briques ou tuiles principalement). Selon certains critères, les briques pourront être réemployées pour une nouvelle construction ou pour des travaux de rénovation car faisant partie de la catégorie des déchets inertes aux côtés d'autres matériaux comme le verre ou le plâtre.

Les autres matériaux de leur part (sable, graviers), sont irrécupérables une fois qu'ils ont été utilisés. En cas de démolition, les déchets sont jetés sur des routes en mauvais état pour

couvrir des flaques d'eau avec l'accord du chef d'avenue. « *Les briques. Elles peuvent être réutilisées une fois si la démolition de la maison a été bien faite (à l'aide d'un burin). En cas de casse lors de la démolition ou lors du déchargement, les casses sont utilisées pour faire le remblais surtout au rez-de-chaussée* » (I.IR202304LS7, 1,99%) dit un maçon à ce sujet. Dans la ville de Goma, Muhiwa et al. (2020) ont mené une étude visant à valoriser une part importante des déchets issus de la démolition de bâtiments, notamment le béton comme source de granulats pour leur utilisation dans la formulation de nouveaux bétons hydrauliques. Leurs résultats ont montré que la protection de l'environnement peut être assurée en valorisant les déchets issus de la démolition de bâtiments à base de béton d'une part ; et la préservation des réserves naturelles de matériaux d'autre part, et ces deux avantages contribuent aux objectifs généraux du développement durable.

Par ailleurs, car les taux d'extraction des matériaux de construction continuent à augmenter, il devrait exister une prise de conscience de la nécessité de développer des stratégies pour éviter le risque de manque d'approvisionnement en ces ressources. Dans ces conditions, la rareté des ressources semble aussi critique que les impacts croissants de l'extraction des ressources, de leur utilisation et de l'élimination des déchets qui en résultent (Bringezu, 2015; Sameer et al., 2018). Des nouveaux matériaux, les éco-matériaux (par exemple le métakaolin, substitut du ciment), sont donc conçus dans cette optique et pourront dans les meilleures situations devoir, à terme, remplacer les matériaux usuels. Cependant, comme le recommande Escadeillas (2006), pour inciter à l'utilisation de ces éco-matériaux et pour s'inscrire réellement dans le développement durable, il faut associer aux efforts de recherche et développement une politique volontariste. Ainsi, mieux que les éco-taxes qui viendraient augmenter le prix de certains produits (ce qui ne représente pas grand-chose sur le coût global d'une construction), des incitations fiscales pour le maître d'ouvrage seraient certainement préférables (comme cela se pratique déjà pour les énergies renouvelables).

La réutilisation des matériaux et l'utilisation des éco-matériaux devront être complétés par un changement structurel de l'utilisation des terres et une meilleure planification urbaine de la ville de Bukavu pour évoluer vers une ville durable. Cette transformation urbaine nécessitera aussi des transformations sociales autant qu'économiques. Une meilleure planification de la ville de Bukavu implique la considération des éléments suivantes : (1) l'identification des zones à géorisques (fortes pentes, risques de glissements de terrains, inondations, etc.) et le renforcement des régulations/interdictions d'occupation de ces zones; (2) un meilleur emplacement pour les industries, les décharges, les usines de transformation et un contrôle de la pollution urbaine ; et (3) une planification et mise en action de l'extension de la ville vers ses périphéries.

Références

- Abderrahmane, A., 2022. Extraction et trafic du sable côtier marocain. Projet ENACT, Numéro 28, 24p. <http://enact-africa.s3.amazonaws.com/site/uploads/2022-05-18-research-paper-morocco-sand-french.pdf>
- Akonkwa, B., Simon, A.M., Nshombo, M., & Lalèyè, L. (2017). Description de la pêche au lac Kivu. *Eur. Sc. J*, 13 (21), 1857-7881.
- Al-Sinan, M.A. and Bubshait, A.A., 2022. Using plastic sand as a construction material toward a circular economy: A review. *Sustainability*, 14(11), p.6446.
- Andersen, J. E., Jenkins, P., & Nielsen, M. (2015). Who plans the African city? A case study of Maputo: part 1—the structural context. *International Development Planning Review*, 37(3), 329-350.
- Aymar, B., Nyenyezi & An A., (2014). Accaparement des terres dans la ville de Bukavu (RDC) : déconstruire le dogme de la sécurisation foncière par l'enregistrement
- Bahati, D., & Bitijula, M. (2018). Problématique environnementale de la production artisanale des briques cuites dans le groupement de Karhongo-Nyangezi, Sud-Kivu, RD Congo. *Kivu Journal of Applied Bioscience Engineering*, 1, 133–150.
- Balegamire, C., Michellier, C., Muhigwa, J.B., Delvaux, D., Imani, G. and Dewitte, O., 2017. Numéro spécial. *Geo-Eco-Trop*, 41(2), pp.263-278.
- Balegamire, C., Nkuba, B. and Dable, P., 2022. Production of gold mine tailings based concrete pavers by substitution of natural river sand in Misisi, Eastern Congo. *Cleaner Engineering and Technology*, 7, p.100427.
- Bamigboye, G.O., Davies, I., Nwanko, C., Michaels, T., Adeyemi, G. and Ozuor, O., 2019, November. Innovation in construction materials-a review. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 640, No. 1, p. 012070). IOP Publishing.
- Baraka Akilimali, J., Bahati Shamamba, D. and Ansoms, A., 2022. Pressions sur les terres au Sud-Kivu (RDC). Quelle alternative face à la saturation agraire sur l'île d'Idjwi?. *Anthropologie & développement*, (53), pp.193-211.
- Benhelal, E., Shamsaei, E., & Rashid, M. I. (2021). Challenges against CO2 abatement strategies in cement industry: A review. *Journal of Environmental Sciences*, 104, 84-101.
- Benjamin, A., Eliane, A., Hefsiba, A., Isaac, B., & Sadiki, B., (2022). Défis de la planification urbaine dans la ville de Bukavu. *IOSR Journal Of Humanities And Social Science (IOSR-JHSS)* Volume 27, Issue 9, Series 6 (September, 2022) 53-63 e-ISSN: 2279-0837, p-ISSN: 2279-0845. www.iosrjournals.org
- Bertin, NB et Johnny, MK, 2022. Etude du rendement du café et son impact socioéconomique dans le territoire d'Idjwi, province du Sud Kivu en RD Congo. *Revue internationale d'innovation et d'études appliquées*, 38 (2), pp.366-407.

- Bhatawdekar, R. M., Singh, T. N., Tonnizam Mohamad, E., Armaghani, D. J., & Binti Abang Hasbollah, D. Z. (2021). River Sand Mining Vis a Vis Manufactured Sand for Sustainability. *Nature Switzerland*, 109, 143–169. https://doi.org/10.1007/978-3-030-60839-2_8
- Bisimwa, A.M., Amisi, F.M., Bamawa, C.M., Muhaya, B.B. and Kankonda, A.B., 2022. Water quality assessment and pollution source analysis in Bukavu urban rivers of the Lake Kivu basin (Eastern Democratic Republic of Congo). *Environmental and Sustainability Indicators*, 14, p.100183.
- Bougrain, F. and Doutreleau, M., 2022. Analyse économique de deux procédés de carbonatation accélérée de granulats de béton recyclés. *Academic Journal of Civil Engineering*, 40(3), pp.105-116.
- Bricker, D., & Ibbitson, J. (2019). *Empty planet: the shock of global population decline*. Hachette UK.
- Bringezu, S. (2015). Possible Target Corridor for Sustainable Use of Global Material Resources, *Resources*, 4: 25–54. doi:10.3390/resources4010025.
- Bunduki, K., Mushayuma, N., Tambala, T., Materanya, C., & Matembera, B. (2015). Cartographie des sites sinistrés par les glissements de terrain du 17 au 26/01/2014 dans le bassin du Lac Kivu à Bukavu, Sud-Kivu, RD Congo. *International Journal of Innovation and Scientific Research*, 14(2), 118–126.
- Butara, S., Fiama, S., Mugisho, B.E. and Mongane, A., 2015. Susceptibilité aux glissements de terrain: cas de la Commune d'Ibanda/Bukavu/République Démocratique du Congo [Sensitiveness to landslides: case of the Ibanda Urban district/Bukavu/DRC]. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 11(1), p.129.
- CEREIAD, 2023. Rapport final sur l'étude des rivières dans la zone d'intervention du projet ATEED. <https://ucbukavu.ac.cd/cereiad/> , 08.09.2023
- Chako, I. C., Kituta, J. A. R., Banda, T. S., Rugomba, P. M., Ntwali, V. M., Myango, L. P. M., Rubega, G. Ntamusimwa, V. & Jacques, K. K. (2022). Mapping of Soil Erosion Risk in Bukavu (Democratic Republic of Congo): Using RUSLE, Remote Sensing and GIS. *Open Access Library Journal*, 9(11), 1-21.
- Chuma, G.B., Mondo, J.M., Karume, K., Mushagalusa, G.N., & Schmitz, S. (2021). Factors driving utilization patterns of marshlands in the vicinity of South-Kivu urban agglomerations based on Rapid Assessment of Wetland Ecosystem Services (RAWES). *Environmental Challenges*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100297>
- Chuma, G.B., Mondo, J.M., Sonwa, D.J., Karume, K., Mushagalusa, G.N. and Schmitz, S., (2022). Socio-economic determinants of land use and land cover change in South-Kivu wetlands, eastern DR Congo: Case study of Hogola and Chisheke wetlands.

- Cokola, C.N., Zihindula, J.D.D.B. and Mufungizi, M.M., 2019. L'approvisionnement de la ville de Bukavu en produits vivriers et non vivriers en provenance de milieux ruraux du Sud-Kivu: Cas spécifique d'Idjwi sud et nord, Birava, Mudaka, Kalehe, Minova et Luhihi. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 28(1), pp.59-72.
- Dabral, A., Shamoan, A., Meena, R., Kant, R., Pandey, S. et Ginwal, H., 2021. Découverte et caractérisation de marqueurs à répétition de séquence simple (SSR) basés sur l'écrémage du génome chez *Grevillea robusta*. *Phylosophie et biologie moléculaire des plantes*. 27 (7), pp 1623-1638
- De Saint Moulin, L., (1984). Les migrations au Kivu se font-elles des zones les plus peuplées vers les zones les moins peuplées ? Séminaire sur l'érosion à Bukavu. 15p.
- Dejeant, F., Garnier, P. and Joffroy, T., 2021. Matériaux locaux, matériaux d'avenir (p. 96). CRAterre.
- EEA (European Environment Agency), (2021). Rail and waterborne — best for low-carbon motorised transport. <https://www.eea.europa.eu/publications/rail-and-waterborne-transport>
- Escadeillas, G. (2006). Les éco-matériaux dans la construction : enjeux et perspectives. Septième édition des Journées scientifiques du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton (RF)2B. Toulouse, France, 19-20 juin 2006.
- Feraille, A., Desbois, T. and Saadé, M., 2022. L'ACV dans le domaine de la construction: le cas du matériau béton. *Academic Journal of Civil Engineering*, 40(2).
- Ferf, A.J.E., Hilhorst, D. and Mashanda, M., 2014. Rural road (re) construction: Transport and rural livelihoods in the conflict-affected and fragile state environment of South Kivu (No. 2). Secure Livelihoods Research Consortium.
- Ferland, A., 2015. La conservation de la biodiversité en milieu urbain : comment aménager les villes du monde? Département de biologie à l'Université de SHERBROOKE. Travail de master.
- Florie D., Philippe G.& Thierry J. (2021). Matériaux locaux, matériaux d'avenir : Ressources locales pour des villes et territoires durables en Afrique. CRAterre 96pp. ISBN 979-10-96446-32-2.
- Ghazali, N., Muthusamy, K. and Wan Ahmad, S., 2019, August. Utilization of fly ash in construction. In *IOP conference series: materials science and engineering* (Vol. 601, No. 1, p. 012023). IOP Publishing.
- Gallagher, L. and Peduzzi, P., 2019. Sand and sustainability: Finding new solutions for environmental governance of global sand resources.

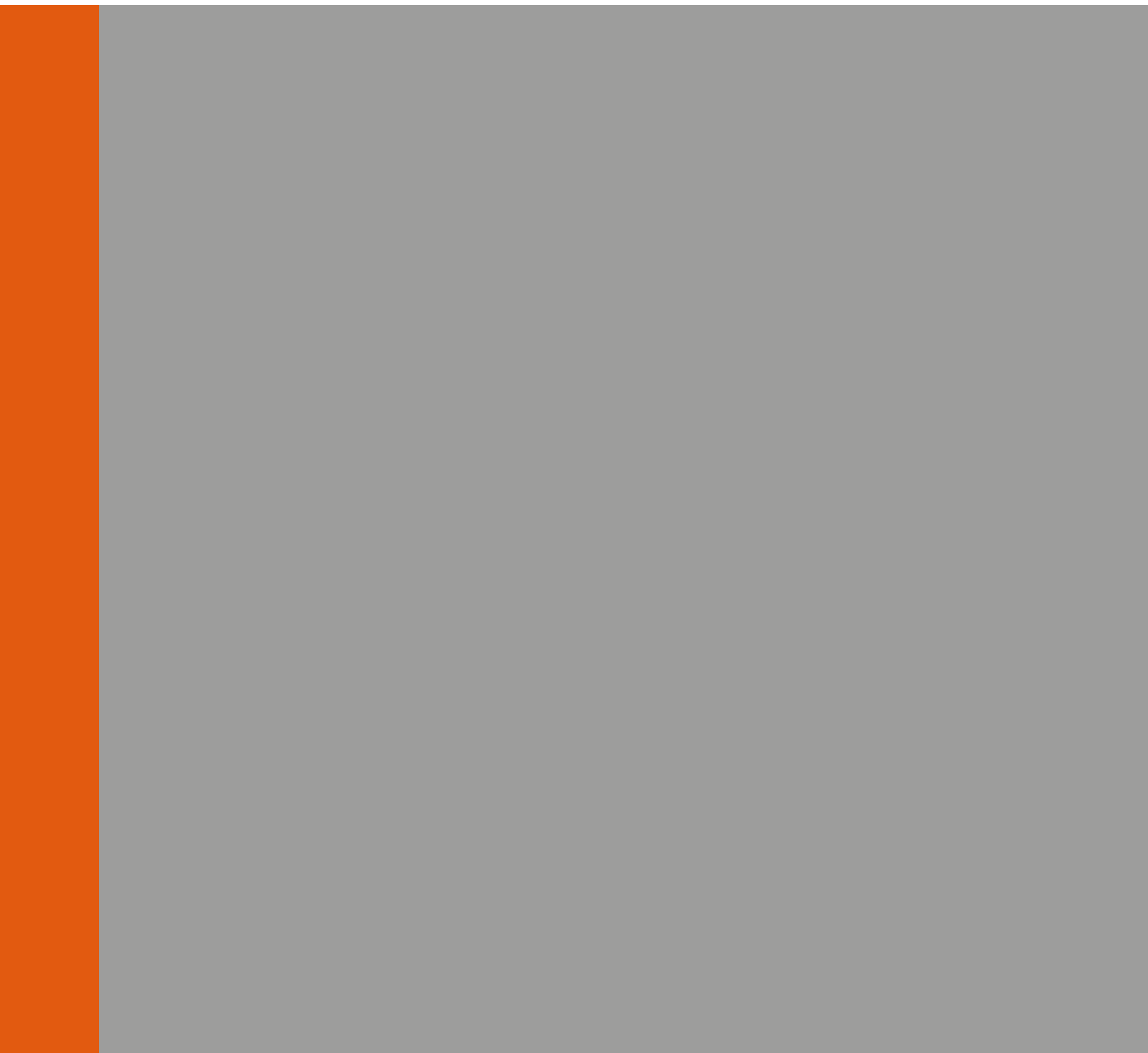
- Guyard, P., Saade, M. and Feraille, A., 2022. Carbonatation accélérée de granulats de béton recyclés quels bénéfices environnementaux?. *Academic Journal of Civil Engineering*, 40(3), pp.117-131.
- Hao, J. L., Cheng, B., Lu, W., Xu, J., Wang, J., Bu, W., & Guo, Z. (2020). Carbon emission reduction in prefabrication construction during materialization stage: A BIM-based life-cycle assessment approach. *Science of The Total Environment*, 137870. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.1378
- Herinjaka, H.R., 2022. Évaluation du potentiel de co-produits agricoles locaux valorisables dans le domaine des matériaux de construction (PALOMAC). *Matériaux*. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2022. Français. ffNNT : 2022TOU30005ff. fftel-03699668f. HAL Id: tel-03699668 <https://theses.hal.science/tel-03699668>
- Huang, B., Gao, X., Xu, X., Song, J., Geng, Y., Sarkis, J., Fishman, T., Kua, H., & Nakatani, J. (2020). A Life Cycle Thinking Framework to Mitigate the Environmental Impact of Building Materials. *One Earth*, 3(5), 564–573. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.10.010>
- Huang, B., Gao, X., Xu, X., Song, J., Geng, Y., Sarkis, J., Fishman, T., Kua, H., & Nakatani, J. (2020). A Life Cycle Thinking Framework to Mitigate the Environmental Impact of Building Materials. *One Earth*, 3 (5): 564–573. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.10.010>
- Iragi Mukotanyi, F., 2022. The hammer and/or the hoe? Analysing the linkages between artisanal mining and small-scale agriculture in South Kivu/Eastern DRC (Doctoral dissertation, University of Antwerp).
- Ishara, J., Cokola, M.C., Buzera, A., Mmari, M., Bugeme, D., Niassy, S., Katcho, K. and Kinyuru, J., 2023. Edible insect biodiversity and anthropo-entomophagy practices in Kalehe and Idjwi territories, DR Congo. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 19(1), p.3.
- Jafary Nasab, T., Monavari, S.M., Jozi, S.A. and Majedi, H., 2020. Assessment of carbon footprint in the construction phase of high-rise constructions in Tehran. *International journal of environmental science and technology*, 17, pp.3153-3164.
- Jiménez Rivero, A., Sathre, R. & Navarro, G. J. (2016). Life cycle energy and material flow implications of gypsum plasterboard recycling in the European Union. *Resources, Conservation and Recycling*, 108: 171–181. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.01.014>
- Karlsson, I., Rootzén, J. and Johnsson, F., 2020. Reaching net-zero carbon emissions in construction supply chains—Analysis of a Swedish road construction project. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120, p.109651.

- Koehnken, L., Rintoul, M. S., Goichot, M., Tickner, D., Loftus, A. C., & Acreman, M. C. (2020). Impacts of riverine sand mining on freshwater ecosystems: A review of the scientific evidence and guidance for future research. *River Research and Applications*, 36(3), 362–370. <https://doi.org/10.1002/rra.3586>
- Kull, C.A., Harimanana, S., Andrianoro, A. and Rajoelison, L., 2019. Divergent perceptions of the 'neo-Australian' forests of lowland eastern Madagascar: Invasions, transitions, and livelihoods. *Journal of Environmental Management*. 229, pp 48-56. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.06.004>
- Le Monde, 2023. Nous continuons à retrouver des corps ensevelis dans la boue: dans l'est de la RDC, le bilan des inondations d'alourdit. https://www.lemonde.fr/afrique/article/2023/05/10/nous-continuons-a-retrouver-des-corps-ensevelis-dans-la-boue-dans-l-est-de-la-rdc-le-bilan-des-inondations-s-alourdit_6172781_3212.html , 08.09.2023
- Lee, R. (2011). The outlook for population growth. *Science*, 333(6042), 569-573.
- Li, C. Z., Zhao, Y., & Xu, X. (2019). Investigation of dust exposure and control practices in the construction industry: Implications for cleaner production. *Journal of Cleaner Production*, 227, 810–824. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.174>
- Mahadevan, P., 2019. Sand mafias in India. *Disorganized Crime in a Growing Economy*.
- Marhegane, B. A., Ndagano, E. A., Ntasima, H. A., & Winlondja, I. B. (2022). Défis de la planification urbaine dans la ville de Bukavu. *Journal*, 57–59(September). <https://doi.org/10.2776/5237>
- Michellier, C., (2017). Contribuer à la prévention des risques d'origine géologique : l'évaluation de la vulnérabilité des populations dans un contexte de rareté de données. Les cas de Goma et Bukavu (RD Congo) (Thèse de Doctorat, Université Libre de Bruxelles). 333p.
- Moeyersons, J., Trefois, P., Lavreau, J., Alimasi, D., Badriyo, I., Mitima, B., Mundala, M., Mugisho, N.D., Birembano, B. R., Kulimushi, M. S., Mulengezi, M. J., Paluku, K. G., Mubalama, D. F., Aganze, B. C., Lumoo, B. F., Ahadi, B. P. & Shukuru, B. J.(2022). Organisation spatiale et urbanisation de la ville de Bukavu à l'Est de la RD Congo: aires de centralité, zones d'activités, habitat et tendances d'extension. *Cahiers du CERUKI, Nouvelle Série*, 183 216.
- Muhaya, V. N., Chuma, G. B., Kavimba, J. K., Cirezi, N. C., Mugumaarhahama, Y., Fadiala, R. M., Kanene, C. M., Kabasele, A. Y. Y., Mushagalusa, G. N., & Karume, K. (2022). Uncontrolled urbanization and expected unclogging of Congolese cities: Case of Bukavu city, Eastern DR Congo. *Environmental Challenges*, 8(May). <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100555>
- Muhiwa, G. M., Nyamuhanga, A. A., Muhindo, A. M. W., Patient, K. B., Trésor, M., Blanche, M. M. & Francois, N. (2020). Concrete Based on Recycled Aggregates for Their Use in

- Construction: Case of Goma (DRC). *Open Journal of Civil Engineering*, 10 (03): 226–238). <https://doi.org/10.4236/ojce.2020.103019>
- Mumujuya Siyamu, D. (2022). Travail personnel: La collecte des déchets ménagers solides dans la ville de Bukavu: un défis à relever. Mémoire de Master. Faculté des bioingénieurs. Université de Liège et UCLouvain, 56p
- Munganga, D.O., & Nahimana, L. (2004). A geomorphological assessment of landslide.
- Munyaka, J.C.B. and Yadavalli, V.S.S., 2021. Using transportation problem in humanitarian supply chain to prepositioned facility locations: a case study in the Democratic Republic of the Congo. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 12, pp.199-216.
- Musobwa, P.K. Kito, S.T. & Kashemwa, M.I., 2022. Les incidences démographiques, sociologiques et économiques de l'exode rural dans la ville de Bukavu au Sud-Kivu. *Revue internationale des sciences de gestion*, 5 (1).
- Ndyanabo, S., Vandecasteele, I., Moeyersons, J., Ozer, P., Dunia, K. et Cishugi, B. (2010). Développement de la ville de Bukavu et cartographie des vulnérabilités, R.D. Congo. *Annales Sci. et Sc. Appl. UOB*, Vol2, 120-127
- Ngabo, B., A., Maneno, K., J., Nzigire, M., L. and Mwema, A., C., 2022. Diversification de Revenu et Bien-être des Transporteurs de Sable dans l'île d'Idjwi en République Démocratique du Congo. *Congo Sciences, Journal en ligne de l'ACASTI et du CEDESURK*, ISSN: 2410-4299, an International Journal
- Ngabo, P.P., Mushayuma, D.B., Ngabo, G.R., Rukengwa, J.B. and Cishibanji, P.B., 2014. Les causes de disparition de la flore ligneuse de la région de Katana, Kabare, Sud-Kivu, RDC [The causes of woody flora disappearance in Katana region, Kabare, South-Kivu, DRC]. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 8(3), p.1244.
- Nyakabeji, M.B., Mushagalusa, É.M., Bagalwa, J.J.M. and Basabose, A.K., 2023. Diversité des macroinvertébrés benthiques des rivières du nord-est de l'île d'Idjwi, République Démocratique du Congo. *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement*
- Nyenyenzi, A. B., & Ansoms, A. (2014). Accaparement des terres dans la ville de Bukavu (RDC): déconstruire le dogme de la sécurisation foncière par l'enregistrement. *Conjonctures Congolaises*, 218–238.
- Nzunzi, F.L., (2008). *Kinshasa Ville et Environnement*. Ed. Harmattan, Paris. 281p.
- OCDE. (1997). Les incidences sur l'environnement du transport de marchandises. <http://www.oecd.org/dataoecd/14/6/2386739.pdf>
- ONU-Habitat, 2014. *L'État des villes africaines 2014 : Réinventer la transition urbaine*. Nairobi, Kenya, Programme des Nations unies pour les établissements humains, 250 p. <http://unhabitat.org/books/stateof-african-cities-2014-french-language-version-reimagining-sustainable-urbantransitions/> (Page consultée le 6 avril 2019).

- ORBLIN, M., 2018. Comment produire de la denrée (sable) en modifiant nos pratiques occidentales ? Application au bâtiment via l'utilisation du corail comme matériau de construction.
- Paijens, C., Bressy, A., Frère, B., et Moilleron, R., 2019. Priorisation des biocides émis par les matériaux de construction en vue de leur surveillance dans le milieu aquatique. HAL Id: hal-02883640. p22. DOI : 10.36904/tsm/201912197. <https://enpc.hal.science/hal-02883640>
- Peduzzi, P., 2014. Sand, rarer than one thinks. *Environmental Development*, 11(208-218), p.682.
- PNUE, 2019. Sand and sustainability: Finding new solutions for environmental governance of global sand resources, p. 13, http://www.unepgrid.ch/storage/app/media/documents/Sand_and_sustainability_UNEP_2019.pdf.
- Radio Okapi, 2023. Bukavu : le manque d'urbanisation de certaines communes accroît le risque d'incendie. Bukavu : le manque d'urbanisation de certaines communes accroît le risque d'incendie | Radio Okapi, 09/09/2023
- Sadiki, N., Ine,V., Jan, M., André, O., Pierre, O., Kalegamire, D., & Bahati, C.,(2009). Développement de la ville de Bukavu et cartographie des vulnérabilités, R.D. Congo. *Annales Sci.& Sci. Appl. U.O.B. Vol. 2 : 2010*
- Sameer, H. & Bringezu, S. (2019). Life cycle input indicators of material resource use for enhancing sustainability assessment schemes of buildings. *Journal of Building Engineering*, 21: 230–242. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.10.010>
- Sikuzani, Y. U., Kaleba, S. C., Khonde, C. N., Mwana, Y. A., Malaisse, F., Bogaert, J., & Kankumbi, F. M. (2017). Vingt-cinq ans de monitoring de la dynamique spatiale des espaces verts en réponse à ('urbanisation dans les communes de la ville de Lubumbashi (Haut-Katanga, RD Congo). *Tropicultura*, 35(4).
- Statista, 2023. Valeur du pouvoir calorifique inférieur (PCI) massique des biocarburants, de l'essence et du gazole (en kilojoules par kilogramme). <https://fr.statista.com/statistiques/865497/pci-massique-biocarburant-essence-gazole-huile/>
- Sulemana, I., Nketiah-Amponsah, E., Codjoe, E. A., & Andoh, J. A. N. (2019). Urbanization and income inequality in Sub-Saharan Africa. *Sustainable cities and society*, 48, 101544.
- Tchangaboba, K., Balagizi, A., Matabaro, L., Aleke, L., Mulongaibalu, M., & Muderhwa, N. (2018). Caractérisation de certains sites reconnus comme zones de fraies par les pêcheurs dans la zone littorale du lac Kivu: cas du bassin de Bukavu (Sud-Kivu, RD Congo). *Annales des Sciences et des Sciences Appliquées*, 4(4/4), 214-238.

- Tusting, L. S., Bisanzio, D., Alabaster, G., Cameron, E., Cibulskis, R., Davies, M., ... & Bhatt, S. (2019). Mapping changes in housing in sub-Saharan Africa from 2000 to 2015. *Nature*, 568(7752), 391-394.
- Vargas, NG., González, T., Perc, I., et Dominguez, A., 2020. La arena del vecino, 360, <http://www.360periodismo.com/laarena-del-vecino/>.
- VOA, 2023. Inondations en RDC: à Kalehe, les survivants fustigent des enterrements "indignes". <https://www.voaafrique.com/a/les-survivants-de-kalehe-d%C3%A9noncent-des-enterrements-indignes-/7092894.html>, 08.09.2023
- Wand'arhasima, M., (2013). Les gouttières dans la stabilité d'immeubles et l'assainissement des parcelles en ville de Bukavu. in Cahiers du CERPRU, n°21-A, ISDR-Bukavu, 2013b, 201-15.
- World Bank, 2023. Urban development. <https://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/overview#:~:text=Today%2C%20some%2056%25%20of%20the,people%20will%20live%20in%20cities.>
- Zinkina, J., Ilyin, I., & Korotayev, A. (2017). The Nineteenth-Century Urbanization Transition in the First World. *Globalistics and globalization studies*, 164-172.
- Zirirane, D., Bagalwa, J. J., Isumbisho, M., Mulengezi, M., Mukumba, I., Bora, M., ... & Kamangala, R. (2014). Evaluation comparée de la pollution des rivières Kahuwa et Mpungwe par l'utilisation des macroinvertébrés benthiques. *VertigO*, 14(3).



University of Antwerp
I **IOB** | Institute of
Development Policy