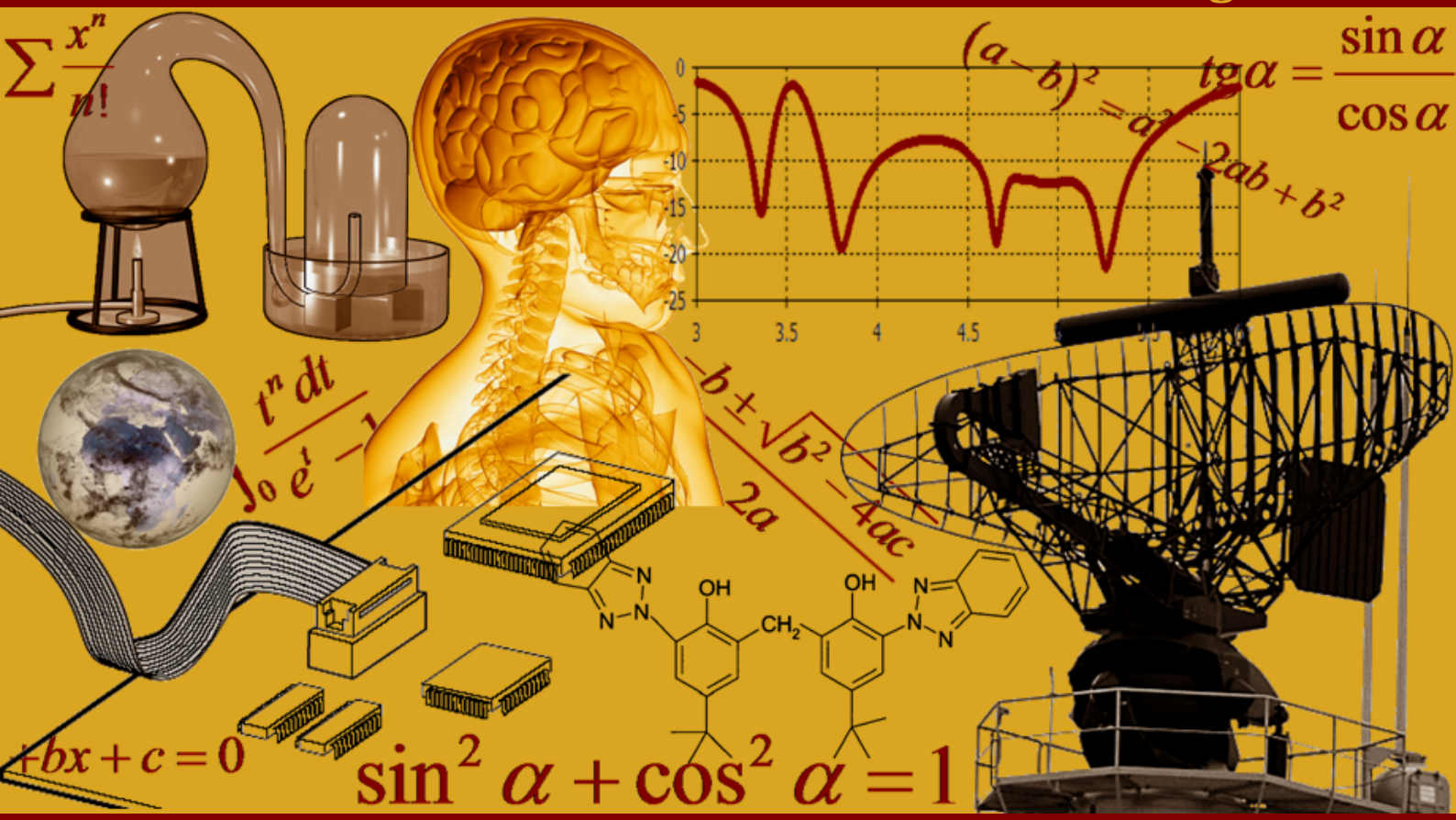
ISSN: 2336-0046 Impact Factor: 7.093

INTERNATIONAL JOURNAL OF INNOVATION AND SCIENTIFIC RESEARCH

Vol. 86 N. 1 August 2026



International Peer Reviewed Monthly Journal

Innovative Space of Scientific Research Journals
http://www.issr-journals.org/

International Journal of Innovation and Scientific Reseach

International Journal of Innovation and Scientific Research (ISSN: 2336-0046) is an open access, specialized, peer-reviewed, and interdisciplinary journal that focuses on research, development and application within the fields of innovation, engineering, science and technology. Published four times per year in English, French, Spanish and Arabic, it tries to give its contribution for enhancement of research studies.

All research articles, review articles, short communications and technical notes are sent for blind peer review, with a very fast and without delay review procedure (within approximately two weeks of submission) thanks to the joint efforts of Editorial Board and Advisory Board. The acceptance rate of the journal is 75%.

Contributions must be original, not previously or simultaneously published elsewhere. Accepted papers are available freely with online full-text content upon receiving the final versions, and will be indexed at major academic databases.

Editorial Advisory Board

K. Messaoudi, Hochschule für Bankwirtschaft, Germany
Sundar Balasubramanian, Medical University of South Carolina, USA
Ujwal Patil, University of New Orleans, USA
Sankaranarayanan Seetharaman, National University of Singapore, Singapore
Rehan Jamil, Yunnan Normal University, China
Avdhoot Walunj, National Institute of Technology Karnataka, India
Fairouz Benahmed, University of Connecticut Health Center, USA
Achmad Choerudin, ST.,SE.,MM., Academy Technology of Adhi Unggul Bhirawa, Indonesia
Mohammad Ali Shariati, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Iran
Md Ramim Tanver Rahman, Jiangnan University, China
Rasha Khalil Al-Saad, Veterinary Medicine College, Iraq
Malika Maataoui, Mohammed V University, Morocco
Neil L. Egloso, Palompon Institute of Technology, Philippines
Sanjay Sharma, Roorkee Engineering & Management Technology Institute, India
Ahmed Nabile Emam, National Research Center (NRC), Egypt
Md. Arif Hossain Jewel, Rural Development Academy, Bangladesh
N. Thangadurai, Jayalakshmi Institute of Technology, India
Anupam Kumar, Ashoka Institute of Technology & Management, India
Goutam Banerjee, Visva-Bharati University, India
Santosh Kumar Mishra, S. N. D. T. Women's University, India
Urmila Shrawankar, G H Raisoni College of Engineering, India

Table of Contents

Insécurité dans la Province du Bas-Uélé: Que fait l'Etat Congolais face à cette situation? 112-123

Célestin Bela Egwasa and Joseph Bosongo Saile Abisa

Contribution du SIG dans l'étude cartographique des puits de forage d'eau et leurs incidents: Cas des quartiers Kemi (Righini), Livulu et Salongo dans la Commune de Lemba 124-132

Nsakala Tanda Reddy Andy, Fulgence Mulopo Shinginyeka, Ishaku Kaunga Omega, Ngumba Ngumba Victoire, Kazadi Mujinga Stella, Bondonga Mambomba Hervé, Buluku Palamoke Grace, and Ntantay Judicaël

Utilisation des fonctions de régression en vue de mettre en évidence les corrélations entre les déplacements et entre les efforts tranchants de masses de chaque niveau des structures de bâtiments de type R+9 sans éléments de contreventement dans les zones sismiques de Goma et de Bukavu en République Démocratique du Congo (RDC) 133-167

Amadou MOUNDOM, MAPENDO KABYABU Feja, and Thomas TAMO TATIETSE

International Journal of Innovation and Scientific Research
ISSN 2336-0046 Vol. 86 No. 1 Aug. 2026, pp. 112-123
© 2026 Innovative Space of Scientific Research Journals
http://www.ijisr.issr-journals.org/

Insécurité dans la Province du Bas-Uélé: Que fait l'Etat Congolais face à cette situation?

[Insecurity in Bas-Uélé Province: How Is the Congolese State Responding?]

Célestin Bela Egwasa[1-2] and Joseph Bosongo Saile Abisa[3-4]

[1]Professeur Associé, Département de Sciences Politique et Administrative, Université de Kisangani, RD Congo

[2]Recteur, Université de Bas-Uélé, RD Congo

[3]Professeur Ordinaire, Département de Sociologie, Université de Kisangani, RD Congo

[4]Doyen, Faculté des Sciences Sociales, Administrative et Politique, Université de Kisangani, RD Congo

Copyright © 2026 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the ***Creative Commons Attribution License***, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: Insecurity in Bas-Uélé Province raises two fundamental questions: The lack of regional coordination, despite dynamics requiring cross-border collaboration, and security governance shortcomings in the RD Congo (DRC). Persistent security issues in the country highlight an inadequate security and defense policy, with Congolese state actions proving ineffective. This study develops a theoretical model, the « Regionalized Security Model, » rooted in Barry Buzan's (1991) security complex theory, treating the region as a primary unit of analysis. It aims to address insecurity in Bas-Uélé through regional coordination and local reconstruction.

KEYWORDS: Conflict resolution, armed conflicts, Bas Uélé, LRA, Mbororo, Bayuda.

RESUME: L'insécurité dans la province du Bas-Uélé soulève deux questions centrales: La faible coordination régionale, alors que les dynamiques en jeu exigent une collaboration transfrontalière, et les lacunes de la gouvernance sécuritaire en RD Congo (RDC). Les problèmes sécuritaires persistants dans ce pays révèlent une politique de sécurité et de défense inadéquate, tandis que les actions de l'État congolais, censées endiguer ces menaces, se sont avérées inefficaces. Cette étude propose un modèle théorique, dénommé « Modèle de la sécurité régionalisée », s'inscrivant dans la théorie du complexe de sécurité de Barry Buzan (1991), qui considère la région comme une unité d'analyse autonome. Ce cadre vise à contrer l'insécurité dans le Bas-Uélé en intégrant coordination régionale et reconstruction locale.

MOTS-CLEFS: Résolution des conflits, Conflits armés, Bas Uélé, LRA, Mbororo, Bayuda.

1 INTRODUCTION

Les États post-conflit font face à un défi structurel persistant: la reconstruction institutionnelle, la réforme du secteur de sécurité (RSS) et la consolidation de l'autorité étatique sur des espaces contrôlés par des groupes rebelles ou non étatiques.

Corresponding Author: Célestin Bela Egwasa

En Afrique subsaharienne, des cas comme le Mali[1,] la Somalie[2,] la République centrafricaine (RCA) et la RD Congo (RDC) illustrent ces difficultés récurrentes, marquées par une précarité sécuritaire durable malgré des interventions internationales. Dans la région des Grands Lacs, la RDC subit une instabilité depuis plus de deux décennies, avec des efforts de RSS, de redéploiement administratif et d'opérations militaires contre les groupes armés qui peinent à restaurer un contrôle territorial effectif.

Au Bas-Uélé, province septentrionale enclavée, cette vulnérabilité est exacerbée par des menaces transfrontalières hybrides. L'Armée de Résistance du Seigneur (LRA), groupe politico-religieux ougandais actif en RDC, RCA et Soudan du Sud, continue ses incursions malgré un désarmement partiel en 2023: en mars 2024, une attaque à Ango (Bas-Uélé) a entraîné l'enlèvement d'environ 30 personnes, l'incendie de 35 maisons et des pillages, rappelant son modus operandi historique.

Parallèlement, les éleveurs nomades Mbororo, originaires du Chad et du Soudan, génèrent des conflits agropastoraux intenses: ravage des cultures, vols de bétail, agressions armées et restrictions d'accès aux ressources (eau, pâturages, chasse), avec des tensions récentes en Haut-Uélé (2023) et Haut-Bas-Uélé (2025) menant à des déplacements massifs. Les Bayuda, braconniers armés au sein des Mbororo, aggravent la situation par l'exploitation illégale de minerais et des alliances présumées avec des groupes comme l'Union des Patriotes Congolais (UPC) ou la LRA[3].

Ce diagnostic appelle une interrogation stratégique: quelles ripostes coordonnées face à ces menaces asymétriques et interconnectées ? Cette étude adopte l'analyse stratégique, croisant théorie des organisations (acteurs, pouvoir, enjeux) et cadres sur les États fragiles.

2 SOURCES DES DONNÉES

Dans cette étude, nous avons recouru à l'analyse stratégique. Elle constitue un paradigme de la théorie des organisations. Cette analyse se focalise sur certains concepts clés, à savoir l'acteur, le pouvoir et l'enjeu.

Pour collecter les données, nous avons recouru aux techniques documentaires, l'observation directe désengagée, l'entretien semi-directif, la boule de neige.

Tableau 1. Répartition des enquêtés

N°	Composition d'échantillon	f	%
01	Acteurs politiques	30	25
02	Société civile	30	25
03	Autorités et notables locaux	30	25
04	Représentant des étrangers	30	25
Total		**120**	**100**

Cet échantillon a été à choix raisonné et n'a pas été constitué sur base des critères rigoureux, l'essentiel était de nous fournir des informations plus ou moins fiables y compris la disponibilité de nous répondre. Le fait pour nous de diversifier les couches d'enquêtés était un élément sélectif des données car la vision des choses peut différer selon qu'on appartient à telle ou telle catégorie.

Pour concrétiser notre objectif, nous avons fait recours à l'analyse stratégique et la théorie de l'insécurité englobant les courants de pensée sur les Etats fragiles et de la sécurité. A l'issue de ces démarches, nous avons abouti aux résultats tels que décrits dans la section suivante.

[1]Mahaut Landaz, *Rôles et impacts des réseaux illicites de drogue dans le conflit nord-malien : Trafics, crise de l'Etat et puissance des groupes djihadistes et indépendantistes,* Notes d'Analyse Politique n°46, août 2016.

[2] François Gaulme, « Consolider les Etats fragiles », in *Études*, Tome 412, 2010/6 , pp. 729-740.

[3] International Crisis Group, *La Centrafrique : les racines de la violence*, Rapport Afrique N° 230, 21 septembre 2015, p.9.

3 RÉSULTATS

L'insécurité dans la Province du Bas-Uélé soulève deux questions fondamentales. La première est celle de la faible coordination régionale alors que les dynamiques à l'œuvre impliquent une collaboration régionale. La deuxième est celle de la gouvernance sécuritaire en RDC. Aujourd'hui, la plupart des problèmes d'ordre sécuritaire dans ce pays met en lumière la faible politique de la sécurité et de la défense.

Eu égard à ce qui précède, nous sommes parvenus à mettre sur pied un modèle théorique en vue d'enrayer la sécurité dans la province du Bas-Uélé. Dénommé « Modèle de la sécurité régionalisée», notre modèle théorique s'inscrit dans le cadre de la théorie du complexe de sécurité élaboré par Buzan et considérant une région en tant qu'objet d'analyse à part entière[4].

Une telle approche régionale de sécurité permet donc de parler de la sécurité régionale en termes de modèle de relations entre les membres du complexe de sécurité. Un tel modèle émet l'hypothèse selon laquelle les analyses globales sont incapables de prendre en compte et d'identifier les préoccupations sécuritaires immédiates des États, c'est-à-dire les menaces de leur voisinage immédiat.

Les interactions sécuritaires avec les voisins sont plus nombreuses qu'avec les puissances du système international, et « l'interdépendance sécuritaire sur le système international dans son ensemble est loin d'être uniforme ». Ainsi ces régions sont un modèle d'anarchie miniature. Il paraît évident que toutes les régions du monde connaissent mécaniquement ce type d'interactions, du fait de la proximité géographique des États et de frontières communes.

Un groupe d'États est qualifié de « complexe de sécurité régional » selon certains critères, dont celui d'une interdépendance incontournable entre les États. Buzan définit ce concept comme « un ensemble d'unités dont les processus majeurs de sécuritisation, dé-sécuritisation, ou les deux, sont si inter reliés que leurs problématiques de sécurité ne peuvent raisonnablement pas être analysées indépendamment les unes des autres »[5].

Toutefois cette définition reste imprécise puisque Buzan utilise le terme « raisonnablement » pour qualifier l'intensité des interactions sécuritaires entre les États du complexe. Il précise plus loin que le principal facteur définissant un complexe de sécurité est « le degré élevé de menace/crainte que ressentent mutuellement deux ou plusieurs États ».

C'est la raison pour laquelle, Thierry Balzacq[6] résume ainsi les principales caractéristiques des complexes de sécurité:

- Ces complexes sont composés de deux ou plusieurs États,
- Ces Etats constituent toujours des ensembles territorialement cohérents partageant des frontières communes: « un sous-système distinct et significatif de relations de sécurité existe au sein d'un ensemble d'Etats dont le destin est lié par leur proximité géographique », peu importe qu'ils aient des caractères culturels ou ethniques communs, « les complexes de sécurité sont des régions vues à travers une lentille sécuritaire », en effet, les menaces politiques et militaires sont plus significatives et potentiellement imminentes quand les États ont des frontières communes,
- Les relations entre les États membres du complexe sont marquées par l'interdépendance sécuritaire, les interactions sécuritaires doivent être suffisamment intenses (comparées à la faiblesse des liens avec l'environnement externe au complexe) et ce, quelle que soit la qualité de ces interactions, conflictuelles ou coopératives, en quelque sorte, un complexe de sécurité peut exister lorsqu'il existe un sentiment commun et élevé d'insécurité entre deux ou plusieurs États régionaux, de même, un haut degré de confiance mutuelle peut aussi bien déterminer l'existence d'un complexe de sécurité,
- La configuration de l'interdépendance sécuritaire doit être profonde et durable, mais pas nécessairement permanente.

Le décor étant planté, nous passons maintenant à la présentation de notre modèle théorique. Ce modèle se présente de la manière suivante:

[4] Le Gouriellec, S., « Sécuritisation et construction d'un complexe de sécurité régional dans la Corne de l'Afrique », In *Études internationales*, 2018, *49* (1), pp.83-104.
[5] *Idem*.
[6] Cité par Le Gouriellec, S., *Art. cit.*, pp.83-104.

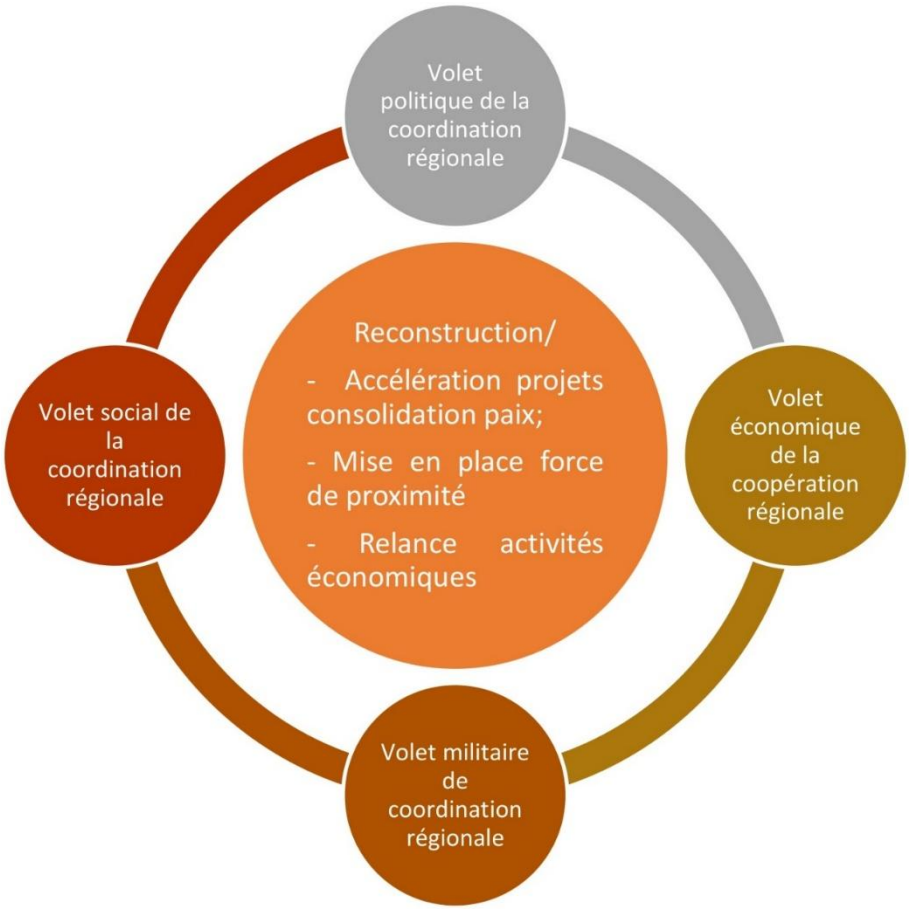


Fig. 1. Modèle de sécurité régionalisée

Source: nous-mêmes

Notre modèle théorique appelle le commentaire selon lequel, les acteurs de l'insécurité dans le Bas-Uélé ont des ramifications internationales. De ce fait, les efforts de la sécurité dans le Bas-Uélé requièrent une coordination de tous les Etats de la région qui sont touchés l'activisme de ces acteurs.

Cette initiative de coordination doit venir surtout de la RDC dans la mesure où elle est victime des actions des Mbororo, mais surtout du fait qu'elle a vocation d'être un Etat leader dans la région. Entre-temps, l'Etat congolais doit créer des conditions d'une paix durable dans les zones touchées par les affres des violences dans le Bas-Uélé.

Les deux niveaux d'explication de notre modèle nous amènent à structurer ce chapitre en deux sections. Dans la première section, nous consacrons notre réflexion à la nécessité d'une coordination régionale face à l'activisme des groupes auxquels nous avons affaire. Dans la seconde section, nous consacrons la littérature à la reconstruction de la Province du Bas-Uélé.

3.1 NÉCESSITÉ D'UNE COORDINATION RÉGIONALE

La LRA et les Mbororo étant des acteurs qui ont des ramifications extérieures nous poussent au constater selon lequel, leur prise en charge requiert des actions coordonnées dans la région. Alors, quel contenu donner à la coordination pour laquelle nous plaidons ?

En effet, les actions qui doivent bénéficier de la coordination régionale doivent couvrir principalement trois domaines. Il s'agit des domaines politique, militaire et socioéconomique.

a) Domaine politique de la coordination

Le domaine politique paraît revêtir une importance capitale dans la mesure où la de la question de la LRA et des Mbororo requiert l'existence d'un cadre de planification stratégique régional. En d'autres termes, les Etats où sont implantés les groupes sous analyse disposer d'une commission politique dont le rôle consistera à définir clairement les objectifs de la coopération en la matière, les domaines de cette coopération et chercher des partenaires pouvant les aider à mener à bien leurs objectifs.

En outre, comme les actions régionales de lutte contre l'insécurité dans la région sont budgétivores, la commission mise sur pied aura à chercher des financements nécessaires pour soutenir ses efforts. Pour cela, la quête des partenaires devrait constituer l'une des priorités pour cette commission.

Dès nos jours, les puissances occidentales beaucoup manifesté leurs intérêts à soutenir la lutte contre les groupes qualifiés de « terroriste ». Qui plus est, c'est depuis 2001 que la LRA a été classée parmi les réseaux terroristes dans le monde.

C'est à ce titre qu'AFRICOM a envoyé une force spéciale en RCA pour combattre la LRA. Cette force a mené des opérations conjointes avec l'armée ougandaise avant de quitter la RCA il y a quelques années. Il se fait malheureusement que l'Ouganda lui-même n'avait pas des moyens pour mener seul une telle opération. Par conséquent, le désengagement d'AFRICOM de la RCA a entraîné d'office celui de l'armée ougandaise.

Aucune force n'a pu être en mesure de prendre le relais jusqu'à aujourd'hui alors que l'objectif même de cette opération n'avait pas été atteint. Pour autant, l'objectif assigné à cette opération consistait non seulement à neutraliser ce mouvement mais aussi à capturer ses leaders. Bien que Dominic Ongwen, un des lieutenants de Joseph Kony ait été arrêté, d'autres leaders ont survécu. Ils n'ont plus les moyens dont ils disposaient au départ quand ils bénéficiaient des soutiens de Khartoum.

De plus, cette opération n'aura constitué qu'un coup de pied de la fourmilière car n'a pas neutralisé les combattants de la LRA. Elle a plus entraîné la dispersion de ces rebelles qui ont à leur tour changé des modes opératoires. Ils opèrent à des petits groupes pour perpétrer des attaques contre les villageois. Faute des moyens, ils ne savent plus de réorganiser et lutte beaucoup plus pour leur survie, ce qui les conduit à piller systématique les villageois lors de leurs raids.

b) Domaine militaire de cette coordination

D'un point de vue militaire, il est devenu plus que nécessaire que la RDC avec les Etats de la région avec lesquels elle partage les mêmes préoccupations sécuritaires mettent sur pied des forces conjointes. Ces dernières doivent disposer d'un quartier général établi soit en RDC, soit en RCA soit au Soudan du Sud. Dotées de tous les moyens requis pour mener à bien leur mission, ces forces doivent avoir un caractère spécial. En d'autres termes, ces forces doivent opérer à travers les frontières communes de ces trois Etats en vue de maintenir une pression permanente sur la LRA jusqu'à sa neutralisation complète.

A ce titre, ces forces seront chargées de mener des renseignements sur l'activisme de la LRA, ses sources d'approvisionnement, son modus operandi et son sanctuaire en vue de la neutraliser complètement. Pour cela, ces forces doivent réellement jouer un rôle de proximité auprès des civils afin de permettre aux déplacer de regagner leur milieu et de reprendre les activités agricoles dont ils tirent l'essentiel de leur revenu.

Toutefois, un certain nombre de défis doivent être relevés. Ces unités doivent constituées une véritable force spéciale formée pour faire face à des attaques asymétriques. Par définition, les forces spéciales sont des forces dépourvues des moyens lourds, notamment des chars, des artilleries, des mortiers… qui permettent aux forces conventionnelles (infanterie, blindée, artillerie, etc.) de combattre durablement sur un espace ennemi et de le contrôler. A ce titre, les soldats « spéciaux » sont eux-mêmes les « irréguliers » et forment les guérilleros d'une force conventionnelle. Elles sont chargées d'accomplir de manière totalement autonome, des missions à haut risque dans un environnement hostile. Elles sont utilisées dans la reconnaissance et le renseignement stratégique, la capture ou l'exécution d'ennemis, la libération d'otages, le sabotage, la récupération d'armes de destruction massive, l'assistance à des forces locales amies…[7]

Les forces spéciales offrent un avantage indéniable de par leur mobilité et agressivité car capables d'harceler l'adversaire à tout moment. Un regard sur le recours progressif de l'occident à l'asymétrie est très éloquent pour prouver cette extrême

[7] Agenonga Chober, *Thèse déjà citée,* pp.575-576.

nécessité. Le cas des Etats Unis d'Amérique en constitue une parfaite illustration dans la mesure où au cours de dernières années, ils recourent plus aux forces spéciales qu'aux armées classiques (Forces terrestre, aérienne et navale).

Pour cela, en termes d'effectifs, pendant que les effectifs militaires américains se contractent ou baissent pour cause de sous-traitance aux firmes privées, celui des forces spéciales connait une augmentation fulgurante. En 2014, l'effectif des forces spéciales à grimpé jusqu'à 65 000 hommes, alors qu'en 1987, ils en comptaient 54 000 contre 8 000 seulement à la fin des années 1970. De plus, pendant que le budget militaire américain est passé de 720,3 milliards dollars en 2010 à 618, 7 milliards de dollars en 2013, force est de constater que celui des forces spéciales a quadruplé en dix ans pour atteindre 10 milliards de dollars en 2014[8].

De son côté, la France, 5ème puissance mondiale en 2018, s'inscrit de plus en plus dans la logique de la guerre asymétrique. A cette fin, elle a déployé des pans importants de son armée pour apprendre les techniques antiguérillas en Colombie auprès de la Force de déploiement rapide colombienne FUDRA (Fuerza de Despliegue Rapida), qui entraîne des unités spéciales françaises. Il s'agit d'une force de réaction moderne capable de se déployer dans différents secteurs par tous temps et qui a montré une certaine efficacité dans la lutte contre les FARC. Elle a pour devise: « *Quelle que soit la mission, quel que soit l'endroit, quelle que soit l'heure, de la meilleure manière, prêts à vaincre* ».

Ces forces peuvent recourir à des programmes tels qu'African Contingency Operations Training and Assistance (ACOTA) et l'Architecture de Paix et Sécurité (APS). En effet, ACOTA est une initiative du Département d'État américain visant à renforcer les compétences et les capacités des pays partenaires africains, des institutions régionales et des ressources du continent en matière de maintien de la paix, pour que la région puisse planifier, former, déployer et maintenir une quantité suffisante de Casques bleus professionnellement qualifiés avec un minimum d'assistance de pays non africains[9]

Par le passé, les États-Unis ont soutenu les missions de maintien de la paix des Nations Unies en tant qu'élément clé pour faire face aux crises régionales et aider les États à sortir des conflits. En 2007, suite à une conférence de l'ACOTA au cours de laquelle l'armée rwandaise a sollicité une formation sur la négociation, le Département d'État américain a demandé à l'Instit des Etats Unis pour la Paix (USIP) de piloter une formation sur les compétences de communication et de négociation pour les soldats de la paix.

L'USIP a piloté la formation au Rwanda en février 2008. L'USIP s'est depuis associée à l'ACOTA pour former les forces de maintien de la paix aux compétences fondamentales de gestion des conflits, analyse des conflits, communication, négociation, médiation et protection des civils. En 2016, la formation a été révisée afin d'inclure un contenu plus détaillé sur la prévention de l'exploitation et des atteintes sexuelles. Aussi propose-t-elle ses formations aux Pays Contributeurs de Troupes (PCT) avant leur déploiement dans le cadre des missions de l'ONU et/ou de l'Union Africaine. Parmi ces missions figurent la MINUSCA en République Centrafricaine, l'ONUCI en Côte d'Ivoire, la MINUAD au Darfour, la MONUSCO en RD Congo, la FINUL au Liban, la MINUSMA au Mali, l'AMISOM en Somalie et la MINUSS au Soudan du Sud. Les participants à ces formations sont des formateurs militaires et des soldats, y compris des officiers et sous-officiers, sélectionnés par le PCT[10]

La majorité sont des hommes. Les formations sont dispensées dans la langue d'instruction utilisée dans le cadre plus large de formation préalable au déploiement, soit le français ou l'anglais. Lorsque les formateurs francophones ne sont pas disponibles, l'USIP utilise un interprète local. Au cours de leur déploiement, les soldats de la paix utilisent les compétences acquises lors de leur formation pour prévenir l'escalade des conflits et gérer ces derniers de façon non violente. De nombreuses anecdotes montrent que les compétences acquises lors de la formation de l'USIP sont utilisées par les soldats de la paix en mission.

Les données montrent également que ces derniers ont besoin d'une formation plus approfondie sur la façon d'utiliser les approches non violentes pour gérer les conflits lors de leur déploiement. Les conclusions de l'évaluation permettent de mieux comprendre comment améliorer la conception et la prestation de la formation de l'USIP afin que les soldats de la paix puissent utiliser ces compétences essentielles en mission, et suggèrent des recommandations pour élargir la portée des politiques et des pratiques de maintien de la paix[11]. Il s'agit là de quelques opportunités qui s'offrent aux Etats sur lesquels pèsent les menaces de la LRA pour professionnaliser des troupes destinées à assurer leur sécurité commune. Ces forces peuvent à la

[8] *Idem.*

[9] Milofsky, A., Sany, J., Illana Lancaster et Krentel, J., *Formation à la gestion de Conflits pour les Soldats de la Paix : Évaluation et Recommandations,* l'Institut des États-Unis pour la Paix. SPECIAL REPORT 411, août 2017, p.3.

[10] Idem.

[11] Milofsky, A., *Sany, J., Illana Lancaster et Krentel, J., Op. cit.*, p.3.

longue servir d'un instrument dans le cadre des opérations de maintien de la paix sur le continent à partir des expériences reçues.

Les mêmes forces peuvent désormais servir même l'Afrique pour faire face aux menaces terroristes qui prennent de plus en plus de l'ampleur sur le continent. Une telle vision doit caractériser la politique sécuritaire des dirigeants africains de manière générale, et ceux de la région de manière particulière. Etant donné que la seule approche militaire ne suffit pas pour asseoir la sécurité, les actions des dirigeants de la région doivent aussi couvrir d'autres secteurs, notamment socioéconomiques. C'est dans le point suivant que nous y consacrons la littérature.

c) Domaine socioéconomique de la coordination

La RDC, la RCA comme le Soudan du Sud sont trois Etats de la région qui connaissent les mêmes préoccupations à travers les zones où sévissent les combattants de la LRA. Leurs populations vivent dans une extrême pauvreté et dans des milieux enclavés, les isolant des centres de décision. En outre, du fait de l'activisme de la LRA, plusieurs d'entre elles ont abandonné leurs activités principalement fondées sur l'agriculture et l'élevage. De plus, les populations de ces trois Etats sont inscrites dans une dynamique d'échanges commerciaux transfrontaliers.

D'où la nécessité pour les Etats concernés de mener des actions socioéconomiques en faveur de ces populations. Ces actions doivent couvrir plusieurs volets: la création d'un réseau routier permettant à la fois de fluidifier les échanges mais aussi la circulation des forces de sécurité et la relance des activités économiques dans la région.

3.2 RECONSTRUCTION DU BAS-UÉLÉ

Dans sa définition, le terme *« reconstruction »* se réfère à l'action de reconstruire qui peut à la fois signifier *« rétablir dans son état originel »* et *« imaginer quelque chose autrement »*[12]. Il est dans tous les cas communément lié au temps d'après le conflit. Cela semble logique car le conflit évoque la destruction quand le post-conflit s'attèle à reconstruire.

Cette notion paraît alors prendre sa place dans le schéma urgence/post-urgence-réhabilitation /développement. Cette configuration rapprocherait la période de post-urgence / réhabilitation de la notion de reconstruction. Il y aurait comme une phase intermédiaire, sur un schéma linéaire, entre le conflit et le développement qui aurait pour fonction de stabiliser la situation après une crise.

Cette théorie a puisé ses fondements dans les cas de la France et de l'Allemagne post seconde guerre mondiale. Dans, et entre, ces deux pays, la paix semble s'être installée profondément après une période de transition qui a permis la reconstruction. Cette période de reconstruction se caractérise par des plans internationaux de soutien, type plan Marshall, et une économie qui redémarre dès 1950. Il semble alors que les experts occidentaux en sciences politiques aient modélisé les concepts de conflits et post-conflits, ainsi que celui de la paix dont leur partie du monde à bénéficier depuis, pour pouvoir analyser les *« autres crises »*[13].

Couramment la phase de post-conflit succède à la phase de conflit mais ne dure pas suffisamment pour déboucher sur la fameuse période de développement. Et le territoire bascule à nouveau dans le conflit. Fréquemment aussi on observe des situations d'installation de crises durables de basse intensité. Ces situations d'alternance Conflit/Post-conflit ou de maintien de petits conflits démentent donc les recettes « toutes-prêtes » de reconstruction fructueuse. La reconstruction d'un Etat implique un faisceau d'acteurs, visant tous le même objectif: celui de parvenir à instaurer une paix durable. Cette notion de durabilité s'inscrit donc dans le temps et dans la nécessité de s'investir sur du long terme. On peut toutefois identifier des besoins à différents termes.

En effet, immédiatement après l'arrêt des combats, se pose l'urgence de besoins élémentaires: par exemple, les soins de première nécessité doivent être donnés aux populations et exigent que les systèmes d'intervention mis en place pendant la période de conflit soient maintenus voire renforcés. Pourtant déjà il faut anticiper sur la remise en fonctionnement d'infrastructures plus lourdes, celles qui permettront au pays de se développer à plus long terme. Il faut donc tout à la fois

[12] Le Petit Larousse illustré.
[13] Delphine Vincent, http://www.irenees.net/bdf_fiche-analyse-923_fr.html, consulté le 06 février 2025.

fournir des médecins et des soins tout de suite, et prévoir la formation de nouveaux médecins, construire des hôpitaux, des infrastructures de transport, un organe régulateur et dirigeant…

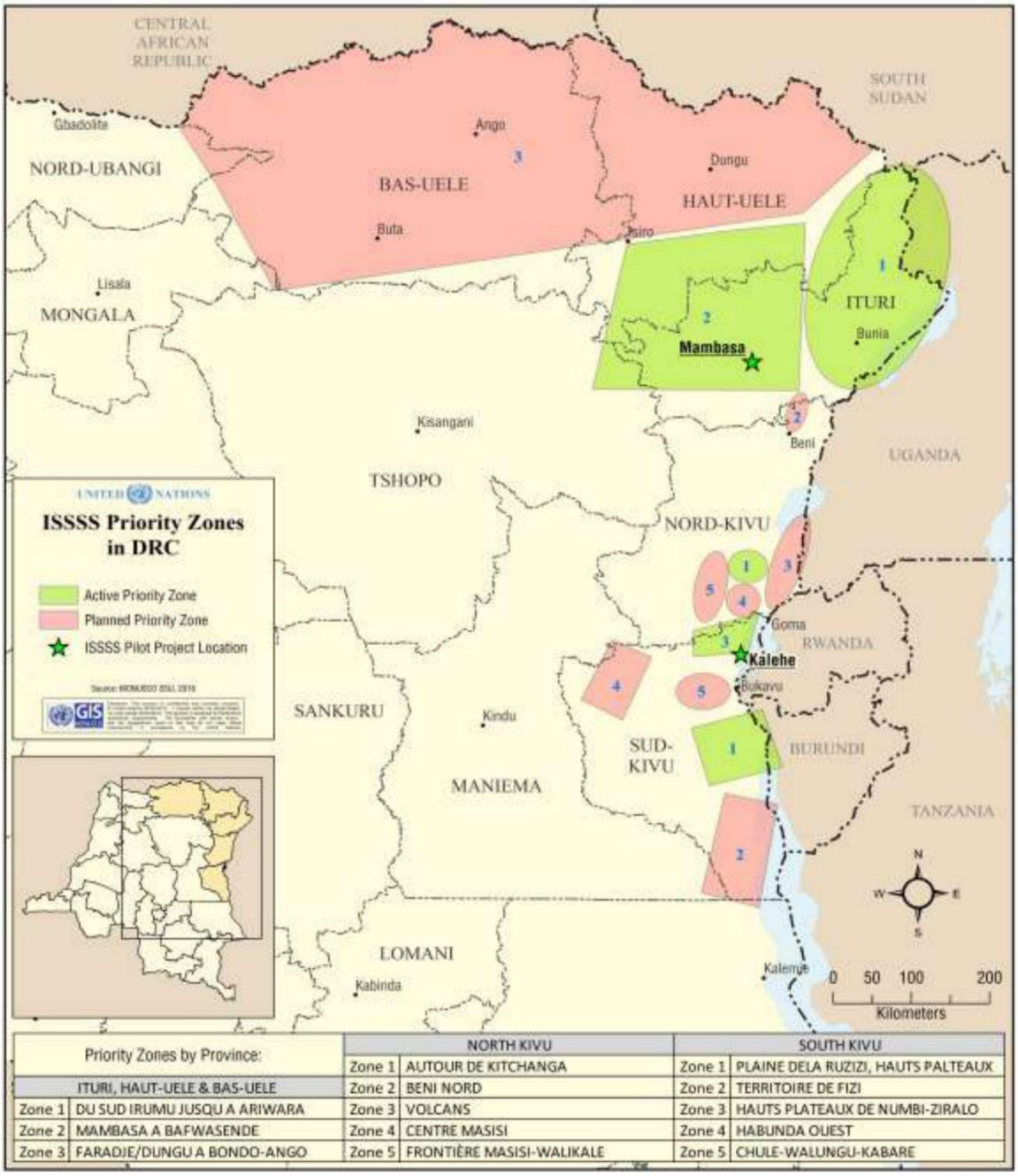
Cela étant, la Province du Bas-Uélé est l'une des provinces déchirées par de violentes attaques de la LRA et de l'insécurité provoquée par la présence des éleveurs nomades Mbororo. Cette province semble oubliée par les dirigeants congolais et souffre atrocement de l'enclavement et de la sous-administration. Les autorités déployées dans cette province à travers les différents territoires et secteurs éprouvent des difficultés de plusieurs ordres. Ils n'ont des moyens de communication et les moyens de déplacement. En outre, les forces de sécurité sont déployées en nombre insuffisant pour faire face à l'insécurité dans cette province.

Par ailleurs, du fait des attaques et des rafles perpétrées de manière récurrente par les combattants de la LRA, plusieurs personnes ont dû fuir les villages pour aller chercher la sécurité dans les grands centres. Par conséquent, ces déplacés tirant l'essentiel de leurs revenus de l'agriculture ont abandonné ces activités, aggravant l'insécurité alimentaire et la dégradation de leurs conditions sociales. A cet effet, les efforts visant la reconstruction de la province du Bas-Uélé doivent viser l'accélération des projets de consolidation de la paix, la réhabilitation du réseau routier en vue du désenclavement de cette province et la relance des activités économiques dans la région.

De plus, un comité de surveillance citoyen doit être mis sur pied en vue de mettre au cœur de la sécurité la population civile. En vue d'une sécurité de proximité, il y a nécessité de mettre sur pied des forces de sécurité de proximité dans la région.

a) Accélération des projets de consolidation de la paix

Nous tenons à préciser que la province du Bas-Uélé est déjà inscrite par les Nations Unies parmi les provinces où les projets de la consolidation de la paix seront réalisés. A cet effet, nous proposons la carte renseignant sur les territoires du Bas-Uélé qui devront bénéficier de ces projets.



Priority Zones by Province:		NORTH KIVU		SOUTH KIVU	
ITURI, HAUT-UELE & BAS-UELE		Zone 1	AUTOUR DE KITCHANGA	Zone 1	PLAINE DELA RUZIZI, HAUTS PALTEAUX
Zone 1	DU SUD IRUMU JUSQU A ARIWARA	Zone 2	BENI NORD	Zone 2	TERRITOIRE DE FIZI
Zone 2	MAMBASA A BAFWASENDE	Zone 3	VOLCANS	Zone 3	HAUTS PLATEAUX DE NUMBI-ZIRALO
Zone 3	FARADJE/DUNGU A BONDO-ANGO	Zone 4	CENTRE MASISI	Zone 4	HABUNDA OUEST
		Zone 5	FRONTIÈRE MASISI-WALIKALE	Zone 5	CHULE-WALUNGU-KABARE

Fig. 2. Territoires du Bas-Uélé concernés par les projets de la consolidation de la paix

Source: Agenonga Chober, *Les forces du maintien de la paix des Nations Unies face aux menaces sécuritaires en RD Congo. Paradoxe d'imposition et de consolidation de la paix dans un Etat postconflit,* Thèse de doctorat en RI, FSSAP, UNIKIS, p.410.

La consultation de cette carte prouve que la province du Bas-Uélé dans son entièreté devra bénéficier des projets de la consolidation de la paix. Les actions prévues par les Nations Unies et l'Etat congolais en matière de la consolidation de la paix sont expliquées dans le tableau suivant.

Tableau 2. Les axes prioritaires transversaux définis par International Security and Stabilization Support Strategy (ISSSS) et le Plan National de Stabilisation et Reconstruction (STAREC) en matière de la consolidation de la paix

Axes/ISSSS	Axes/STAREC
1. Améliorer la sécurité	**1. Sécurité**
Réduction de menaces à la vie, à la propriété et à la liberté de mouvement à travers les stratégies suivantes : – Le renforcement des forces de sécurité. – Le soutien au désengagement et au démantèlement des groupes armés. – L'amélioration des systèmes opérationnels et internes des FARDC en vue de la réduction des taux d'abus, y compris les violences sexuelles contre les civils.	Renforcement des gains dans les zones évacuées par les opérations militaires par les stratégies suivantes : – La restauration du pouvoir de l'Etat par le déploiement de la police, de l'autorité judiciaire et de l'administration civile. – Le renforcement des moyens des FARDC. – La prévention de la résurgence des groupes armés. – La protection des civils contre des exactions. – Le paiement régulier et le logement temporaire des FARDC et de la PNC. – L'instauration d'un mécanisme de contrôle pour les ressources minérales et forestières afin de prévenir leur exploitation illégale.
2. Soutenir les processus politiques	**2. Humanitaire et social**
Soutenir la progression des gouvernements nationaux et provinciaux dans les processus de paix en : – Aidant à améliorer les relations diplomatiques entre la RDC et ses voisins. – Identifiant et en sanctionnant les saboteurs, les responsables d'abus sérieux des droits de l'homme, etc. – Encourageant les dirigeants politiques à respecter les engagements pris dans le cadre des accords fondamentaux.	- Assurer le retour volontaire des réfugiés et des déplacés internes congolais. - Réintégration socioéconomique. - Protection des civils.
3. Renforcer l'autorité de l'État	**3. Reprise économique**
Rétablir et renforcer l'Etat dans les domaines où sa présence est faible ou inexistante en : – Assurant un accès routier fiable. – Mettant en place la police, des tribunaux et des prisons. – Rétablissant les services administratifs décentralisés.	- Rétablissement des activités économiques (réhabilitation de l'infrastructure routière, reprise des secteurs clés dont l'agriculture, la pêche, la petite industrie). - Etablissement de projets régionaux en vue d'harmoniser les relations économiques formelles, en particulier via la redynamisation de la Communauté économique des Pays des Grands Lacs.
4. Du point de vue socioéconomique et humanitaire	**4. Lutte contre la violence sexuelle (objectif ajouté en 2010)**
Assurer le retour volontaire et sûr des déplacés internes et des réfugiés, en assurant leur réintégration socioéconomique durable dans leur région d'origine. Et ce, en : – Couvrant les besoins sociaux prioritaires, restaurant les services sociaux et l'infrastructure de base. – Promouvant la création d'emplois et la productivité agricole. – Facilitant la réconciliation au niveau local et la résolution des conflits liés aux problèmes de l'habitat, de la terre et de la propriété.	(Le contenu n'a pas été révélé)

5. Lutter contre la violence sexuelle	
Renforcer la prévention, la protection et les réponses à la violence sexuelle à travers les stratégies suivantes : - La lutte contre l'impunité et l'amélioration de l'accès à la justice. - La prévention et l'atténuation des menaces ainsi que la réduction de la vulnérabilité à la violence sexuelle. - Prévention de la violence sexuelle dans les processus de réforme du secteur de la sécurité. - L'amélioration de l'accès des survivants aux services multisectoriels. - L'amélioration de la collecte de données et la cartographie de violence sexuelle.	

Source: International Alerte, Sortir de l'impasse: Vers une nouvelle vision de la paix à l'est de la RDC, Septembre 2012, pp.35-36.

Cependant, ce programme ambitieux s'est traduit autrement sur le terrain. Pour autant, les différents organismes qui financent les projets pilotes de consolidation de la paix notamment en Ituri et au Sud-Kivu et qui accompagnent leur réalisation l'ont redéfini en trois piliers suivants[14]:

- Pilier 1: Dialogue démocratique: il vise à soutenir un dialogue inclusif entre les représentants de l'Etat et les populations pour répondre aux causes des conflits**,**
- Pilier 2: Restauration de l'autorité de l'Etat: ce pilier entend promouvoir le développement de ses capacités en vue d'une meilleure prestation de services aux populations,
- Pilier 3: Retour, réintégration et relèvement: ici, le but est de développer des initiatives de relance économique et cohésion sociale afin de renforcer la paix**.**

4 CONCLUSION

Cette dissertation a porté sur les voies et moyens en vue d'une riposte efficace de l'insécurité dans la Province du Bas-Uélé. Il est à noter que l'insécurité dans cette Province soulève deux questions fondamentales. La première est celle de la faible coordination régionale car les dynamiques à l'œuvre impliquent une collaboration régionale. La deuxième est celle de la gouvernance sécuritaire en RDC. Aujourd'hui, la plupart des problèmes d'ordre sécuritaire dans ce pays met en lumière la faible politique de la sécurité et de la défense.

L'Etat congolais qui devrait endiguer ce phénomène dans cette province a mené des actions qui ont levé le voile sur leur inefficacité. Par conséquent, depuis plus de dix ans, la Province du Bas-Uélé reste en proie à des attaques récurrentes de la LRA, des rafles, des pillages et d'incendies des maisons dirigés contre les villages reculés des grands centres de décisions du pays.

Partant, nous sommes parvenus à mettre sur pied un modèle théorique en vue d'enrayer la sécurité dans la province du Bas-Uélé. Dénommé « Modèle de la sécurité régionalisée », notre modèle théorique s'inscrit dans le cadre de la théorie du complexe de sécurité élaboré par Barry Buzan et considérant une région en tant qu'objet d'analyse à part entière.

Une telle approche régionale de sécurité permet donc de parler de la sécurité régionale en termes de modèle de relations entre les membres du complexe de sécurité. Un tel modèle émet l'hypothèse selon laquelle les analyses globales sont incapables de prendre en compte et d'identifier les préoccupations sécuritaires immédiates des États, c'est-à-dire les menaces de leur voisinage immédiat.

[14] Ferrari, F., Balemba, E. et Ngalamulume, Rapport *de l'évaluation finale des deux projets pilotes de stabilisation en RDC, dits IRF,* février 2017, p.11.

Les interactions sécuritaires avec les voisins sont plus nombreuses qu'avec les puissances du système international, et « l'interdépendance sécuritaire sur le système international dans son ensemble est loin d'être uniforme ». Ainsi ces régions sont un modèle d'anarchie miniature. Il paraît évident que toutes les régions du monde connaissent mécaniquement ce type d'interactions, du fait de la proximité géographique des États et de frontières communes.

Notre modèle théorique est donc fondé sur l'idée selon laquelle, les acteurs de l'insécurité dans le Bas-Uélé ont des ramifications internationales. De ce fait, les efforts de la sécurité dans le Bas-Uélé requièrent une coordination de tous les Etats de la région qui sont touchés l'activisme de ces acteurs.

Cette initiative de coordination doit venir surtout de la RDC dans la mesure où elle est victime des actions des Mbororo, mais surtout du fait qu'elle a vocation d'être un Etat leader dans la région. Entre-temps, l'Etat congolais doit créer des conditions d'une paix durable dans les zones touchées par les affres des violences dans le Bas-Uélé.

REFERENCES

[1] Agenonga Chober, Les forces du maintien de la paix des Nations Unies face aux menaces sécuritaires en RD Congo. Paradoxe d'imposition et de consolidation de la paix dans un Etat postconflit. Thèse de doctorat en RI, FSSAP, UNIKIS, 2018-2019.

[2] Delphine Vincent, Sur http://www.irenees.net/bdf_fiche-analyse-923_fr.html, consulté le 6 février 2025.

[3] Ferrari, F., Balemba, E. et Ngalamulume, Rapport de l'évaluation finale des deux projets pilotes de stabilisation en RDC, dits IRF, février 2017.

[4] François Gaulme, Consolider les Etats fragiles, in *Études,* Tome 412, 2010/6, pp. 729-740.

[5] International Crisis Group, *Afrique centrale: les défis sécuritaires du pastoralisme,* Rapport Afrique, n°215, 1er avril 2014.

[6] International Crisis Group, L'Armée de résistance du seigneur: une stratégie régionale pour sortir de l'impasse, Rapport Afrique N°157 – 28 Avril 2010.

[7] International Crisis Group, *La Centrafrique: les racines de la violence,* Rapport Afrique N° 230, 21 septembre 2015.

[8] Le Gouriellec, S., Sécuritisation et construction d'un complexe de sécurité régional dans la Corne de l'Afrique, In *Études internationales,* 2018, *49* (1), pp.83-104.

[9] Mahaut Landaz, Rôles et impacts des réseaux illicites de drogue dans le conflit nord-malien: Trafics, crise de l'Etat et puissance des groupes djihadistes et indépendantistes, Notes d'Analyse Politique n°46, août 2016.

[10] Milofsky, A., Sany, J., Illana Lancaster et Krentel, J., *Formation à la gestion de Conflits pour les Soldats de la Paix: Évaluation et Recommandations,* l'Institut des États-Unis pour la Paix. SPECIAL REPORT 411, août 2017.

[11] Nkoy Elela, D. (s/dir), Les migrations transfrontalières des Mbororo au Nord-est de la RD Congo: étude de cas au Haut-Uélé et au Bas-Uélé, IKV PAX CHRISTI, 2007.

[12] Petit Larousse illustré, 2018.

[13] Radio Okapi, *Bas-Uélé: des présumés LRA prennent en otage une centaine de personnes à Gumbu.* Sur https://www.radiookapi.net/2016/06/06/actualite/securite/bas-uele-des-presumes-lra-prennent-en-otage-une-centaine-de-personnes, consulté le 13 janvier 2025.

[14] Radio Okapi, *Ango: la population s'organise en groupes d'autodéfense populaire contre les LRA.* Sur https://www.radiookapi.net/sans-categorie/2009/01/02/ango-la-population-s%25e2%2580%2599organise-en-groupes-d%25e2%2580%2599autodefense-populaire-contre-les-lra, consulté le 13 juin 2025.

[15] Radio Okapi, *Bas-Uélé: 39 personnes kidnappées par des présumés LRA en une semaine à Sili. S*ur https://www.radiookapi.net/2018/09/01/actualite/securite/bas-uele-39-personnes-kidnappees-par-des-presumes-lra-en-une-semaine, consulté le 13 juin 2025.

[16] Radio Okapi, *RDC: environ 400 élèves d'Ango ne vont plus à l'école en RCA à cause de l'insécurité.* Sur https://www.radiookapi.net/2018/06/06/actualite/education/rdc-environ-400-eleves-dango-ne-vont-plus-lecole-en-rca-cause-de, consulté le 13 juin 2025.

International Journal of Innovation and Scientific Research
ISSN 2336-0046 Vol. 86 No. 1 Aug. 2026, pp. 124-132
© 2026 Innovative Space of Scientific Research Journals
http://www.ijisr.issr-journals.org/

Contribution du SIG dans l'étude cartographique des puits de forage d'eau et leurs incidents: Cas des quartiers Kemi (Righini), Livulu et Salongo dans la Commune de Lemba

[Contribution of GIS in the cartographic study of water boreholes and their incidents: Case of the Kemi (Righini), Livulu and Salongo neighborhoods in the Lemba Municipality]

Nsakala Tanda Reddy Andy[1-2], Mulopo Shinginyeka Fulgence[3], Ishaku Kaunga Omega[1], Ngumba Ngumba Victoire[1], Kazadi Mujinga Stella[1], Bondonga Mambomba Herve[1-4], Buluku Palamoke Grace[5], and Ntantay Judicaël[5]

[1]Centre National de Télédétection, Ministère de la Recherche Scientifique et Innovation Technologique, Kinshasa, RD Congo

[2]Département des Géosciences, Faculté de Sciences et Technologie, Université de Kinshasa, Kinshasa, RD Congo

[3]Département de Physique et Sciences Appliquées, Faculté de Sciences Exactes, Université Pédagogique Nationale, Kinshasa, RD Congo

[4]Centre de Recherches Géologiques et Minière, Ministère de la Recherche Scientifique et Innovation Technologique, Kinshasa, RD Congo

[5]Département de Pyrotechnique, Faculté de Sciences Agronomiques, Université de Lubumbashi, Katanga, RD Congo

Copyright © 2026 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the ***Creative Commons Attribution License***, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: Access to drinking water remains a major challenge in the Democratic Republic of Congo, particularly in Kinshasa, where rapid population growth exerts intense pressure on existing water infrastructure. In response to this crisis, the population of the Lemba Commune is turning massively to groundwater through an uncontrolled proliferation of individual boreholes, often drilled without adhering to the recommended spacing standards. This situation raises critical issues related to the sustainability of water resources, the stability of aquifers, and environmental quality.

This study employs Geographic Information Systems (GIS) tools to map the spatial distribution of more than 202 boreholes and analyze their hydrogeological and environmental impacts. The results reveal an excessive densification of extraction points, with distances sometimes reduced to 10-20 meters instead of the regulatory 150 meters, promoting overexploitation of aquifers, anthropogenic pollution, soil subsidence, and degradation of local ecosystems. Furthermore, the pressure exerted during drilling operations can induce local seismic risks, while the decline in groundwater levels compromises access to drinking water and resource quality.

This study highlights the importance of integrated and sustainable management of groundwater resources, supported by a dynamic GIS database, strict regulatory policies, and increased public awareness. By combining scientific expertise, geomatics technologies, and political will, it is possible to ensure the sustainability of urban water resources, which are essential for socio-economic development and environmental preservation in a rapidly expanding urban context.

KEYWORDS: Geographic Information Systems (GIS), Groundwater drilling, Potable water, Proliferation, Overexploitation, Pollution, Subsidence, City of Kinshasa, Lemba Commune

Corresponding Author: Nsakala Tanda Reddy Andy

RESUME: L'accès à l'eau potable demeure un défi majeur en République Démocratique du Congo, particulièrement à Kinshasa où la croissance démographique rapide exerce une pression intense sur les infrastructures hydrauliques existantes. Face à cette crise, la population de la Commune de Lemba se tourne massivement vers les eaux souterraines via une prolifération anarchique de forages individuels, souvent réalisés sans respect des normes de distanciation recommandées. Cette situation soulève des enjeux cruciaux liés à la durabilité des ressources en eau, à la stabilité des aquifères et à la qualité environnementale. Cette étude mobilise les outils des Systèmes d'Information Géographique (SIG) pour cartographier la répartition spatiale de plus de 202 forages et analyser leurs impacts hydrogéologiques et environnementaux. Les résultats révèlent une densification excessive des points de prélèvement, avec des distances parfois réduites à 10-20 mètres au lieu des 150 mètres réglementaires, favorisant la surexploitation des nappes, la pollution anthropique, l'affaissement des sols et la dégradation des écosystèmes locaux. Par ailleurs, la pression exercée lors des opérations de forage peut induire des risques sismiques locaux, tandis que la baisse du niveau des nappes compromet l'accès à l'eau potable et la qualité des ressources. Cette étude souligne l'importance d'une gestion intégrée et durable des ressources en eau souterraine, appuyée par une base de données SIG dynamique, des politiques réglementaires strictes et une sensibilisation accrue des populations. En conjuguant expertise scientifique, technologies géomatiques et volonté politique, il est possible d'assurer la pérennité des ressources hydriques urbaines, essentielles au développement socio-économique et à la préservation de l'environnement dans un contexte urbain en pleine expansion.

MOTS-CLEFS: Systèmes d'Information Géographique (SIG), Forage d'eau souterraine, Eau potable, Prolifération, Surexploitation, Pollution, Affaisssement, Ville de Kinshasa, Commune de Lemba

1 INTRODUCTION

L'accès à l'eau potable est un besoin fondamental et urgent pour l'humanité, au même titre que l'alimentation. Pourtant, malgré l'abondance apparente des ressources en eau en RD Congo (RDC), seulement 42 % de la population y a accès, un taux inférieur à celui de plusieurs pays sahéliens confrontés à des déficits hydriques chroniques (BM, 2017; AFD, 2020). KAMATHE (2005) et Ahmadou (2011) ont fait remarquer que les besoins en eau potable de des villes sont généralement en deçà des besoins réels de la population. Cette situation est particulièrement critique dans la ville de Kinshasa, où la croissance démographique rapide, avec un taux annuel moyen de 6,6 % et une population dépassant les 13 millions d'habitants exerce une pression considérable sur les infrastructures d'approvisionnement en eau. L'insuffisance des réseaux de distribution conjuguée à la vétusté des installations entraîne un accès limité à l'eau potable, aggravant les conditions sanitaires et imposant une charge disproportionnée sur les femmes et les enfants pour la collecte de l'eau (Bédécarrats et al., 2019; AFD, 2020).

Face à cette crise, la population se tourne massivement vers les eaux souterraines via la multiplication des forages, notamment dans la Commune de Lemba. Cette prolifération, souvent anarchique et non réglementée, soulève des enjeux majeurs liés à la durabilité des ressources en eau, à la stabilité des aquifères et à la qualité environnementale. L'absence de respect des normes de distanciation entre forages, parfois réduite à 10-20 mètres au lieu des 150 mètres recommandés, menace l'équilibre hydrogéologique local et accroît les risques de pollution anthropique et de dégradation des sols.

Cette étude vise à combler le déficit d'informations fiables sur la gestion des forages d'eau à Kinshasa en mobilisant les outils des Systèmes d'Information Géographique (SIG). En cartographiant la répartition spatiale des puits et en analysant leur impact, elle entend fournir aux décideurs des données précises pour orienter des politiques de gestion durable des ressources en eau souterraine, essentielles pour répondre aux besoins croissants de la population urbaine tout en préservant l'environnement.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

La méthodologie adoptée dans cette étude repose sur des enquêtes de terrain rigoureuses couplées à la collecte systématique de données géographiques précises à l'aide d'un GPS (marque Garmin 64), attribuées à des numéros de lieux spécifiques. Ces données ont permis la réalisation de simulations spatiales et l'élaboration de cartes thématiques à l'aide des outils SIG (Systèmes d'Information Géographique). Cette approche a facilité la visualisation et l'analyse spatiale de la répartition des puits de forage, ainsi que l'identification des zones à forte densité et des problématiques associées. L'utilisation des SIG s'est avérée cruciale pour comprendre l'impact de la prolifération des forages sur la stabilité des aquifères et la pollution anthropique, en offrant une base de données dynamique et actualisable pour les décideurs.

3 RÉSULTATS

3.1 CONTEXTE DE LA ZONE

La commune de Lemba, caractérisée par un relief de faible altitude dans sa partie sud (figure 1 et figue 2), présente des difficultés majeures en matière d'approvisionnement en eau potable. Cette topographie contribue à une pression hydraulique insuffisante et à la vétusté des infrastructures hydrauliques, aggravant l'accès à l'eau pour la population locale. Face à ces contraintes, la population s'oriente massivement vers l'exploitation des eaux souterraines par le biais de forages, qui se multiplient sans contrôle strict, exposant la zone à des risques hydrogéologiques et environnementaux importants.

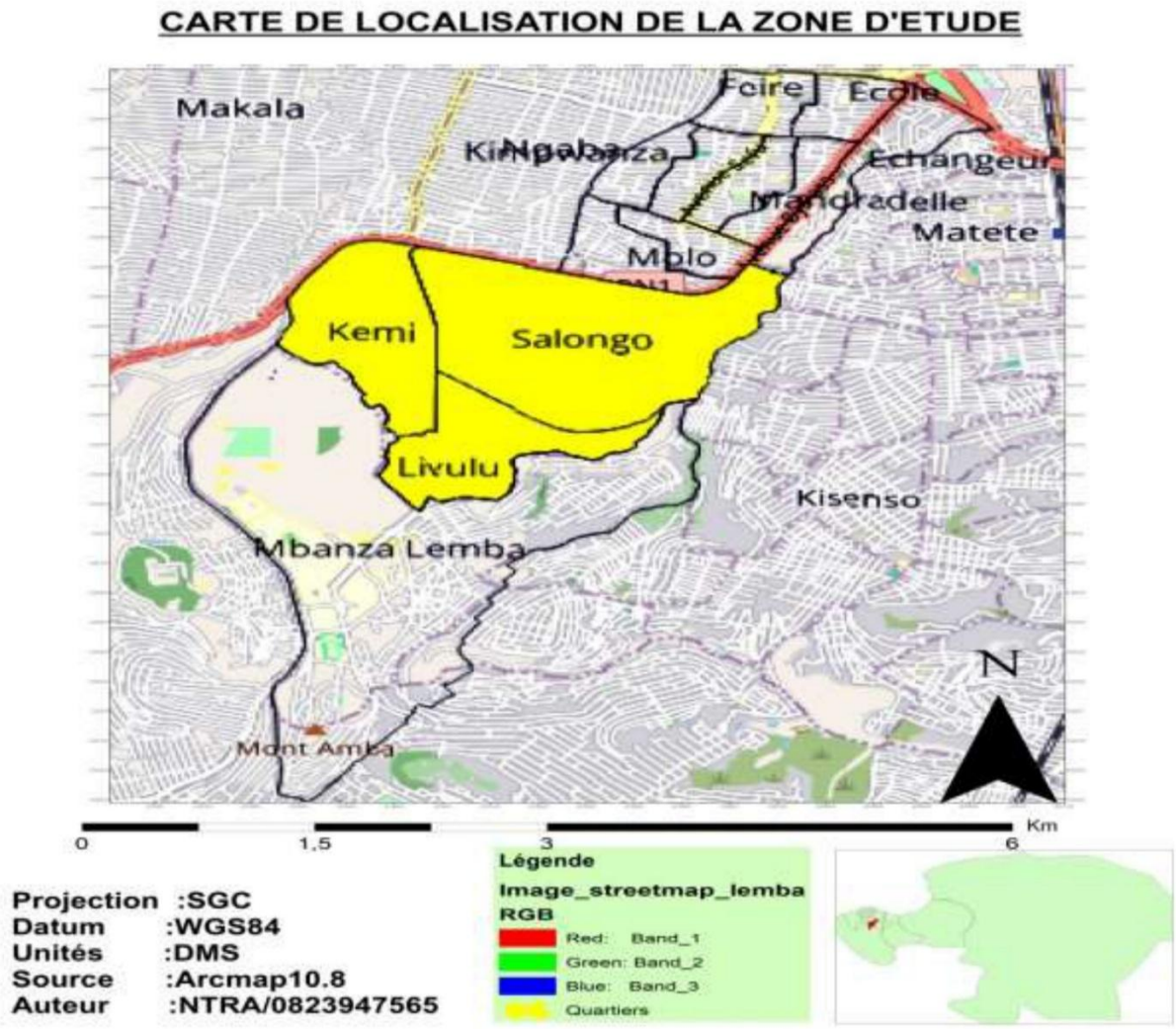


Fig. 1. Carte de localisation de la zone d'étude

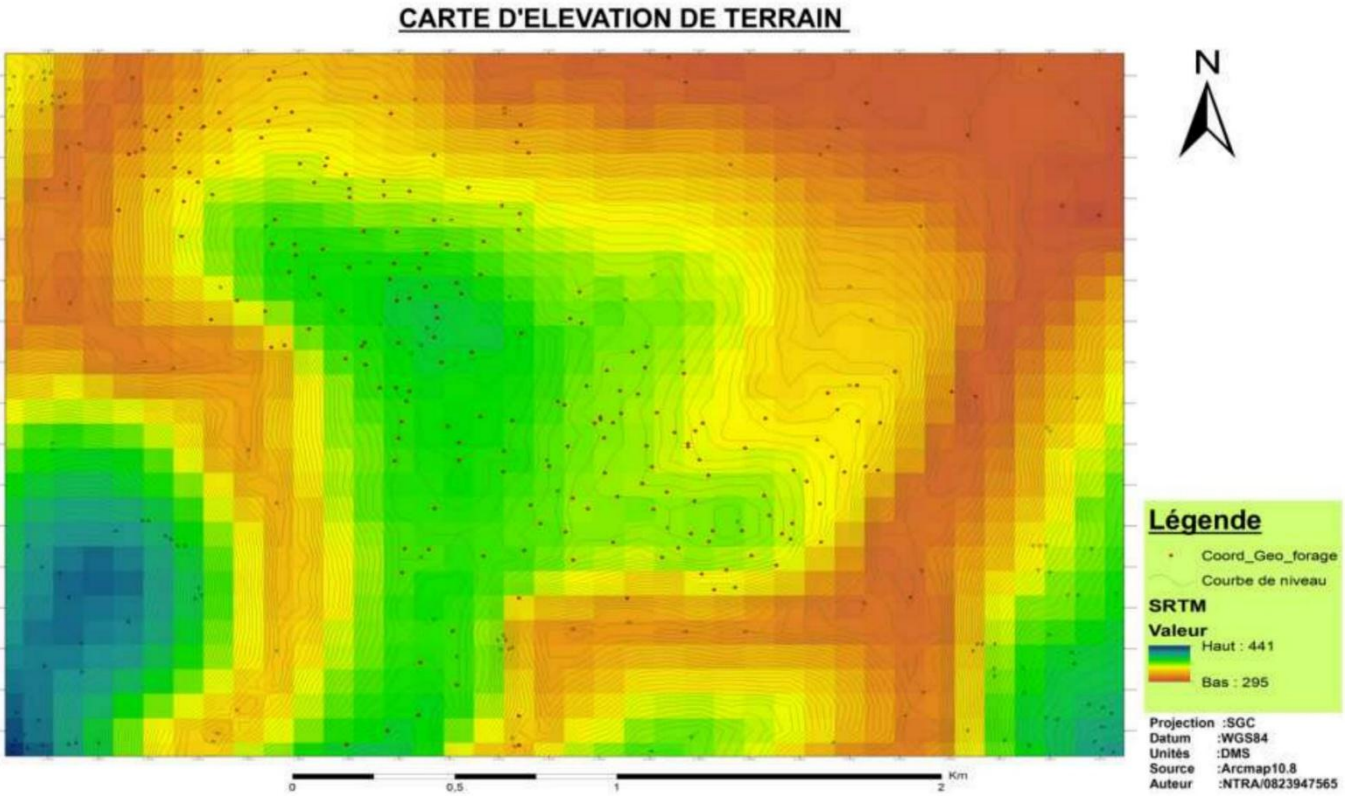


Fig. 2. Carte d'élévation de la zone d'étude

4 DISCUSSION

Pour répondre à la demande croissante d'eau potable, la population de Lemba recourt massivement aux eaux souterraines via des forages individuels. Cependant, ce recours devient problématique lorsque les distances minimales réglementaires entre points d'eau, fixées à 150 mètres, ne sont pas respectées. En RD Congo, l'absence d'une réglementation nationale harmonisée contribue à cette prolifération anarchique. Sur le terrain, on observe des forages espacés parfois de seulement 10 à 20 mètres, conséquence directe du morcellement des parcelles communément appelé « gilette", et de la volonté individuelle d'avoir un accès autonome à l'eau. Cette densification anarchique accroît les risques de surexploitation des nappes et de dégradation de la qualité de l'eau. Dans notre cas, l'étude a porté sur les prélèvements de 203 forages dénombrés (Tableau 1 et Figure 3).

Tableau 1. Données de forage par quartier

Quartiers	Nombre de forages	Moyenne en distanciation
Kemi (Righini)	84	± 15 m
Salongo	90	± 13 m
Livulu	29	± 18 m

Ces valeurs montrent que la moyenne des distances observées (13 à 18 m) est largement inférieure à la norme de 150 m, confirmant la densification excessive des forages.

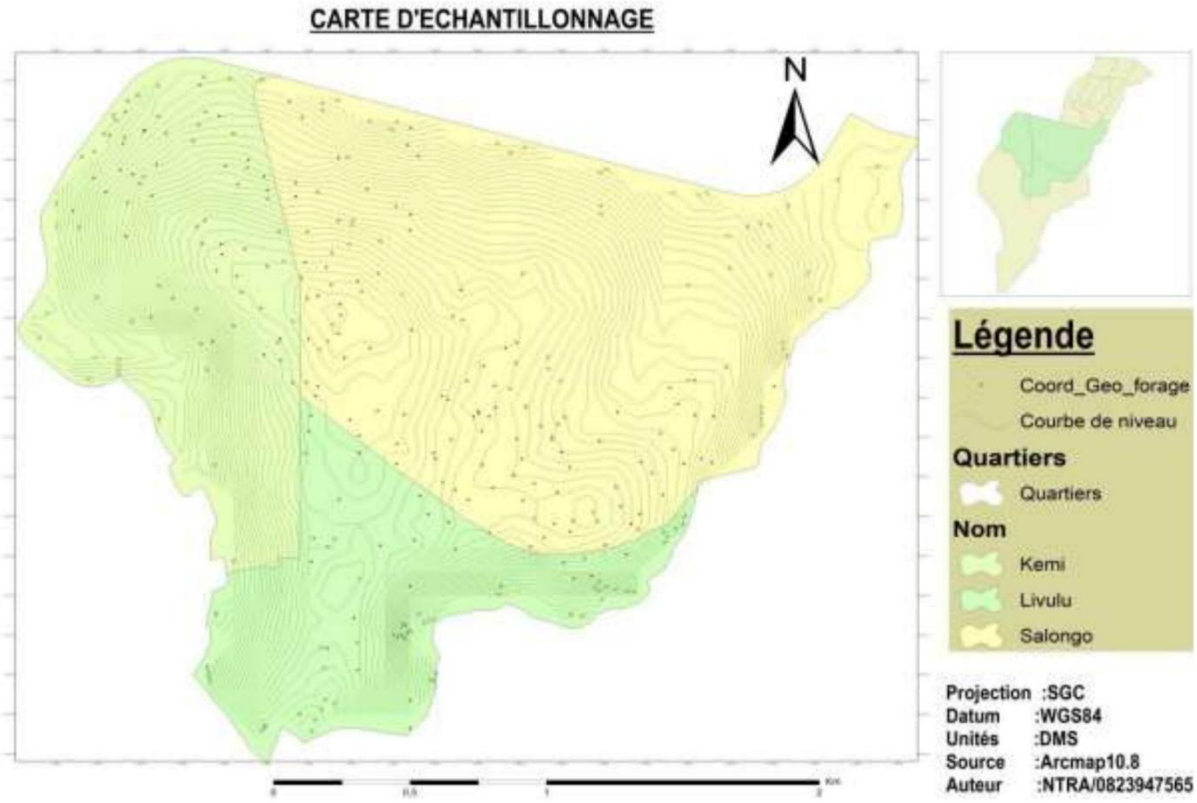


Fig. 3. Carte d'échantillonnage de puits de forage

La simulation SIG réalisée avec la fonction buffer a mis en évidence cette superposition des points d'eau (Figure 4), soulignant l'importance des outils géomatiques pour identifier les zones critiques et orienter des politiques de gestion adaptées. Ce constat rejoint la Directive Cadre Européenne sur l'eau (2008), qui stipule que l'état quantitatif des eaux souterraines est jugé bon lorsque les prélèvements ne dépassent pas la capacité de renouvellement naturelle des aquifères.

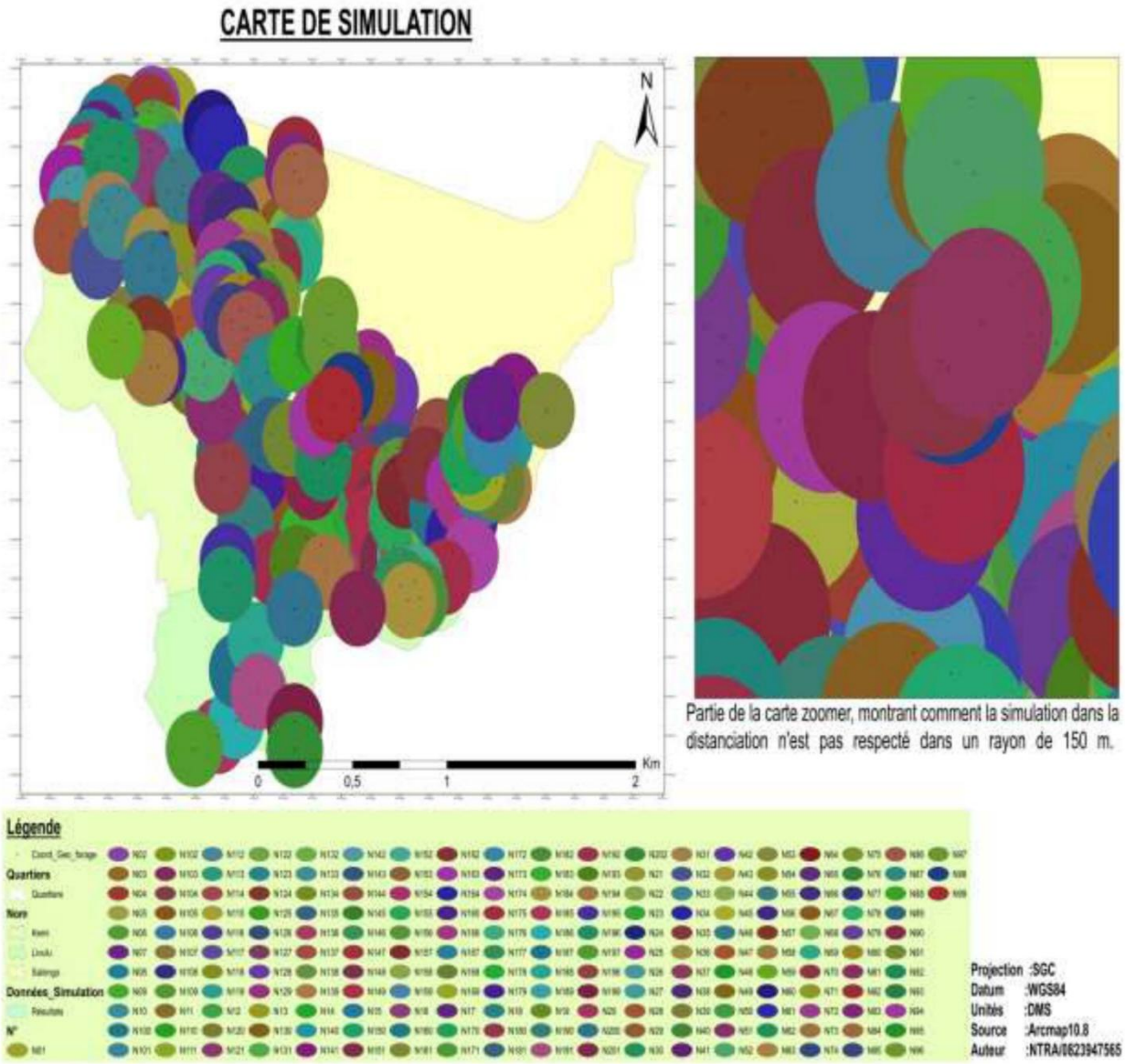


Fig. 4. Carte de simulation montrant le non-respect de la distanciation

4.1 INCIDENCE SUR LES FORMATIONS GÉOLOGIQUES

Pendant la foration, la pression exercée par les opérations de forage modifie l'équilibre des formations géologiques rencontrées, accumulant de l'énergie dans la roche mère qui peut être libérée par rupture le long de failles préexistantes, provoquant des tremblements de terre locaux. Cette dynamique a été observée dans plusieurs contextes, notamment au Québec (Lord, 2010) et à Conakry (Diop, 1990), illustrant le risque sismique associé à la prolifération des forages.

4.2 INCIDENCE SUR LA STABILITÉ DE L'AQUIFÈRE

Les aquifères, constitués de pores et de vides saturés d'eau, maintiennent un équilibre hydrostatique essentiel à la stabilité géologique. Le pompage intensif des eaux souterraines perturbe cet équilibre, entraînant plusieurs effets néfastes:

- Baisse du niveau de la nappe phréatique: Le pompage excessif fait chuter le niveau de la nappe, rendant l'accès à l'eau plus difficile et coûteux, et pouvant entraîner une dégradation de la qualité de l'eau par intrusion de polluants;
- Détérioration de la qualité de l'eau: La surexploitation favorise la remontée de substances indésirables, compromettant la potabilité;

- Affaissement des sols: L'extraction excessive provoque la compaction des matériaux aquifères poreux, entraînant un abaissement progressif de la surface du sol. Ce phénomène, documenté dans des villes comme celles de Chine, du Japon, du Mexique et des États-Unis, engendre des dommages structurels aux infrastructures (canalisations, routes, bâtiments) et augmente le risque d'inondation. Les images satellitaires de la NASA et de l'ESA (www.sjra.net) illustrent ces affaissements majeurs, notamment dans la vallée de San Joaquin en Californie, où le sol s'est affaissé jusqu'à 8,5 mètres entre 2015 et 2016 (Figure 5).

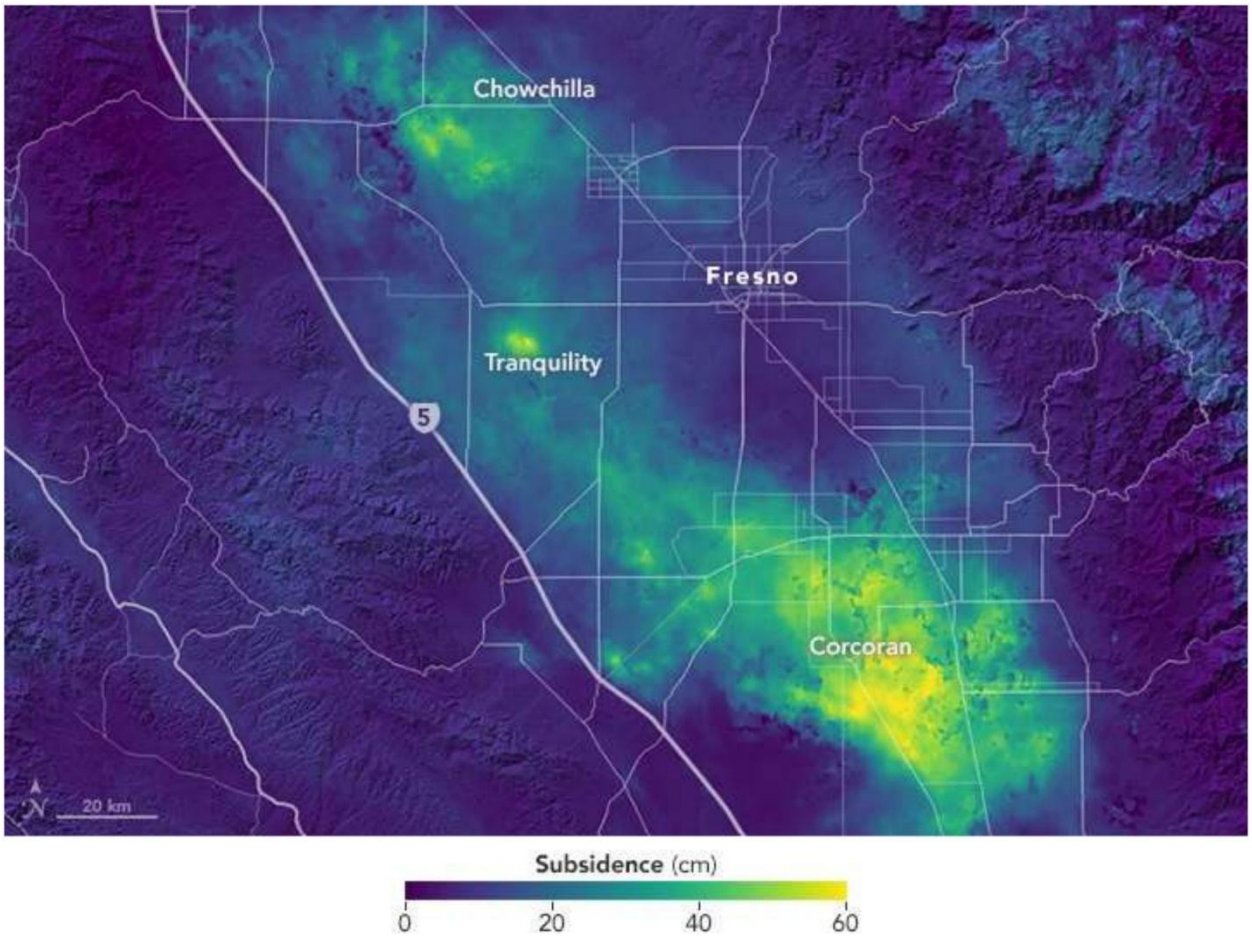


Fig. 5. Affaissement de certaines zones de Californie en cm. Source: NASA (www.sjra.net).

Depuis les années 1920, le pompage excessif des eaux souterraines dans des milliers de puits dans la vallée de San Joaquin en Californie a causé l'affaissement des terres dans certaines parties de la vallée, ou évier, jusqu'à 28 pieds (8,5 mètres).

4.3 INCIDENCE LIÉE A LA POLLUTION ANTHROPIQUE

L'urbanisation rapide, le développement industriel, les activités agricoles et minières exposent les aquifères à un risque croissant de pollution. Une fois contaminés, ces réservoirs souterrains deviennent impropres à l'usage pendant des décennies, rendant les mesures de réhabilitation longues, complexes et coûteuses (Ninamou et al., 2021). La prise de conscience tardive de cette pollution aggrave la situation, soulignant l'urgence d'une gestion proactive.

4.4 INCIDENCE SUR LES ECOSYSTÈMES

Les eaux souterraines alimentent les cours d'eau de surface, les sources et les zones humides, constituant un élément vital pour les écosystèmes aquatiques et terrestres. La surexploitation des nappes entraîne la diminution des débits de base des rivières, le tarissement des sources et la dégradation des habitats naturels, affectant la biodiversité et les services éco-

systémiques essentiels (Ninamou et al., 2021). Cette dégradation impacte également les communautés humaines dépendantes de ces ressources.

4.5 INCIDENCE LIÉE A LA NORME DE DISTANCIATION ENTRE PUITS DE FORAGE

La distance minimale recommandée entre deux puits de forage est de 150 mètres, afin de limiter les interférences hydrogéologiques et de réduire les risques de pollution croisée. Cette norme est cohérente avec les principes de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau (2000/60/CE), qui stipule que l'état quantitatif des eaux souterraines est jugé bon lorsque les prélèvements ne dépassent pas la capacité de renouvellement naturelle des aquifères. De plus, les Guidelines for Drinking-water Quality de l'OMS (2017, UNESCO 2019 et FAO 2015) insistent sur l'importance de la protection des captages contre les contaminations anthropiques, ce qui implique une distanciation suffisante entre les points de prélèvement.

En contexte urbain dense comme Kinshasa, cette norme doit être considérée comme un seuil minimal, et adaptée selon la nature des aquifères et la pression démographique.

5 CONCLUSION

La construction et la gestion des puits de forage ne peuvent être improvisées ni déconnectées des réalités géologiques et environnementales. Elles exigent une expertise hydrogéologique rigoureuse pour garantir la durabilité des ouvrages et minimiser leur impact sur les aquifères et les écosystèmes. L'étude menée dans certains quartiers de la Commune de Lemba montre que le non-respect de la norme de distanciation de 150 mètres et la prolifération anarchique des forages peuvent entraînés des conséquences graves, notamment: la baisse du niveau des nappes, la pollution des eaux, l'affaissement des sols et la dégradation des écosystèmes. Pour prévenir ces effets, une gestion intégrée et durable des ressources en eau souterraine est indispensable. Cela implique:

- La limitation stricte du nombre de forages et l'application effective des normes de distanciation;
- La promotion de techniques favorisant la recharge des nappes;
- La mise en place de quotas de prélèvement adaptés;
- L'intégration de la protection des eaux souterraines dans les plans d'urbanisme.

Les outils SIG constituent un levier puissant pour cartographier, analyser et surveiller la répartition des forages, fournissant aux décideurs une base scientifique solide. En conjuguant expertise scientifique, technologies géomatiques et volonté politique, il est possible d'assurer une gestion responsable des ressources en eau souterraine, garantissant leur disponibilité pour les générations présentes et futures.

REFERENCES

[1] Ahmadou, B.M. (2011). *Projet d'amélioration en eau potable sur le plateau de l'université de Kinshasa*. [Diplôme d'études supérieures spécialisées en aménagement et gestion intégrés des forêts et territoires tropicaux].

[2] Agence Française de Développement (2020). Eau, assainissement, conditions de vie au Congo. Rapport d'analyse de l'enquête de référence pour l'évaluation d'impact du projet PILAEP 2. Papiers de recherche. N°135 Septembre 2020, https://www.afd.fr/fr/collection/papiers-derecherche.

[3] Banque Mondiale (2017). WASH Poor in a Water-Rich Country: A Diagnostic of Water, Sanitation, Hygiene, and Poverty in the Democratic Republic of Congo. https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/27320.

[4] Bédécarrats, F, Lafuente, S.O, Leménager, M &Lukono, S.D. (2019). Building commons to cope with chaotic urbanization Performance and sustainability of decentralized water services in the outskirts of Kinshasa. Journal of Hydrology 573 (2019) 1096-1108.

[5] Diop, S. (1990). La côte Ouest-Africaine: Du saloum (Sénégal) à la mella corée (Guinée). Ed. ORSTOM. Paris.

[6] Directrice Cadre Européen sur l'Eau (2008). Circulaire DCE 2006/18 du 21/12/06 relative à la définition du bon état pour les eaux souterraines, en application de la directive 2000/60/DCE du 23 octobre 2000 du Parlement et du Conseil (Cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau).

[7] FAO (2015). Groundwater Governance: A Global Framework for Action. Rome.

[8] Kamathe, K. (2005). *Gestion locale de l'eau dans les quartiers urbains pauvres. Cas de Kinshasa*. Rapport de recherche. Centre de recherches pour le développement international. Initiative de Programme Pauvreté Urbaine et Environnement.

[9] Lord, G. (2010). *Ressources naturelles Canada*. Consulté au mois de février 2025, sur http://earthquakescanada.nrcan.gc.ca/zones/eastcan-fra.php.

[10] NASA: Image d'affaissement de certaines zones de Californie en cm. (www.sjra.net).
[11] Ninamou, T &Diakite, S. (2021). Incidence de la proliferation des forages sur l'état quantitative des nappes souterraines de la commune de Rotoma-Conakry. African Scientific Journal. INSS: 2658-9311. Vol: 3, Numéro 8, Octobre 2021.
[12] OMS (2017). Guidelines for Drinking-water Quality. 4th Edition. Geneva.
[13] UNESCO (2019). Groundwater: Making the Invisible Visible. Paris.

International Journal of Innovation and Scientific Research
ISSN 2336-0046 Vol. 86 No. 1 Aug. 2026, pp. 133-167
© 2026 Innovative Space of Scientific Research Journals
http://www.ijisr.issr-journals.org/

Utilisation des fonctions de régression en vue de mettre en évidence les corrélations entre les déplacements et entre les efforts tranchants de masses de chaque niveau des structures de bâtiments de type R+9 sans éléments de contreventement dans les zones sismiques de Goma et de Bukavu en République Démocratique du Congo (RDC)

[Use of regression functions to highlight correlations between displacements and between the shear forces of masses at each level of the G+9 storey building without shear walls or bracing systems in seismic zones of Goma and Bukavu in the Democratic Republic of Congo (DRC)]

Moundom Amadou[1], Mapendo Kabyabu Feja[2], and Tamo Tatietse Thomas[3]

[1]Maître de conférences (Associate Professor or Reader) en Génie Civil, FASA, Université de Dschang, Cameroon

[2]Etudiant en Master Complémentaire (D.E.A) en Structures de Génie Civil, Institut National du Bâtiment et des travaux Publics (INBTP) de Kinshasa, RD Congo

[3]Professeur Titulaire (HDR) en Génie Civil, ENSPY, Université de Yaoundé 1, Cameroon

Copyright © 2026 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the ***Creative Commons Attribution License***, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: This work focuses on the seismic design of reinforced concrete structures in highly seismic areas such as Goma and Bukavu. Entitled 'Use of regression functions to highlight correlations between displacements and between the shear forces of masses at each level of the G+9 storey building without shear walls or bracing systems in seismic zones of Goma and Bukavu in the Democratic Republic of Congo (DRC) ', the study aims to analyze the influence of soil properties on the seismic behavior of a (G+9) or 10 storey building in accordance with the provisions of Eurocode 8. The analyses and designs were carried out according to the norm RPA99 modified 2003, MATLAB (for simplified manual calculations), Robot structural Analysis Professional (for automated calculations), Eurocode 8, Eurocode 2, Reinforced concrete to limit States 91 (mod.99). The building is a ten-storey reinforced concrete structure without shear walls or bracing systems, in order to clearly observe the effect of soil type on dynamic behavior. Two types of analyses were carried out: A manual static analysis for the preliminary design of structural elements (beams, columns, footings), and a modal response spectrum analysis according to Eurocode 8 for seismic evaluation. The results reveal that soft soil from Bukavu (Class C) produces higher internal forces, with an average increase in base shear forces of approximately 41%, and a 42% increase in lateral displacements compared to hard soil from Goma (Class A). Two regression functions use in this work showed the corelation between the displacements and the shear forces of masses of levels of the G+9 storey building without shear walls or bracing systems in seismic zones of Goma and Bukavu. This is due to the amplification of seismic waves in soft soils, which significantly affects tall buildings. Finally, the generated reinforcement plans were adapted to the specific loads for each soil type, highlighting the importance of adjusting the design to local ground conditions. This study underlines the critical impact of soil type on seismic analysis and structural design. It emphasizes the importance of prior geotechnical investigations and strict adherence to Eurocode 8 provisions to ensure structural safety in seismic regions.

KEYWORDS: Eurocode 8, reinforced concrete structures, seismicity, soft soil, hard soil, modelling, linear regression functions, polynomial regressions.

Corresponding Author: Moundom Amadou

RESUME: Le présent travail s'inscrit dans le cadre de la maîtrise du dimensionnement parasismique des structures en béton armé, dans des régions à forte activité sismique telles que Goma et Bukavu. Intitulé « Utilisation des fonctions de régression en vue de mettre en évidence les correspondances entre les déplacements et entre les efforts tranchants de masses de chaque niveau des structures de bâtiments de type R+9 sans éléments de contreventement dans les zones sismiques de Goma et de Bukavu en République Démocratique du Congo (RDC) », ce travail vise à analyser l'influence des caractéristiques du sol sur le comportement sismique d'un bâtiment de type, conformément aux exigences de l'Eurocode 8. Les analyses et dimensionnements ont été réalisés à l'aide de la norme RPA99 modifié 2003, MATLAB (pour les calculs simplifiés manuels), Robot structural Analysis Professional (pour les calculs automatiques), l'Eurocode 8, l'Eurocode 2, le Béton Armé aux États Limites 91 (mod.99). Le bâtiment analysé est une structure de dix niveaux en béton armé, sans éléments de contreventement, pour observer clairement l'effet de la nature du sol sur son comportement dynamique. Deux types d'analyses ont été menés: Une analyse statique manuelle pour le prédimensionnement des éléments (poutres, poteaux, semelles), et une analyse modale spectrale selon l'Eurocode 8 pour évaluer les effets sismiques. Les résultats montrent que le sol meuble de Bukavu (classe C) génère des sollicitations plus élevées, avec une augmentation moyenne des efforts tranchants à la base de l'ordre de 41 %, et une augmentation des déplacements latéraux d'environ 42 % par rapport à un sol dur de Goma (classe A). Deux fonctions de régression utilisées à cet effet ont mis en évidence les correspondances entre les déplacements et les efforts tranchants des masses de niveaux des structures des bâtiments de type R+9 sans éléments de contreventement dans les zones sismiques de Goma et de Bukavu. Cela s'explique par le phénomène d'amplification des ondes sismiques dans les sols souples, qui affecte plus fortement les structures de grande hauteur. Enfin, les plans de ferraillage générés ont été adaptés aux sollicitations spécifiques de chaque type de sol, mettant en évidence l'importance d'un dimensionnement différencié selon les conditions locales. Ce travail met en lumière l'impact crucial de la nature du sol dans l'analyse et le dimensionnement sismique des bâtiments. Il rappelle l'importance de l'étude géotechnique préalable et de l'application rigoureuse des normes telles que l'Eurocode 8, pour garantir la sécurité des constructions en zone sismique.

MOTS-CLEFS: Eurocode 8, Structures en béton armé, sismicité, sol meuble, sol dur, modélisation, fonctions de régression linéaire, fonctions de régression polynômiale.

1 INTRODUCTION GENERALE

1.1 CONTEXTE GÉNÉRAL

Les structures en béton armé sont fondamentales dans la construction mondiale de bâtiments et d'ouvrages d'art, mais elles doivent supporter plus que les seules charges statiques, incluant les actions dynamiques comme les séismes. Le séisme est un aléa naturel majeur, imprévisible, dont les effets entraînent des déplacements et des déformations susceptibles d'engendrer des dégâts matériels considérables et des pertes humaines. Pour limiter ces conséquences, des normes parasismiques ont été mises en place, assurant un niveau de sécurité minimal; par conséquent, le dimensionnement des structures doit à la fois assurer une résistance suffisante aux actions sismiques et une ductilité capable d'absorber l'énergie due aux déformations. Toutefois, l'intégration de l'aléa sismique dans la conception reste un défi majeur pour les ingénieurs civils, particulièrement dans notre région, où les contraintes géo-structurelles et les ressources disponibles diffèrent des standards internationaux.

1.2 PROBLÉMATIQUE

Les tremblements de terre, bien que brefs, figurent parmi les catastrophes naturelles les plus destructrices, en raison de leur imprévisibilité et de leur puissance.

À l'échelle internationale, plusieurs événements récents ont montré l'ampleur du risque: en 2018, environ 26 séismes ont causé la mort de plus de 3 000 personnes; le 6 février 2023, un double séisme en Turquie et en Syrie a provoqué plus de 50 000 décès; le 28 mars 2025, un séisme de magnitude 7,7 au Myanmar a causé la mort de plus de 3 700 personnes et d'importants dégâts aux infrastructures.

À l'échelle régionale, la République Démocratique du Congo, particulièrement sa partie orientale, est également exposée. Les villes de Goma et de Bukavu, situées dans la vallée du Rift Albertin, ont connu plusieurs événements notables: le séisme du

24 novembre 2002 (magnitude 6), celui du 3 février 2008 (magnitude 5,9, avec 9 morts et plus de 1 500 maisons détruites), et plus récemment, le 27 mars 2023 (magnitude 4,5 ressenti à Goma et ses environs).

De plus, le 28 juillet 2025, deux secousses de magnitude 5,1 ont été enregistrées le même jour, l'une près de Bukavu (152 km) et l'autre près de Goma (237 km), confirmant la persistance du risque sismique dans la région.

Dans un contexte de forte croissance immobilière, l'intégration du risque sismique dans la conception et le calcul des bâtiments devient donc une priorité pour protéger les populations.

1.3 OBJECTIFS DU SUJET

En traitant le présent sujet, les objectifs suivants, doivent être atteints:

- **Objectif principal**

Concevoir et dimensionner la structure d'un bâtiment type en tenant compte des normes parasismiques, en utilisant à la fois la méthode simplifiée (modèle des brochettes) et le calcul automatique (Robot Structural Analysis), afin d'évaluer la sécurité et la performance des constructions dans les villes de Goma et Bukavu.

- **Objectifs spécifiques**

- Réaliser une analyse statique et dynamique d'un bâtiment type à 10 niveaux à l'aide du logiciel Robot Structural Analysis et de la méthode simplifiée (modèle des brochettes).
- Comparer les effets sismiques propres aux villes de Goma et Bukavu à partir du comportement structurel d'une ossature type.
- Évaluer l'influence de l'isolation parasismique sur la période propre des structures et sa capacité à réduire les effets destructeurs des séismes.
- Établir une relation entre les réponses sismiques issues des deux sites étudiés en utilisant conjointement la méthode simplifiée et le calcul automatique.
- Proposer des recommandations pour l'intégration efficace des normes et techniques parasismiques dans les pratiques de construction locales.

2 REVUE DE LA LITTERATURE

2.1 DÉFINITIONS DES CONCEPTS CLÉS RELATIFS A LA NAISSANCE DU SÉISME

Un séisme est un ébranlement de l'écorce terrestre provoqué par le jeu d'une cassure, une éruption volcanique ou certaines activités humaines. Il correspond à la libération soudaine de l'énergie mécanique accumulée par les roches au cours d'une déformation progressive (Plumier, 2014).

La plupart des tremblements de terre se produisent au niveau des failles qui délimitent les plaques tectoniques de l'écorce terrestre. Des tensions apparaissent lorsque ces plaques se déplacent mutuellement de manière lente. La libération soudaine de l'énergie de déformation ainsi accumulée dans la croute terrestre, ou dans la couche sous-jacente appelée manteau, provoque un ébranlement local dont une partie de l'énergie se transforme en ondes sismiques à la surface de la terre.

La création d'une faille ou, plus fréquemment, le glissement le long d'une faille existante, constituent le mécanisme générateur d'un séisme. Les dégâts observés en surface sont fonction de l'amplitude, la fréquence et la durée des vibrations. On distingue:

Les séismes tectoniques: Ce sont les plus fréquents et les plus dramatiques. Ils se situent souvent à l'intersection de deux plaques. Les causes sont la subduction (il y a glissement d'une plaque par-dessus l'autre), la collision, ainsi que l'apparition de rift (la croûte terrestre s'amincit, ce qui mène à une rupture lithosphérique).

Les séismes d'origine volcanique: Ceux-ci résultent de l'accumulation de magma dans les volcans et il y a des ruptures dues aux roches comprimées. Ils sont donc provoqués par des fractures et par les mouvements des roches poussées par le magma qui se fraie un chemin vers la surface.

Les séismes d'origine polaire: Ils sont dus aux cassures des glaciers qui se produisent lorsque l'avancée des coulées de glace est irrégulière. Le nombre de séismes de ce type est en hausse depuis plusieurs années, à cause du réchauffement climatique.

Les séismes d'origine artificielle: Ces séismes induits sont dus à certaines activités humaines telles que les barrages, les pompages profonds, l'extraction minière, les explosions souterraines, ou même les bombardements. Ils sont relativement fréquents et de faible amplitude.

2.2 PRINCIPAUX FACTEURS DE VULNÉRABILITÉ DES STRUCTURES EN BÉTON ARME

Au début d'un tremblement de terre, la maçonnerie reprend presque toutes les forces sismiques, mais après elle s'écroule souvent par compression oblique ou glissement (faible frottement suite à un manque de compression). Il peut aussi arriver que la maçonnerie cisaille les piliers (Zacek, 1996).

Une combinaison extrêmement défavorable de deux méthodes de construction très différentes: les cadres sont souples et plus ou moins ductiles, la maçonnerie est rigide et en même temps fragile.

La liquéfaction des terrains résultant d'un tremblement de terre entraîne des désordres au niveau de la composition du sol où reposent les fondations. Ceci provoque l'affaissement de la couche non liquéfiée sur la couche liquéfiée, et a pour conséquence le mouvement ou la giration de la structure (Balendier, 2010).

Le rez-de-chaussée de cette structure est devenu quasiment souterrain, la liquéfaction du sol a entraîné son enfoncement.

Pour remédier à ce problème, des essais sont réalisés en laboratoire par des géotechniciens afin d'examiner si le sol de fondation de la future structure est liquéfiable. En général il s'agit de sable fin à moyen à grains arrondis et saturé en eau, se trouvant entre deux couches d'argile imperméable.

Lorsque c'est le cas, il est préférable de ne pas fonder la structure sur ce type de sol et essayer d'atteindre d'autres profondeurs où le terrain sera plus avantageux (Zacek, 1996).

De nombreux bâtiments comportent un ou plusieurs niveaux dont la rigidité horizontale est sensiblement inférieure à celle des autres étages. Lors de séismes destructeurs, ces niveaux sont fréquemment écrasés suite à la rupture de poteaux à leurs extrémités. Le cas se produit quand ces poteaux assurent la résistance aux charges horizontales du niveau " souple ".

La rupture a habituellement lieu à leurs jonctions avec les planchers supérieur et inférieur, car le rayon de courbure y est petit et le besoin de ductilité (de plasticité) très important, dépassant la capacité de déformation des poteaux usuels.

D'une manière générale, les dommages sismiques se produisent de préférence au droit d'un changement de rigidité, à la jonction d'un élément " souple " et d'un élément rigide (Millard, 2004).

Un confinement dense du béton aux extrémités des poteaux, ainsi que la présence d'un gousset ou d'un chapiteau, améliore leur comportement sans toutefois leur assurer une capacité de résister à un séisme de forte magnitude. Les véritables solutions consistent à conférer au niveau concerné une rigidité horizontale comparable à celle des autres niveaux.

Dans le cas de colonnes courtes et massives, il se produit un énorme gradient de moment et ainsi un grand effort tranchant, qui entraîne, avant même d'atteindre $M_{pl,}$ une rupture par cisaillement (une alternative pour éviter une telle rupture est de les dimensionner au cisaillement et de les construire selon les règles du dimensionnement en capacité) (. Zacek, 1996).

Chaque bâtiment doit être classé selon sa configuration en plan et en élévation en bâtiment régulier ou non, selon les critères ci-dessous:

Critères de régularité de la structure: Pour offrir une meilleure résistance aux séismes, les ouvrages doivent de préférence avoir, d'une part des formes simples, d'autre part, une distribution aussi régulière que possible des masses et des rigidités tant en plan qu'en élévation. Le but recherché est d'assurer la meilleure répartition possible des sollicitations à travers la structure de façon à faire participer tous les éléments à l'absorption et à la dissipation de l'énergie développée par l'action sismique (Norme RPA 99 modifié 2003; Moundom et *al*., 2026).

Critère de régularité en plan: Le mouvement sismique horizontal est un phénomène bidirectionnel. La structure doit être capable de résister à des actions horizontales suivant toutes les directions et les éléments structuraux doivent avoir des caractéristiques de résistance et de rigidité similaires dans les deux directions principales, ce qui se traduit par le choix de formes symétriques Norme RPA 99 modifié 2003; Moundom et *al*., 2026). À chaque niveau et pour chaque direction de calcul, la distance entre le centre de gravité des masses et le centre des rigidités ne dépasse pas 15% de la dimension du bâtiment mesurée perpendiculairement à la direction de l'action sismique considérée. La forme du bâtiment doit être compacte avec un rapport longueur/largeur du plancher inférieur ou égal 4 (Norme RPA 99 modifié 2003; Moundom et *al*. 2026).

2.3 NOTIONS DE DYNAMIQUE DES STRUCTURES

Les travaux de Moundom et *al*. 2026 ont consacré une grande part aux notions dynamiques des structures.

2.4 BASSIN DU CONGO

L'origine des mouvements tectoniques est inconnue dans le bassin du Congo. Aucune surface de rupture n'est documentée jusque-là, pourtant bien de chocs de tremblement sont enregistré dans cette région. Dans l'historique sismique de la région, les séismes remarquables enregistrés sont entre autres de magnitude Mb=5,4 à Mb=5,6, enregistré pendant la période allant de 1976 à 1998. Ces séismes avaient été étudiés par Fairhead et Stuart (1982), Diewonski et *al.,* (1996) et Atalay (2002). Ils ont montré que le bassin du Congo est prédominé par un état de compression horizontal. Le mécanisme des failles de ces séismes montre approximativement une orientation Est- Ouest qui sont expliqué par des mouvements de compression horizontaux des plateaux africains, due aux forces de poussé originaire des crêtes centrales dans le milieu de l'Atlantique et du système des failles de l'Afrique de l'Est (EARS: East Africain Rift System).

3 MATERIELS ET METHODES

3.1 MILIEU D'ÉTUDE

- **Ville de Goma**

La ville de Goma se situe dans le système de Rift Est-Africain, une région de l'Est de l'Afrique. La structure du sol de Goma est rocheuse en raison des éruptions volcaniques des volcans situés au nord de la ville, notamment le Nyiragongo et le Nyamulagira. Ces volcans, toujours en activité, offrent à la ville une couche de lave altérée. La région de Virunga est sensible à la tectonique du Rift et présente une activité sismique marquée, souvent liée à l'activité magmatique et à la fracturation sous les volcans (Moundom et *al*., 2026).

La région de Virunga est sensible à la tectonique du Rift et présente une activité sismique marquée, souvent liée à l'activité magmatique et à la fracturation sous les volcans. Les éruptions volcaniques du Nyiragongo affectent régulièrement la ville de Goma. La plus récente, survenue le 22 mai 2021, a causé des coulées de lave, des tremblements de terre, des fissurations du sol, des destructions de maisons et des pertes humaines. La magnitude la plus élevée enregistrée pendant cette période fut de 5,2, le 25 mai 2021 à 11h03 heure locale, avec un épicentre situé dans la partie sud de la ville (1,71° S; 29,23° E) et à une profondeur de 8 km (source: Observatoire Volcanologique de Goma).

La ville de Goma est exposée aux séismes, soit dus à l'activité volcanique, soit aux tensions accumulées à l'intérieur de la plaque tectonique. Le séisme le plus fort enregistré près de Goma au cours des 100 dernières années fut de magnitude 6,2, survenu à Bukavu le 24 octobre 2002.

- **Ville de Bukavu**

La ville de Bukavu est située dans la partie Est de la République Démocratique du Congo, elle est limitée à l'Ouest et au sud par le territoire de Kabare, au nord par le lac Kivu et à l'Est par la vallée de la Ruzizi, affluant permettant au lac Kivu de se déverser dans le lac Tanganyika et qui forme la frontière naturelle avec le Rwanda et le Burundi. De ce fait Bukavu a été et est encore amenée à jouer un rôle stratégique important dans le domaine politique, administratif, économique et intellectuel. Située sur la rive sud-ouest du Lac Kivu, elle est la capitale de la province du Sud-Kivu. La ville comptait environ 845 000 habitants, et quelques 250 000 habitants dans la banlieue et les villages alentours. Avec un relief montagneux, elle offre un climat tropical de montagne en deux saisons (Moundom et *al*., 2026).

La géographie de Bukavu se caractérise par des terrains fragiles à cause des failles (cassures) qui apparaissent en surface à plusieurs endroits. Les couches qui constituent les terrains comportent des roches d'origine volcanique (basaltes et trachytes surtout) fortement altérées (décomposées et pourries responsable de la formation des sols argileux très bien connus à Bukavu). A plusieurs endroits, ces couches de roches volcaniques sont séparées entre elles par des dépôts d'argiles rouges appelées « lits argileux rouges ». C'est au niveau de ces lits argileux rouges qu'apparaissent souvent à Bukavu les sources d'eaux. Au contact avec l'eau les lits argileux rouges sont glissant et se comportent donc comme couches-savons, ce qui facilite le glissement des terrains superficiels qu'ils supportent, surtout quand ces derniers sont gorgés d'eau et qu'ils se trouvent sur une pente.

3.2 MATÉRIELS

Pour mener à bien nos recherches, nous avons eu recours à la norme Européenne ENV1998-1-1 (2005) règlementant le calcul des structures en zone sismique ainsi qu'à bon nombre d'autres documents traitant de la dynamique des structures appliqué au génie parasismique. En ce qui concerne les calculs mathématiques très lourds à effectuer à la main, nous avons utilisé le logiciel MATLAB (MatrixLaboratory) (*TheMathworksInc., 2007*) afin de gagner en temps et précision.

Par ailleurs, pour déterminer la valeur de l'accélération du sol a_gR , nous avons exploité les cartes de l'aléa sismique de la Republique du Congo établies par Mavonga, et *al.,* (2010).

3.3 MÉTHODES

3.3.1 CONSIDÉRATION NORMATIVE SUR LE SÉISME

La normalisation des phénomènes sismiques est l'une des préoccupations majeures dans biens des pays. Les plus rependues dans les pays d'Afrique sont les règles françaises (PS92), la norme Européenne (Eurocode 8), les normes américaines (UBC97, fema 356, ATC40, etc.) et les normes algériennes RPA99 modifié en 2003. Dans la considération sismique, la détermination du comportement global de la structure en tenant compte de la distribution des actions induites par le séisme au sein des éléments de la structure s'effectue par un calcul linéaire ou des calculs de dimensionnement en capacité. L'une de ces approches consiste à effectuer le calcul temporel non linéaire à partir d'un accélogramme et en utilisant une loi de comportement adéquate pour le matériau considéré. Cette technique pouvant être utilisée pour analyser les structures de plus grandes ampleur (ouvrage d'art), il est aussi préférable d'utiliser les coefficients réducteurs d'efforts puisque ceux-ci sont étroitement liés à la demande de ductilité globale. Cette prise en compte de la ductilité lors de l'analyse globale peut se simplifier par l'application du coefficient de comportement.

3.3.1.1 NORME EURO CODE 8

La prénorme française expérimentale, dénommée EC8-DAN 1 -1 reproduit intégralement l'ENV 1998-1 -1 que le Comité Européen de Normalisation (CEN) a recommandé en tant que prénorme européenne. Cette norme détaille toutes autres adaptations nationales au titre de Document d'Application National (en abrégé DAN). C'est pourquoi la publication de cette prénorme européenne n'induit pas le retrait des normes nationales. Les objectifs de l'EC8-DAN sont entre autres:

- De produire à la demande du Comité Européenne de Normalisation, la version française de l'EC 8 et de spécifier les adaptations nationales apportées à l'EC 8 et qui définissent les conditions techniques d'application de la norme pendant la phase d'expérimentation (ajustements éventuels des valeurs encadrées, normes et autres documents nationaux de référence) et aussi cette norme les dispositions, préfigurent les améliorations techniques qu'AFNOR proposera d'introduire quand il sera question de convertir la prénorme européenne (ENV) en Norme européenne (EN) de plein droit.
- De définir les conditions d'application de l'EC 8 à remplir pour satisfaire les exigences de la réglementation nationale sur la prévention du risque sismique.
- De mettre à la disposition des maîtres d'ouvrages, publics ou privés, le document normatif sur les considérations relatives au séisme qui soit contextualisa blé sur la coordination des procédures de marchés publics de travaux et relative au rapprochement des dispositions législatives, réglementaires et administratives des États membres de la communauté européenne concernant les produits de construction.

3.3.1.2 NORME RPA 99 MODIFIÉ 2003

Le document technique « DTR BC 2-48 » portant sur les « Règles Parasismiques Algériennes RPA 99 » qui a été approuvé par la commission technique permanente pour le contrôle technique de la construction (CTP) lors de sa réunion du 4 Décembre 1999 se situe dans la continuité des documents précédents « RPA 81, version 1983 » et « RPA 88 » dont il garde la philosophie originelle. Il constitue en fait une actualisation qui s'avère nécessaire après près de deux décennies de pratique riche et diversifiée de la part des scientifiques et techniciens nationaux des bureaux d'études et de contrôle, des entreprises et des institutions de formation supérieure. Cette actualisation tient compte également des leçons tirées des récents séismes survenus en Algérie ainsi que d'autres coins à l'extérieur de l'Algérie. Cette actualisation a en outre bénéficié des grands progrès de la recherche dans ce domaine aussi bien au niveau national qu'international.

Les points qui ont été retenus pour révision se présentent comme suit:

- Préciser les objectifs et les niveaux de protection parasismique recherchés pour les différentes catégories de constructions qui relèvent du domaine d'application du RPA.
- Décrire les principes de conception parasismique à respecter, préalablement à tout calcul (choix de site, implantation…).
- Revoir les différentes classifications (zonage sismique, sites et sols, catégories d'ouvrages).
- Préciser les critères de choix de la méthode de calcul des forces sismiques (méthode statique équivalente, méthode d'analyse modale spectrale).
- Décrire la méthode statique équivalente avec les modifications apportées sur les différents paramètres.
- Décrire la méthode dynamique modale spectrale.
- Décrire les critères de sécurité à justifier pour que la structure soit réputée parasismique (système de contreventement, éléments secondaires et éléments non structuraux).
- Revoir les dispositions constructives relatives aux constructions en béton armé, en acier et en maçonnerie porteuse chaînée.

3.3.1.3 CONSIDÉRATION SUR LES CHARGES SISMIQUES

La normalisation considère les actions sismiques comme des charges accidentelles. Ainsi elles sont considérées avec des valeurs nominales pondérées dans les calculs par le coefficient égal à 1. Cependant, la tenue en compte des actions sismique dans la construction d'un ouvrage attend que celui-ci ne puisse présenter des probabilités considérables d'effondrement ou des désordres structuraux majeurs. Tous désordres dus à ces actions doivent rester contenus dans les limites acceptables. Alors, dans la considération des actions de calculs sismique, il est pris en compte:

- Les actions d'ensemble qui sont exercées sur la structure, en considérant la structure dans son ensemble;
- Les actions locales s'exerçant sur les éléments de la structure, des éléments non structuraux ou des équipements.
- Ces actions seront donc à considérer indépendamment les unes des autres car elles interviennent dans les calculs de vérifications sous forme des combinaisons de calcul. Vue que ces actions sont de nature dynamique, dans la suite des calculs du mouvement sismique, l'action s'exerçant sur l'ouvrage est considéré composé de:
- Des forces d'origine dynamique induites dans la structure par le mouvement de translation d'ensemble du sol du fait de l'inertie des masses qui composent la structure ou qui qui lui sont lié ou aussi qui s'appuient sur cette dernière.
- Des déplacements directement imposés à l'ouvrage ou à sa base (fondation) par les mouvements différentiels. Ces mouvements étant considérés appliquées dans la suite des calculs dans un état statique structure.
- Des forces développées par des oscillations de torsion de l'axe vertical causé par les mouvements différentiels horizontaux le long de la hauteur du bâtiment;
- Des surpressions dynamiques exercées sur l'ouvrage à la base par les terres, de l'eau éventuellement retenues par ce dernier.

3.3.1.4 PARAMÈTRES DE CALCULS SISMIQUES

Chaque élément de structure a des paramètres à vérifier pour répondre à la sollicitation sismique selon la destination de l'ouvrage. Ainsi pour le calcul d'un ouvrage en zone estimé sujet aux séismes, les paramètres ci-dessous constituent la base de calcul pour les actions sismiques:

- **La zone de sismicité:** La zone de sismicité donne référence aux caractéristiques associées au séisme dans un milieu donné. Ce paramètre fait donc référence aux caractéristiques des séismes fréquents dans un milieu (sismicité très faible, faible, modérée, moyenne ou forte). La donnée recherchée dans ce paramètre est l'intensité de l'accélération du mouvement due au séisme. L'accélération de calcul au niveau du sol pour chaque zone sismique, correspond à une période de retour de référence de 475ans.
- **La catégorie d'ouvrage**: Le type d'ouvrage est tenu en compte dans ces calculs aux vues que les ouvrages ont différente destination. Ce qui leur confère diffèrent niveau d'importance, accentuant ainsi la rigueur sur la considération de la charge sismique.
- **La classe de sol**: Permet de classifier un sol dans un rapport avec son comportement par lequel il transmet des ondes sismiques.

De par la nature du sol et les valeurs des spectres de réponse élastique, ces deux éléments interviennent dans l'évaluation des composantes horizontales du mouvement sismique. L'influence des conditions du site de sol sur l'action sismique doit être

prise en compte dans les calculs, généralement en considérant les quatre classes de sol de fondation S_1, S_2, S_3 et S_4, tel que prévue par la norme algérienne RPA. Ces classes sont décrites par les profils stratigraphiques suivants:

- **Catégorie S_1** (site rocheux): Roche ou autre formation géologique caractérisée par une vitesse moyenne d'onde de cisaillement (V_S) à 800m/s.
- **Catégorie S_2** (site ferme): Dépôts de sables et de graviers très denses et/ou d'argile sur consolidée sur 10 à 20 m d'épaisseur avec VS 400 m/s à partir de 10 m de profondeur.
- **Catégorie S_3** (site meuble**):** Dépôts épais de sables et graviers moyennement denses ou d'argile moyennement raide avec V_S 200 m/s à partir de 10 m de profondeur.
- **Catégorie S_4 (**site très meuble)

- Dépôts de sables lâches avec ou sans présence de couches d'argile molle avec V_S < 200 m/s dans les 20 premiers mètres.
- Dépôts d'argile molle à moyennement raide avec VS < 200 m/s dans les 20 premiers mètres.

- **Le coefficient de comportement:** Le coefficient de comportement q est une approximation du rapport entre les forces sismiques que la structure subirait si sa réponse était complètement élastique avec un amortissement visqueux de 5 %, et les forces sismiques minimales qui peuvent être utilisées lors de la conception et du dimensionnement, avec un modèle linéaire conventionnel, en assurant encore une réponse satisfaisante de la structure. Les valeurs du coefficient de comportement q, incluant également l'influence d'amortissements visqueux différents de 5 %, sont indiquées, pour divers matériaux et systèmes structuraux, selon divers niveaux de ductilité, dans les parties concernées de l'ENV 1998. Il met un lien entre le spectre élastique en intégrant l'influence de certains aspects sur la réponse des structures, plus particulièrement la capacité de dissipation d'énergie de la structure en déformations plastiques.
- **L'amplification spectrale:** Dans le domaine d'application de l'ENV 1998, le mouvement dû au séisme à un certain point de la surface du sol, est représenté en général par un spectre de réponse élastique en accélération, dénommé par la suite « spectre de réponse élastique ». L'action sismique horizontale est décrite par deux composantes orthogonales considérées comme indépendantes et représentées par le même spectre de réponse.
- **Le coefficient d'amplification topographique:** Il est pris en compte pour les ouvrages situés en rebord de crête.

Pour atteindre notre objectif, nous avons considéré la structure d'un bâtiment de 10 étages que nous avons analysé en suivant les étapes énumérées contenues dans les travaux de Moundom et *al*. 2026.

3.3.2 MODÉLISATION DE LA STRUCTURE

Rappelons que le nombre de degrés de liberté d'un système est le nombre de composantes du déplacement requises pour exprimer les forces d'inertie se développant dans celui-ci. Ces déplacements sont évalués en un nombre des points de la structure, appelés nœuds où sont concentrées les masses. Dans le cas le plus général, un nœud possède six mouvements possibles (3 translations et 3 rotations) et le nombre de degrés de liberté du système est égal à N=6p où p est nombre de nœuds.

Dans le cas des bâtiments multiétages, les planchers peuvent être considérés comme infiniment rigide (diaphragme), la cinématique d'un niveau de plancher est décrite par le mouvement d'un de ses points; on aboutit au modèle « brochette », dans lequel la masse d'un niveau est concentrée en un point (centre de gravité du plancher) (EC8 art 3.3.1.3) et la raideur en flexion-cisaillement d'un étage est égale à la somme des raideurs des poteaux de ce dernier. Le nombre de degrés de liberté a été réduit en l'occurrence à 2p=6. On utilisera un modèle pour chaque direction principale (X et Y) (Norme RPA 99 modifié 2003; Moundom et *al., 2026).*

3.3.3 ANALYSE STATIQUE

L'analyse statique est présentée dans les travaux de Moundom et *al*. 2026.

3.3.4 CALCUL DE LA RIGIDITÉ DES ETAGES

La rigidité des étages est présentée dans les travaux de Moundom et *al*. 2026.

3.3.5 CALCUL DES MASSES SISMIQUES DES NIVEAUX

Les travaux de Moundom et *al*. 2026 présentent la méthodologie d'évaluation des masses sismiques de chaque niveau.

3.3.6 CALCUL DES CARACTÉRISTIQUES DYNAMIQUES DE LA STRUCTURE

Les travaux de Moundom et *al*. 2026 présentent la méthodologie de caractérisation de la structure qui passe par la cconstruction de la matrice de rigidité de la structure $[K]$, la détermination de la matrice de masse $[M]$ et la matrice modale $[D]$ et périodes propres $Ti.$

3.3.7 DÉTERMINATION DES MASSES ET DES FACTEURS DE PARTICIPATION MODALES

Les travaux de Moundom et *al*. 2026 présentent la méthodologie de détermination des masses et des facteurs de participation modales.

3.3.8 DÉTERMINATION DU SPECTRE DE RÉPONSE DU SITE D'IMPLANTATION DE L'OUVRAGE

Les travaux de Moundom et *al*. 2026 présentent la méthodologie de détermination du spectre de réponse comportant les **spectres élastiques (NFEN1998-1 Article 3.2.2.2) et le spectre de réponse de calcul (NFEN1998-1 Article 3.2.2.5).**

3.3.9 DÉFINITION DU NOMBRE DE MODES REPRÉSENTATIFS A PRENDRE EN COMPTE DANS L'ANALYSE

Les travaux de Moundom et *al*. 2026 ont présenté le nombre de modes représentatifs à prendre en compte dans l'analyse.

3.3.10 RECHERCHE DE LA RÉPONSE MAXIMALE MODE PAR MODE

Les travaux de Moundom et *al*. 2026 présentent la méthodologie de recherche de la réponse maximale mode par mode**.**

3.3.11 CUMUL DES MODES SELON LA COMBINAISON ADÉQUATE ET DÉDUCTION DES EFFORTS ET DÉPLACEMENTS DANS LA STRUCTURE

Les travaux de Moundom et *al*. 2026 présentent la méthodologie de détermination du cumul des modes selon la combinaison adéquate et déduction des efforts et déplacements dans la structure**.**

3.4 FONCTIONS DE RÉGRESSION

3.4.1 INTRODUCTION

Les fonctions de régression permettant d'établir les relations entre les indicateurs, c'est une étape essentielle pour évaluer la cohérence des modèles et des méthodes de calcul. Ces relations sont établies à travers l'utilisation de fonctions de régression appliquées aux séries statistiques doubles (Draper & Smith, 1998). L'objectif est de mettre en évidence les correspondances entre: Les déplacements et efforts tranchants des masses de niveaux d'une même structure construite sur des sols de classes différentes (A et C); Les résultats obtenus par la méthode simplifiée (méthode des brochettes) et ceux issus du calcul automatique par logiciel (Montgomery et *al.,* 2012); Les relations entre les déplacements et les efforts tranchants associés.

3.4.2 DONNÉES STATISTIQUES

Les données seront constituées des déplacements horizontaux ainsi que des efforts tranchants enregistrés pour différents niveaux de la structure étudiée. Trois comparaisons principales seront effectuées: Déplacements et efforts tranchants sur sol de classe A vs sol de classe C; Déplacements et efforts tranchants sur sol de classe A: Comparaison entre méthode des brochettes et Robot Structural Analysis; Déplacements et efforts tranchants sur sol de classe C: comparaison entre méthode des brochettes et Robot Structural Analysis.

Ces données permettent d'exploiter des modèles statistiques de régression adaptés pour analyser la corrélation entre les résultats (INS, 2015).

3.4.3 OUTILS STATISTIQUES

3.4.3.1 NUAGE DE POINTS ET POINT MOYEN

On considère deux variables statistiques x et y observées sur la même population de n individus. Les couples (x_i, y_i), i = 1, 2, …, n, définissent une série statistique à deux variables (Montgomery et al., 2012).

- Le nuage de points est l'ensemble des points M_i (x_i, y_i).
- Le point moyen G a pour coordonnées: $\bar{x} = (1/n)\ \Sigma x_i$, $\bar{y} = (1/n)\ \Sigma y_i$

3.4.3.2 AJUSTEMENT AFFINE (RÉGRESSION LINÉAIRE)

Lorsque les points d'un nuage sont sensiblement alignés, on peut approcher leur tendance par une droite dite droite de régression (Draper & Smith, 1998) (équation 1):

$$y = Ax + B \quad (1)$$

- ***Calcul manuel des coefficients*** (équations 2 et 3):

$$A = (\Sigma(x - \bar{x})(y - (y))^{-})/(\Sigma(x - \bar{x})^2) \quad (2)$$

$$B = \bar{y} - A\bar{x} \quad (3)$$

- ***Calcul automatique (par calculatrice):***

- **TI 83:** STAT → Edit → L1, L2 → STAT → CALC → LinReg (ax+b)
- **CASIO:** Menu STAT → entrer valeurs (List1, List2) → CALC → REG → Ax+b
- **SHARP:** Mode STAT → LINE → entrer données x_i, y_i → RCL a, RCL b

- ***Validité de l'ajustement:***

Le coefficient de corrélation r (x, y) permet d'évaluer la force de la relation 4:

$$r(x, y) = (cov(x, y))/\sqrt{(var(x) * var(y))} \quad (4)$$

C'est un nombre compris entre -1 et 1 qui mesure la relation entre les deux variables x et y.

Plus le coefficient de corrélation est proche des valeurs extrêmes -1 et 1, plus la corrélation linéaire entre les variables est forte.

- Si r (x, y) >0, les valeurs prises de y ont tendances à croitre quand les valeurs de x augmentent
- Si r (x, y) <0, les valeurs prises par y ont tendances à décroitre quand les valeurs de x augmentent
- Si r (x, y) =0, absence totale de corrélation: les variations des variables x et y sont indépendantes.

- ***Ajustement quadratique (régression polynomiale du second degré):***

- On cherche une fonction polynomiale du second degré (équation 5):

$$y = Ax^2 + Bx + C \quad (5)$$

Calcul manuel des coefficients (équation 6):

$$\Sigma y = A\Sigma x\text{^}2 + \Sigma Bx + n.C$$

$$\Sigma xy = A\Sigma x\text{^}3 + B\Sigma x\text{^}2 + C\Sigma x \quad (6)$$

$\Sigma x^2 y = A\Sigma x\text{^}4 + B\Sigma x\text{^}3 + C\Sigma x^2$

Forme matricielle de la régression quadratique (équation 7):

$$[■(\Sigma x^2 \& \Sigma x \& n @ \Sigma x\text{^}3 \& \Sigma x\text{^}2 \& \Sigma x @ x\text{^}4 \& \Sigma x\text{^}3 \& \Sigma x^2)][■(A@B@C)] = [■(\Sigma y @ \Sigma xy @ \Sigma yx^2)] \quad (7)$$

Calcul automatique (par calculatrice):

- **TI 83**: STAT → CALC → QuadReg
- **GRAPH 100:** Menu REGQuad
- **SHARP:** Mode STAT → QUAD → entrer données → coefficients a, b, c

4 RESULTATS ET DISCUSSION

4.1 RÉSULTATS DE L'ANALYSE STATIQUE

L'analyse statique a été effectuée par le logiciel Robot structural Analysis

4.1.1 DIMENSIONNEMENT DU POTEAU

La charge Nu = 2683,82 kN obtenue après descente de charge dans le logiciel ROBOT nous ont permis d'obtenir la section du Poteau qui est de 30cm x 50cm.

Les résultats présentés dans le tableau 1 reprennent les notes de calcul de la semelle sous le Poteau le plus chargé. Les données de base sont les suivantes:

Tableau 1. Résultat dimensionnement poteau

Section en cm²	N_u *en KN*	α	B_r en m²	$A_{th} = \left(\frac{Nu}{\alpha} - \frac{Br.f_{c28}}{0,9.\gamma_b}\right)\frac{\gamma_s}{fe}$ en cm²	A_s *réelle* en cm²
30X50	2683,82	0.59	0.1344		49.09
Choix d'armatures	10 HA 25				

a) Données de base

- Classe armatures: HA 500
- Enrobage: 3.0 (cm)
- Classe: Béton 25 ⇒$fc28$ = 25 MPa
- Calculs suivants: BAEL 91 modifié 99
- hauteur sous dalle: 3.18m
- Fissuration: peu préjudiciable

b) Ferraillage

- Armatures Principales: 10HA25
- Armatures Transversales: HA8

4.1.2 DIMENSIONNEMENT DES SEMELLES

➢ **Données de base**

- Norme pour les calculs en béton armé: BAEL 91 modifié 99
- Norme pour les calculs géotechniques: DTU 13.12
- Type: semelle isolée

- Contrainte du sol pour un sol rocheux (Goma): 1,5 MPa
- Contrainte du sol pour un sol Argileux (Bukavu): 0,6 MPa

➢ **Caractéristique des matériaux**

- Résistance caractéristique du béton; $fc28$ = 25,00 MPa
- Nuances: HA 500

Les résultats présentés dans le tableau 2 reprennent les notes de calcul de la semelle sous le poteau le plus chargé dans la ville de **Goma**.

Tableau 2. Résultat de dimensionnement des semelles (Goma -sol du type A)

Semelle isolée sous poteau (sol de classe A)		
	Sens des X	**Sens des Y**
Surface AXB cm²	200X200	
$\mathbf{N_u}$ En kN	2698.72	
$\mathbf{N_{ser}}$ En kN	1938.04	
$\boldsymbol{\sigma_{adm\ du\ sol}}$ **en MPa**	1,5	
h en cm	60	
$\mathbf{A_a = \frac{P_u\,(A-a)}{8\,d\,\sigma_s} * 1,1 = A_b \quad en\ cm^2}$	13,04	$\mathbf{13,43}$
Hauteur des patins en cm	25	25
Choix d'armatures	17HA 14	14HA 16

Source: Moundom et al., 2026

Les résultats présentés dans le tableau 3 reprennent les notes de calcul de la semelle sous le Poteau le plus chargé dans la ville de Bukavu.

Tableau 3. Résultat de dimensionnement des semelles (Bukavu-sol du type C)

Semelle isolée sous poteau (sol de classe C)		
	Sens des X	**Sens des Y**
Surface AXB cm²	340X340	
$\mathbf{N_u}$ En kN	2698.72	
$\mathbf{N_{ser}}$ En kN	1938.04	
$\boldsymbol{\sigma_{adm\ du\ sol}}$ **en MPa**	**0,6**	
h en cm	75	
$\mathbf{A_a = \frac{P_u\,(A-a)}{8\,d\,\sigma_s} * 1,1 = A_b \quad en\ cm^2}$	10,88	$\mathbf{11,13}$
Hauteur des patins en cm	25	25
Choix d'armatures	25HA 14	25HA 14

Source: Moundom et al., 2026

4.1.3 DIMENSIONNEMENT DE LA POUTRE

Les hypothèses de calculs de dimensionnement qui vont nous permettre de dimensionner la poutre sont les suivantes:

a) Données de base

- Calcul suivant: BAEL 91 modifié 99
- Enrobage des aciers inférieurs et supérieurs: c=3,0cm

- Fissuration: peu préjudiciable
- Tenue au feu: forfaitaire.

Les résultats présentés dans le tableau 4 reprennent les notes de calcul des poutres.

Tableau 4. Résultat dimensionnement des poutres

Poutre continue					
	Appuis A et E	**Travée AB et DE**	**Appuis B et D**	**Travée BC et CD**	**Appuis C**
Calcul des armatures longitudinales					
b en m	0,25				
h en m	0,50				
$As\ réelle$ en cm²	$2HA12$	2,26	2,26	2,26	2,26
Choix d'armatures	$2HA12$	$2HA12$	$2HA12$	$2HA12$	$2HA12$
Calcul des armatures transversales					
Choix d'armatures	2HA6				

Source: Moundom et al., 2026

4.2 RÉSULTAT DE L'ANALYSE DYNAMIQUE

Nous présentons les résultats pour la direction de calcul OX

4.2.1 SOL DE CLASSE A: VILLE DE GOMA

Pour les deux modes de vibration retenue, nous utiliserons la troisième partie du spectre de réponse car leurs périodes sont comprises entre $T_(C\ )$et T_D. Les résultats pour le premier mode de vibration sont présentés dans le tableau 5.

Tableau 5. Résultats de calcul pour le premier mode de vibration

Mode 1 :$S_d(T) = 0,597\ m/s^2$			
	F_{max}(kN)	d_{max}(cm)	Effort tranchant (kN)
Rdc	22,497	0,8227	1108,633 1086,136
Etage 1	43,825	1,6287	1086,136
Etage 2	68,681	2,5957	1042,311
Etage 3	92,579	3,4988	973,63
Etage 4	114,205	4,3162	881,051
Etage 5	130,792	5,0275	766,846
Etage 6	148,692	5,8142	636,054
Etage 7	164,108	6,4170	487,362
Etage 8	174,333	6,8169	323,254
Etage 9	148,921	7,0011	148,921

Source: Moundom et al., 2026

Les résultats pour le deuxième mode de vibration sont présentés dans le tableau 6.

Tableau 6. Résultats de calcul pour le deuxième mode de vibration

Mode 2 :$S_d(T) = 1,649\ m/s^2$			
	F_{max}(kN)	d_{max}(cm)	Effort tranchant(kN)
Rdc	62,848	0,300	404,247
Etage 1	114,068	0,553	341,399
Etage 2	154,922	0,765	227,331
Etage 3	168,539	0,832	72,409
Etage 4	150,462	0,743	-96,13
Etage 5	102,342	0,514	-246,592
Etage 6	16,047	0,081	-348,934
Etage 7	-72,399	-0,369	-364,981
Etage 8	-143,301	-0,732	-292,582
Etage 9	-149,281	-0,917	-149,281

Source: Moundom et al., 2026

Les résultats pour la combinaison des réponses modales sont présentés dans le tableau 7.

Tableau 7. Combinaison des réponses modales

Combinaison SRSS		
	$dmax$(cm)	Effort tranchant (kN)
Rdc	**0,87569132** **1,72002113**	**1180,035**
Etage 1	1,72002113	1138,527
Etage 2	2,70608268	1066,813
Etage 3	3,59636281	976,318
Etage 4	4,3796839	886,279
Etage 5	5,0537067	805,518
Etage 6	5,81476419	725,478
Etage 7	6,42760064	608,878
Etage 8	6,85608851	436,001
Etage 9	7,06089868	210,860

Source: Moundom et al., 2026

4.2.2 SOL DE CLASSE C: VILLE DE BUKAVU

Pour le premier mode de vibration nous utilisons la troisième partie du spectre de réponse ($T_C \leq T \leq T_D$) et pour le deuxième mode nous utilisons la deuxième partie ($T_B \leq T \leq T_C$). Les résultats pour le premier mode de vibration sont présentés dans le tableau 8.

Tableau 8. Résultats de calcul pour le premier mode de vibration

Mode 1 :$S_d(T) = 1,029\ m/s^2$			
	F_{max}(kN)	d_{max}(cm)	Effort tranchant (kN)
Rdc	38,777	1,418	1910,86639
Etage 1	75,538	2,807	1872,08896
Etage 2	118,381	4,474	1796,55066
Etage 3	159,572	6,031	1678,17011
Etage 4	196,847	7,439	1518,59814
Etage 5	225,436	8,666	1321,75152
Etage 6	256,289	10,022	1096,31587
Etage 7	282,86	11,061	840,02712
Etage 8	300,484	11,75	557,167264
Etage 9	256,684	12,067	256,683513

Source: Moundom et al., 2026

Les résultats pour le deuxième mode de vibration sont présentés dans le tableau 9.

Tableau 9. Résultats pour le deuxième mode de vibration

Mode 2 :$S_d(T) = 2,3\ \ m/s^2$			
	F_{max}(kN)	d_{max}(cm)	Effort tranchant(kN)
Rdc	87,66	0,419	563,842
Etage1	159,101	0,773	476,182
Etage2	216,084	1,067	317,08
Etage3	235,076	1,161	100,996
Etage4	209,863	1,036	-134,08
Etage5	142,745	0,717	-343,943
Etage6	22,383	0,114	-486,688
Etage7	-100,981	-0,516	-509,072
Etage8	-199,874	-1,021	-408,09
Etage9	-208,216	-1,279	-208,216

Source: Moundom et al., 2026

4.3 VALIDATION DES RÉSULTATS PAR MODÉLISATION 3D SUR LE LOGICIEL RSAP

Les résultats trouvés par modélisation en brochette sont comparés à ceux obtenus sur un modèle 3D par calcul éléments finis. Les écarts sont considérés positifs lorsque les valeurs trouvées par le logiciel sont inférieures à celles calculées sur un modèle en brochette du bâtiment.

4.3.1 SOL DE CLASSE A: VILLE DE GOMA

Le tableau 10 présente une étude des écarts entre les déplacements et des efforts tranchants au niveau des nœuds dans la ville de Goma.

Tableau 10. Écarts entre les déplacements et des efforts tranchants au niveau des nœuds dans la ville de Goma.

Combinaison SRSS				
	$dmax$(cm)	Ecart en %	Effort tranchant (kN)	Ecart en %
Rdc	0,4	+54,321	642,63	+45,541
Etage 1	1,0	+41,861	593,51	+47,870
Etage 2	1,6	+40,873	554,55	+48,018
Etage 3	2,2	+38,827	514,62	+47,289
Etage 4	2,7	+38,351	474,07	+46,510
Etage 5	3,2	+36,680	422,37	+47,565
Etage 6	3,6	+38,088	372,74	+48,621
Etage 7	4,0	+37,768	310,90	+48,938
Etage 8	4,2	+38,740	244,80	+43,853
Etage 9	4,4	+37,684	141,56	+32,865

Source: Moundom et al., 2026

4.3.2 SOL DE CLASSE C: VILLE DE BUKAVU

Le tableau 11 présente une étude des écarts entre les déplacements et des efforts tranchants au niveau des nœuds dans la ville de Bukavu.

Tableau 11. Écarts entre les déplacements et des efforts tranchants au niveau des nœuds dans la ville de Bukavu

Combinaison SRSS				
	$dmax$(cm)	Ecart en %	Effort tranchant (kN)	Ecart en %
Rdc	1,1	+22,425	1617,03	+18,836
Etage 1	2,6	+7,374	1539,51	+20,302
Etage 2	4,2	+6,124	1428,75	+21,683
Etage 3	5,7	+5,488	1316,56	+21,689
Etage 4	7,0	+5,901	1208,56	+20,724
Etage 5	8,2	+5,377	1094,47	+19,864
Etage 6	9,4	+6,206	979,06	+18,376
Etage 7	10,3	+6,880	834,65	+15,026
Etage 8	11,0	+6,382	638,99	+7,477
Etage 9	11,5	+4,698	341,56	-3,341

Source: Moundom et al., 2026

Les résultats trouvés par l'analyse modale spectrale sur un modèle en brochette du bâtiment sont donc assez conservateurs pour être utilisés en pratique.

4.4 FONCTIONS DE RÉGRESSION

Ces fonctions ont permis d'établir les relations entre les indicateurs, elles ont été essentielles pour évaluer la cohérence des modèles et des méthodes de calcul. Ici nous avons utilisé des fonctions de régression appliquées aux séries statistiques doubles.

L'objectif est de mettre en évidence les correspondances entre:

- Les déplacements et efforts tranchants des masses de niveaux d'une même structure construite sur des sols de classes différentes (A et C).
- Les résultats obtenus par la méthode simplifiée (méthode des brochettes) et ceux issus du calcul automatique par logiciel.

- Les relations entre les déplacements et les efforts tranchants associés.

4.4.1 DONNÉES STATISTIQUES

Ici les données sont des déplacements horizontaux ainsi que des efforts tranchants enregistrés pour différents niveaux de la structure étudiée. Trois comparaisons principales ont effectué:

- Déplacements et efforts tranchants sur sol de classe A vs sol de classe C.
- Déplacements et efforts tranchants sur sol de classe A: comparaison entre méthode des brochettes et Robot Structural Analysis.
- Déplacements et efforts tranchants sur sol de classe C: comparaison entre méthode des brochettes et Robot Structural Analysis.

4.4.2 RELATION ENTRE LES DÉPLACEMENTS LATÉRAUX DES NIVEAUX DU BÂTIMENT SITUÉ SUR LES SOLS DE TYPE A ET C

Le tableau 12 présente la relation entre les déplacements latéraux des niveaux du bâtiment situé sur les sols de type A et C par la méthode automatique.

Tableau 12. Relation entre les déplacements latéraux des niveaux du bâtiment situé sur les sols de type A et C par la méthode automatique

N°	$dmax\ (cm)$		y =2,594x + 0,018	y =0,023x^2 + 2,482x+ 0,116
	Sol de type A (x)	Sol de type C (y)		
1	0,4	1,1	1,056	1,112
2	1,0	2,6	2,612	2,621
3	1,6	4,2	4,169	4,145
4	2,2	5,7	5,725	5,686
5	2,7	7,0	7,022	6,982
6	3,2	8,2	8,319	8,290
7	3,6	9,4	9,357	9,344
8	4,0	10,3	10,394	10,406
9	4,2	11,0	10,913	10,939
10	4,4	11,5	11,432	11,474

R = 0,9998

Les nuages des points issus de la méthode automatique, la régression linéaire et régression polynômiale sont représentés respectivement sur les figures 1, 2 et 3.

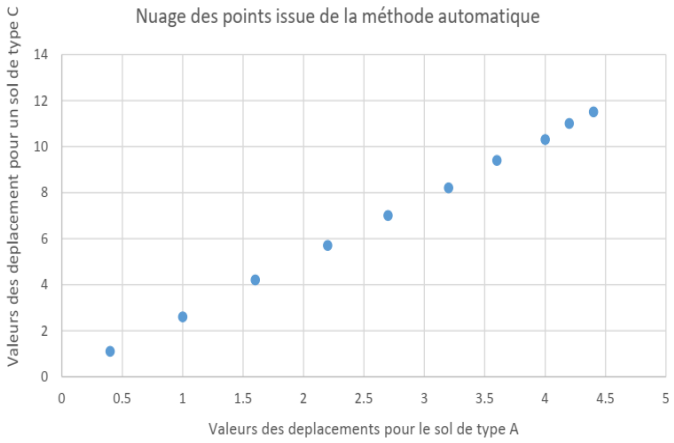


Fig. 1. Nuage des points issu de la méthode automatique en utilisant la régression linéaire : y = 2,594x + 0,018 ; R = 0,9998

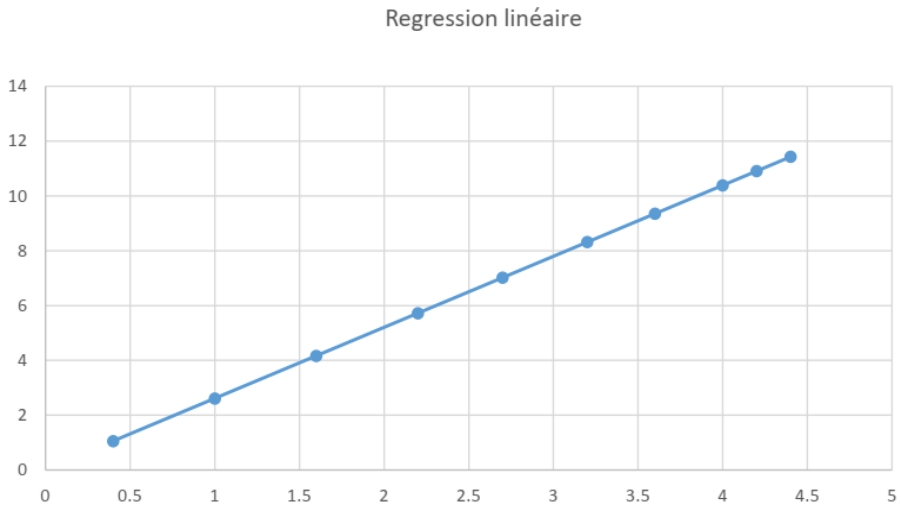


Fig. 2. Régression linéaire de degré 1 : $y = 2{,}594x + 0{,}018$; $R^2 = 0{,}9998$

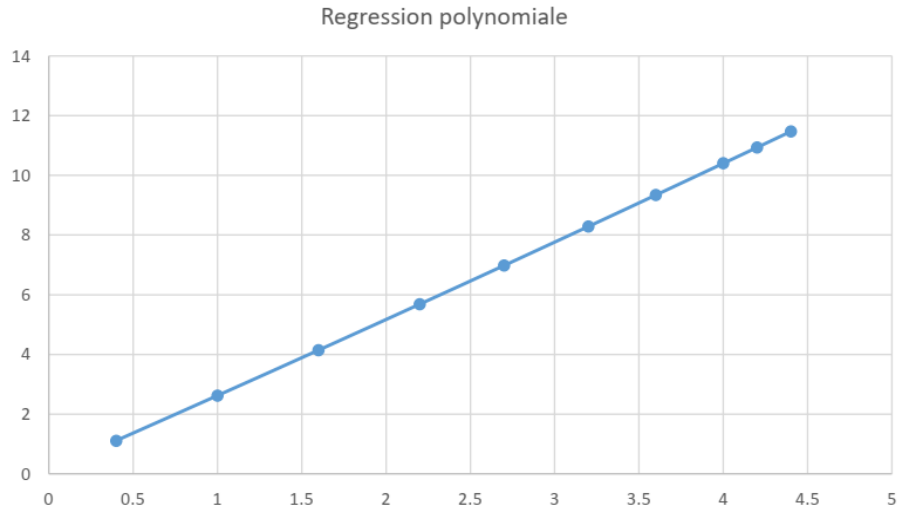


Fig. 3. Régression polynomiale de degré 2 : $y = 0{,}023x^2 + 2{,}482x + 0{,}116$

4.4.2.1 MÉTHODE SIMPLIFIÉE EN BROCHETTE

Le tableau 13 présente la relation entre les déplacements latéraux des niveaux du bâtiment situé sur les sols de type A et C par la méthode simplifiée en brochette.

Tableau 13. Relation entre les déplacements latéraux des niveaux du bâtiment situé sur les sols de type A et C par la méthode simplifiée en brochette

N°	$dmax\ (cm)$		y = 1,729x2 - 0,0587	y = 0,001x^2 + 1,721x- 0,046
	Sol de type (x)	Sol de type (y)		
1.	0,8757	1,478	1,456	1,462
2.	1,72200	2,911	2,916	2,917
3.	2,7060	4,599	4,621	4,619
4.	3,5964	6,141	6,161	6,157
5.	4,3767	7,510	7,510	7,506
6.	5,0571	8,695	8,687	8,684
7.	5,8148	10,022	9,998	9,996
8.	6,4276	11,073	11,057	11,058
9.	6,8561	11,794	11,798	11,801
10.	7,0609	12,134	12,153	12,157

Les nuages des points issus de la méthode simplifiée, la régression linéaire et régression polynômiale sont représentés respectivement sur les figures 4, 5 et 6.

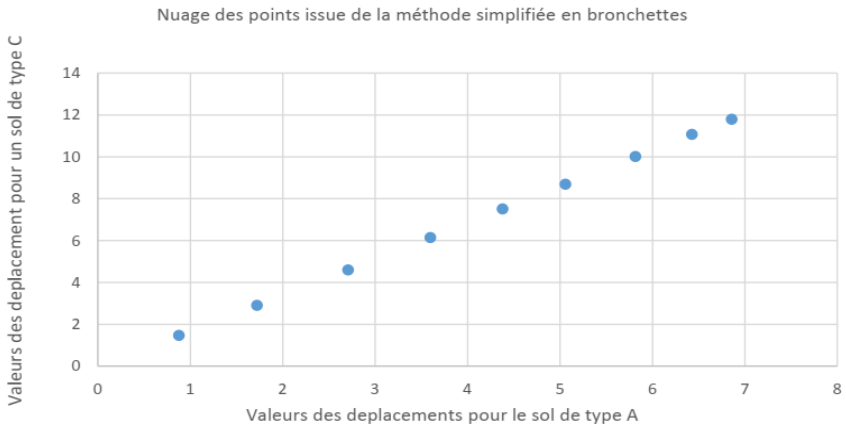


Fig. 4. Nuage des points issu de la méthode simplifiée en utilisant la régression linéaire : y = 1,729x - 0,0587

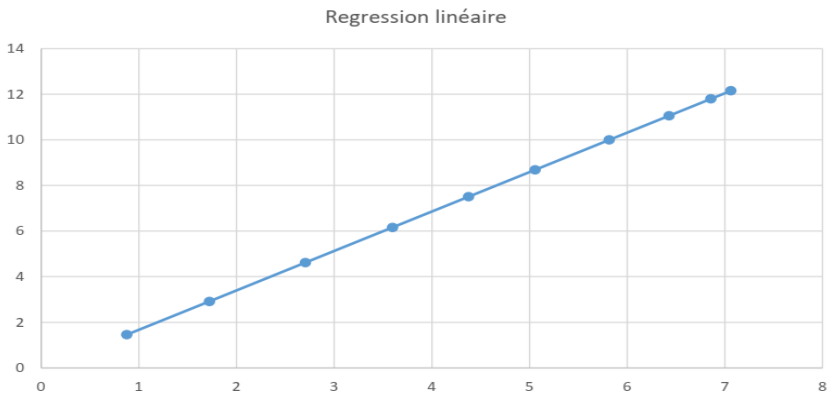


Fig. 5. Régression linéaire de degré 1 : y = 1,729x - 0,0587

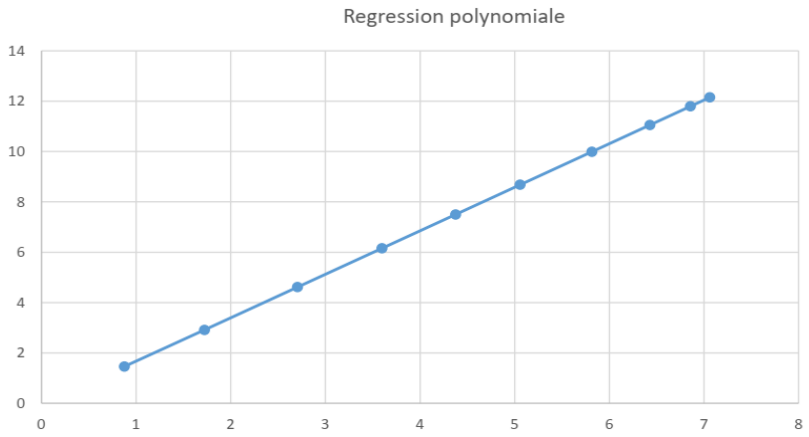


Fig. 6. Régression polynômiale de degré 2 : $y = 0{,}001x^2 + 1{,}721x - 0{,}046$

4.4.3 RELATION ENTRE LES EFFORTS TRANCHANTS DE NIVEAUX DU BÂTIMENT SITUÉ SUR LES SOLS DE TYPE A ET C

Le tableau 14 présente la relation entre les efforts tranchants de niveaux du bâtiment situé sur les sols de type A et C par la méthode automatique.

Tableau 14. Relation entre les efforts tranchants de niveaux du bâtiment situé sur les sols de type A et C par la méthode automatique.

	Efforts tranchants en kN		$y = 2{,}542x + 13{,}867$	$y = -0{,}0006x^2 + 3{,}019x - 66{,}59$
	Sol de type A(x)	Sol de C type (y)		
1.	642,63	1617,03	1647,686	1626,103
2.	593,51	1539,51	1522,803	1514,208
3.	554,55	1428,78	1423,752	1423,399
4.	514,62	1316,56	1322,234	1328,439
5.	474,07	1208,56	1220,538	1230,048
6.	422,37	1094,47	1087,698	1101,741
7.	372,74	979,06	961,519	975,554
8.	310,90	834,65	804,297	814,188
9.	244,80	638,99	636,245	636,6333
10.	141,56	341,56	373,768	348,828

R = 0,999

Les nuages des points issus de la méthode automatique, la régression linéaire et régression polynômiale sont représentés respectivement sur les figures 7, 8 et 9.

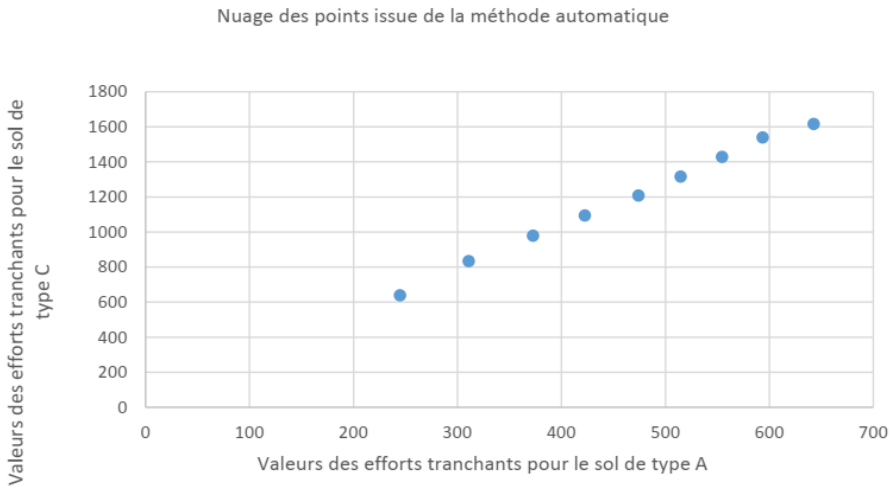


Fig. 7. Nuage des points issu de la méthode automatique en utilisant la régression linéaire : $y = 2{,}542x + 13{,}867$ avec $R^2 = 0{,}999$

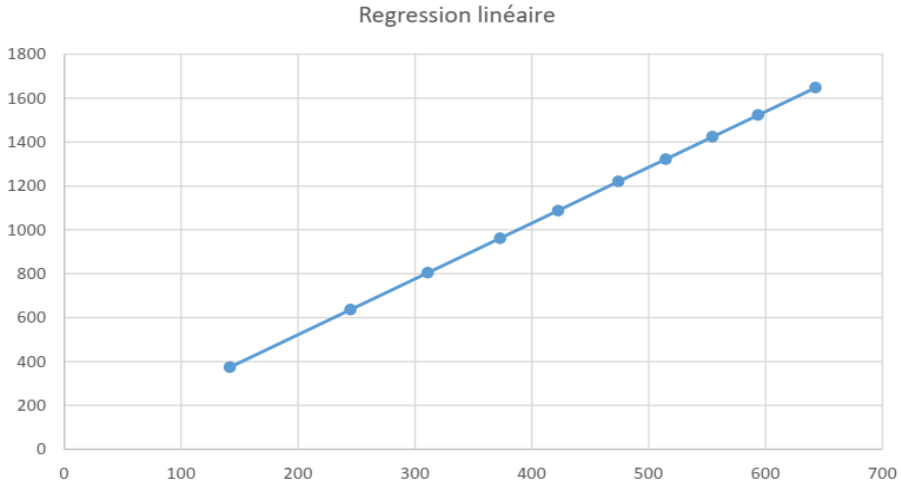


Fig. 8. Régression linéaire de degré 1 : $y = 2{,}542x + 13{,}867$ avec $R^2 = 0{,}999$

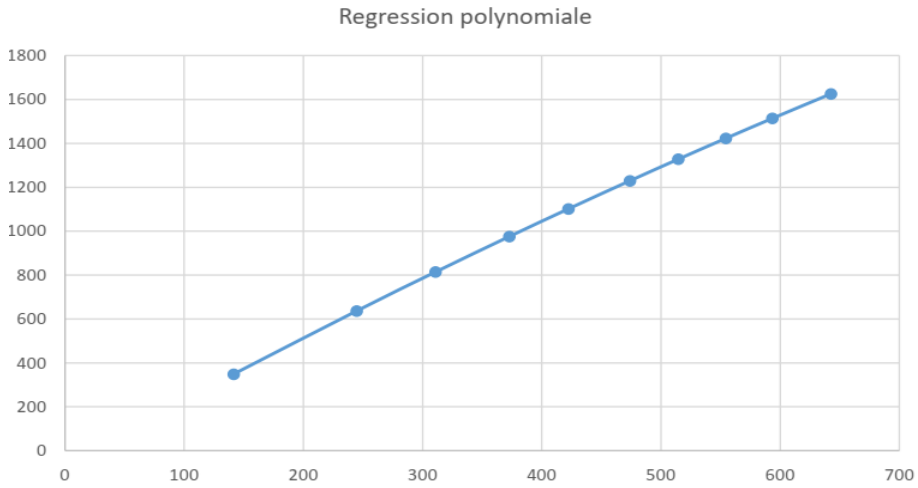


Fig. 9. Régression polynômiale de degré 2 : $y = -0{,}00006x^2 + 3{,}019x - 66{,}59$

4.4.3.1 MÉTHODE SIMPLIFIÉE EN BROCHETTES

Le tableau 15 présente la relation entre les efforts tranchants de niveaux du bâtiment situé sur les sols de type A et C par la méthode simplifiée en brochettes.

Tableau 15. Relation entre les efforts tranchants de niveaux du bâtiment situé sur les sols de type A et C par la méthode simplifiée en brochettes.

	Efforts tranchants en kN		y= 1,756x - 58,405	y =0,00011x^2+ 1,74x- 53,885
	Sol de type A (x)	Sol de type C (y)		
1.	1180,035	1992,317	2013,399	2014,650
2.	1138,537	1931,700	1940,541	1941,399
3.	1066,813	1824,317	1814,614	1814,881
4.	976,317	1681,206	1655,730	1655,409
5.	886,279	1524,506	1497,648	1496,9153
6.	805,578	136,769	1355,960	1355,007
7.	725,478	1199,489	1215,327	1214,294
8.	608,878	982,242	1010,611	1009,708
9.	436,001	690,632	707,088	706,915
10.	210,860	330,545	311,805	313,545

$R \cong 0{,}9996$

Les nuages des points issus de la méthode simplifiée en brochette, la régression linéaire et régression polynômiale sont représentés respectivement sur les figures 10, 11 et 12.

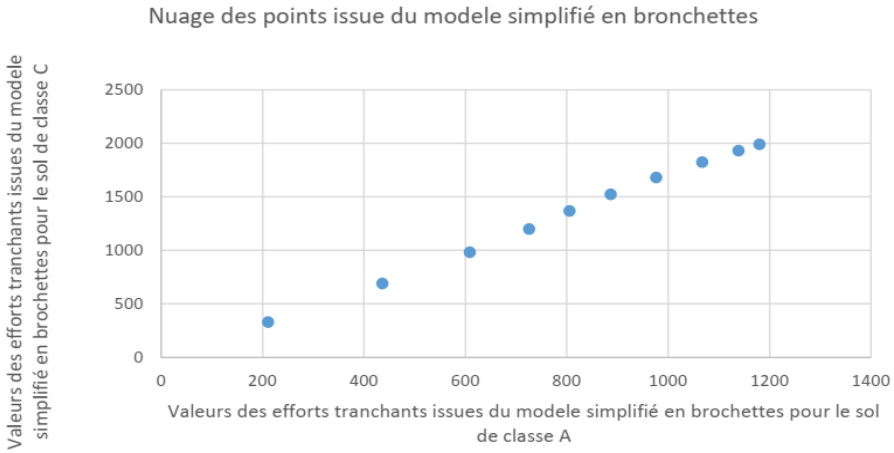


Fig. 10. Nuage des points issu de la méthode simplifiée en brochette en utilisant la régression linéaire : y= 1,756x - 58,405 avec R = 0,9996

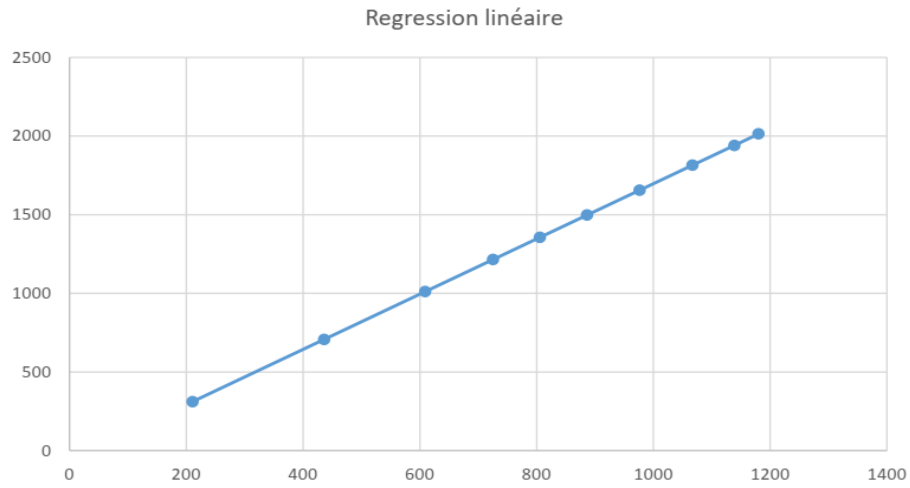


Fig. 11. Régression linéaire de degré 1 : $y = 1{,}756x - 58{,}405$ avec $R = 0{,}9996$

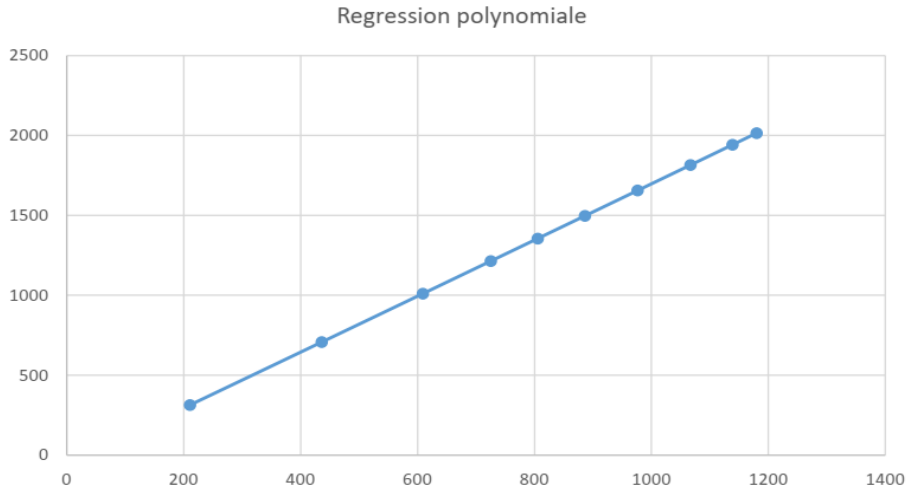


Fig. 12. Régression polynômiale de degré 2 : $y = 0{,}000011x^2 + 1{,}74x - 53{,}885$

4.4.4 Relation Entre Les Efforts Tranchants Obtenus A Partir Du Modèle Simplifié En Brochettes Et Du Calcul Automatique

Le tableau 16 présente la relation entre les efforts tranchants obtenus à partir du modèle simplifié en brochette et du calcul automatique pour le sol de classe A.

Tableau 16. ***Relation entre les efforts tranchants obtenus à partir du modèle simplifié en brochette et du calcul automatique pour le sol de classe A.***

	Effort tranchant		$\hat{y}$ = 1.95$\hat{x}$ - 31,58	$\hat{y}$ =-0,0008$\hat{x}^2$ + 2,61$\hat{x}$ - 144
	Brochettes (x)	Automatique (y)		
1.	642.63	1180.035	1224.647	1194.603
2.	593.51	1138.527	1128.625	1116.661
3.	554.55	1066.813	1052.466	1051.975
4.	514.62	976.318	9744.410	983.048
5.	474.07	886.279	895.142	910.326
6.	422.37	805.518	794.078	813.625
7.	372.74	725.478	697.060	716.597
8.	310.90	608.878	576.174	589.943
9.	244.80	436.001	446.960	447.501
10.	141.56	210.860	245.144	210.428

R=0.9968

Les nuages des points issus de la méthode automatique, la régression linéaire et régression polynômiale sont représentés respectivement sur les figures 13, 14 et 15.

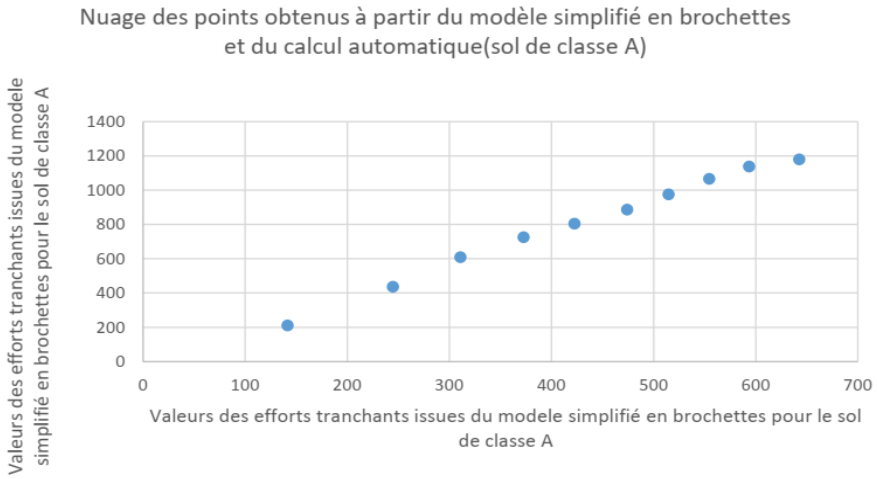


Fig. 13. ***Nuage des points issu de la méthode automatique en utilisant la régression linéaire y= 1.5x-31, 58, R=0,9968***

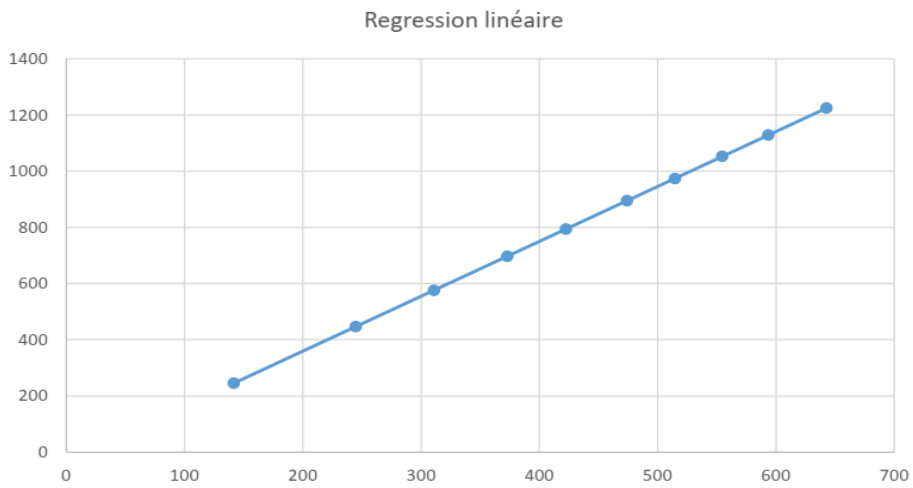


Fig. 14. Régression linéaire de degré 1 : y= 1.5x-31, 58, R=0,9968

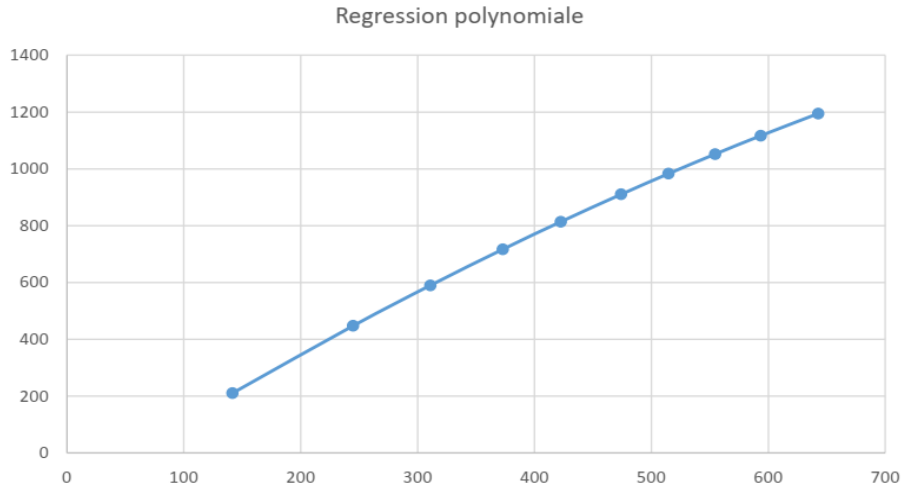


Fig. 15. Régression polynômiale de degré 2 : y=-0,0008x2 + 2,619x² – 144

4.4.4.1 SOL DE CLASSE C

Le tableau 17 présente la relation entre les efforts tranchants obtenus à partir du modèle simplifié en brochette et du calcul automatique pour le sol de classe C.

Tableau 17. Relation entre les efforts tranchants obtenus à partir du modèle simplifié en brochette et du calcul automatique pour le sol de classe C.

	Effort tranchant		$\hat{y}= 0,74\hat{x} + 102,42$	$\hat{y} =0,00003\hat{x}^2 + 0,654\hat{x} - 220,06$
	Modélisation en brochettes (x)	Calcul automatique (y)		
1.	1992,317	1617,03	1572,042	1583,315
2.	1931,700	1539,51	1527,328	1535,399
3.	1824,317	1428,75	1448,75	1451,146
4.	1681,206	1316,56	1342,552	1340,112
5.	1524,506	1208,56	1524,506	1220,174
6.	1365,769	1094,47	1109,872	1100,425
7.	1199,489	979,06	987,216	976,871
8.	982,242	834,65	826,965	818,355
9.	690,632	638,99	611,861	610,759
10.	336,515	341,56	346,222	362,584

Les nuages des points issus du modèle simplifié en brochettes et du calcul automatique, la régression linéaire et la régression polynômiale sont représentés respectivement sur les figures 16, 17 et 18.

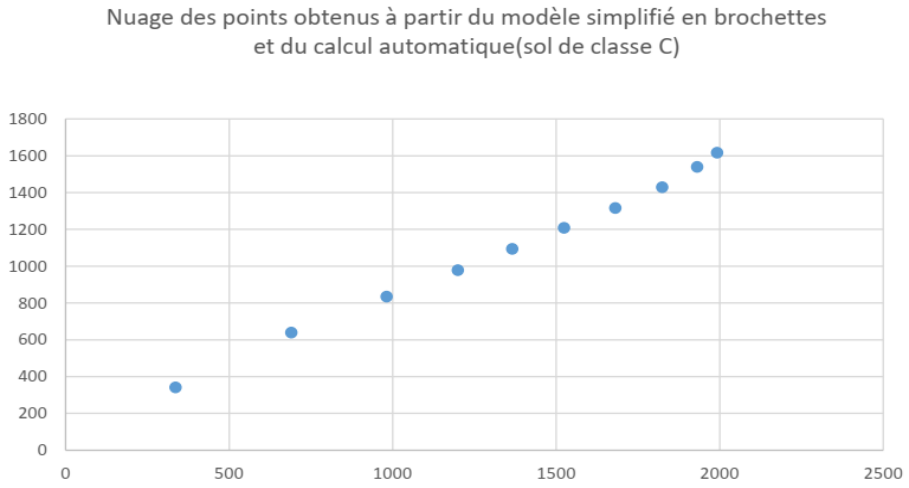


Fig. 16. Nuage des points issu du modèle simplifié en brochettes et du calcul automatique en utilisant la régression linéaire : $\hat{y} = 0,74\hat{X} + 102,42$; $R^2 = 0,998$

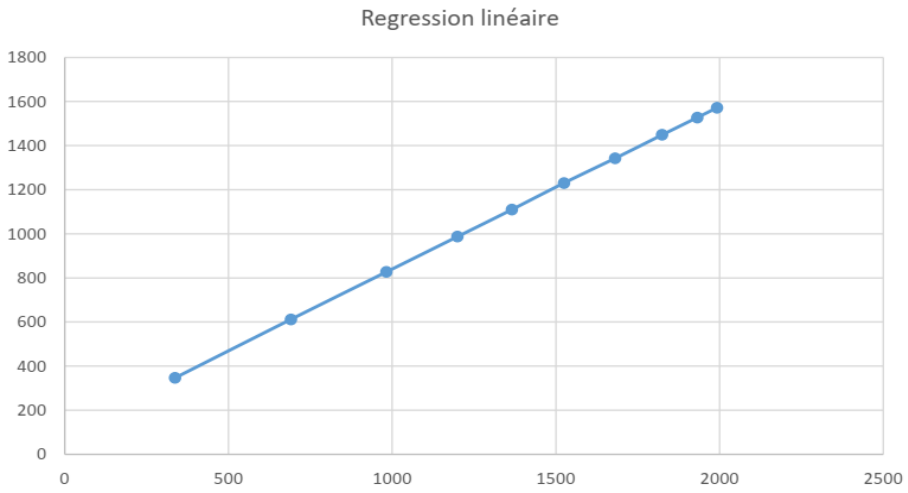


Fig. 17. Régression linéaire de degré 1 : $y = 0{,}74X + 102{,}42$; $R^2 = 0{,}998$

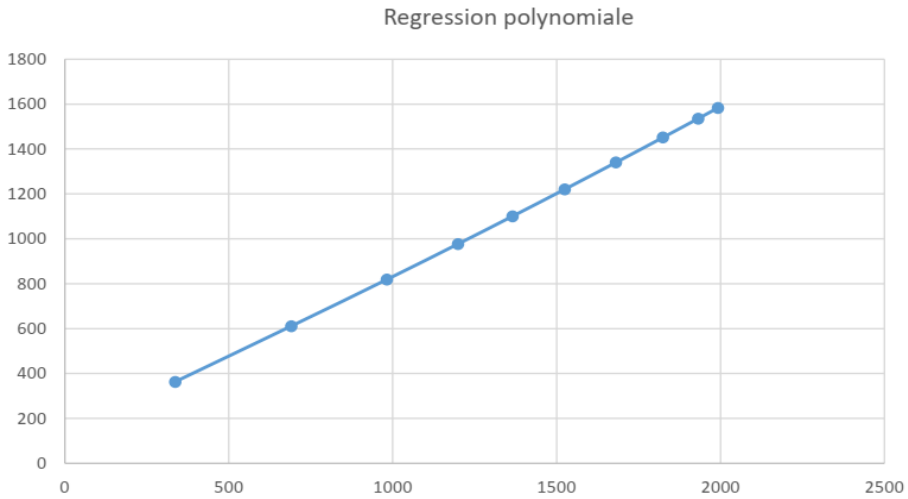


Fig. 18. Régression polynômiale de degré 2 : $y = 0{,}00003X^2 + 0{,}654X - 220{,}06$.

4.4.5 Relation Entre Les Déplacements Latéraux Obtenus A Partir Du Modèle Simplifié En Brochettes Et Du Calcul Automatique

Le tableau 18 présente la relation entre les déplacements latéraux obtenus à partir du modèle simplifié en brochettes et du calcul automatique pour le sol de classe A.

Tableau 18. ***Relation entre les déplacements latéraux obtenus à partir du modèle simplifié en brochettes et du calcul automatique pour le sol de classe A.***

	$dmax$		$\hat{y}$= 0,640$\hat{x}$ - 0,117	$\hat{y}$=0,0068$\hat{x}^2$ + 0,696$\hat{x}$ - 0,201
	Modelé simplifie (x)	Calcul automatique (y)		
1.	0,8757	0,4	0,443	0,402
2.	1,7200	1,0	0,984	0,975
3.	2,7060	1,6	1,615	1,631
4.	3,5964	2,2	2,184	2,212
5.	4,3767	2,7	2,684	2,713
6.	5,0571	3,2	3,119	3,143
7.	5,8148	3,6	3,604	3,614
8.	6,4276	4,0	3,996	3,989
9.	6,8561	4,2	4,270	4,249
10.	7,0609	4,4	4,401	4,372

R = 0,9996

Les nuages des points issus du modèle simplifié en brochettes et du calcul automatique, la régression linéaire et la régression polynômiale sont représentés respectivement sur les figures 19, 20 et 21.

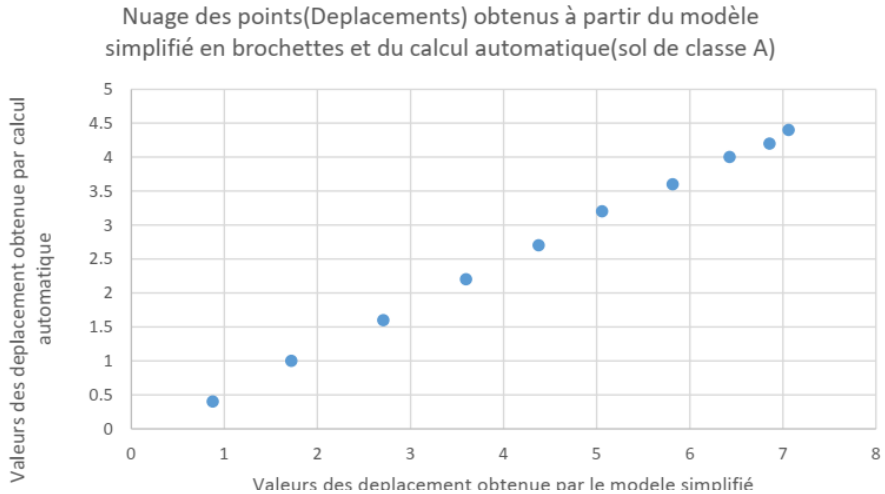


Fig. 19. ***Nuage des points issu du modèle simplifié en brochettes et du calcul automatique en utilisant la régression linéaire : y = 0,640x - 0,117; R = 0,9996***

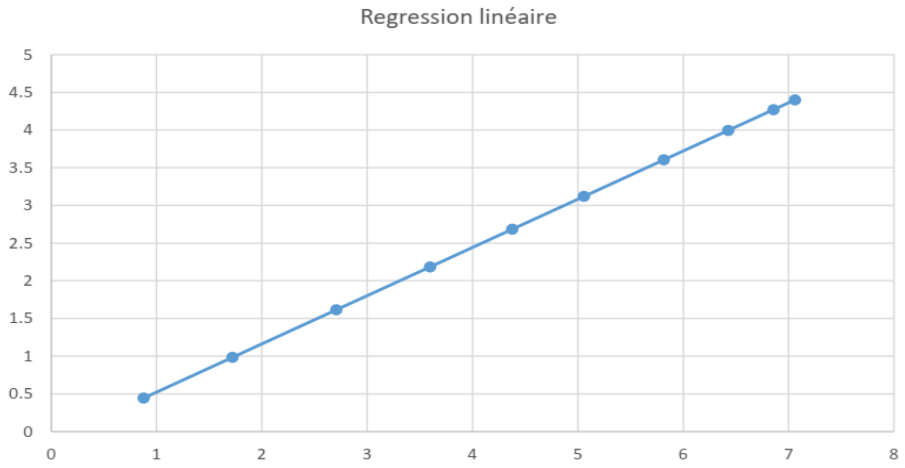


Fig. 20. Régression linéaire de degré 1 : $y = 0{,}640x - 0{,}117$; $R = 0{,}9996$

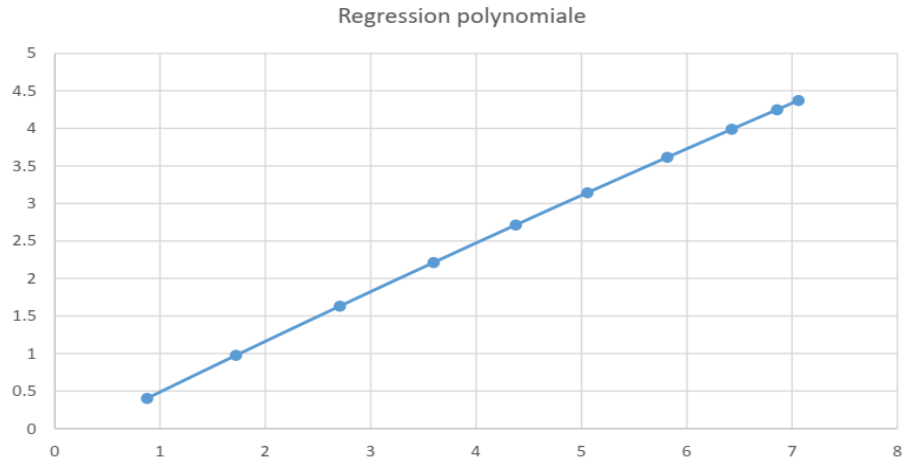


Fig. 21. Régression polynômiale de degré 2 : $y = 0{,}00068x^2 - 0{,}696x - 0{,}201$

Le tableau 19 présente la relation entre les déplacements latéraux obtenus à partir du modèle simplifié en brochettes et du calcul automatique pour le sol de classe C.

Tableau 19. Relation entre les déplacements latéraux obtenus à partir du modèle simplifié en brochettes et du calcul automatique pour le sol de classe C.

	$dmax$		$\hat{y} = 0{,}96\hat{x} - 0{,}232$	$\hat{y} = -0{,}003\hat{x}^2 - 1{,}003\hat{x} - 0{,}341$
	Modèle simplifié (x)	Calcul automatique (y)		
1.	1,478	1,1	1,187	1,134
2.	2,911	2,6	2,563	2,551
3.	4,599	4,2	4,184	4,206
4.	6,141	5,7	5,665	5,702
5.	7,510	7,0	6,979	7,018
6.	8,695	8,2	8,117	8,148
7.	10,022	9,4	9,391	9,404
8.	11,073	10,3	10,401	10,39
9.	11,794	11,00	11,093	11,064
10.	12,134	11,5	11,419	11,381

R = 0,9998

Les nuages des points issus du modèle simplifié en brochettes et du calcul automatique, la régression linéaire et la régression polynômiale sont représentés respectivement sur les figures 22, 23 et 24.

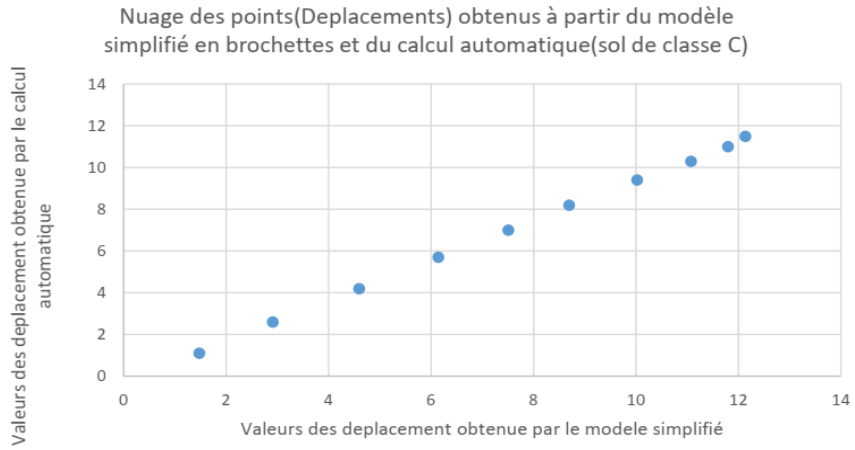


Fig. 22. Nuage des points issu du modèle simplifié en brochettes et du calcul automatique en utilisant la régression linéaire : y=0,96x-0,232, R=0,9998

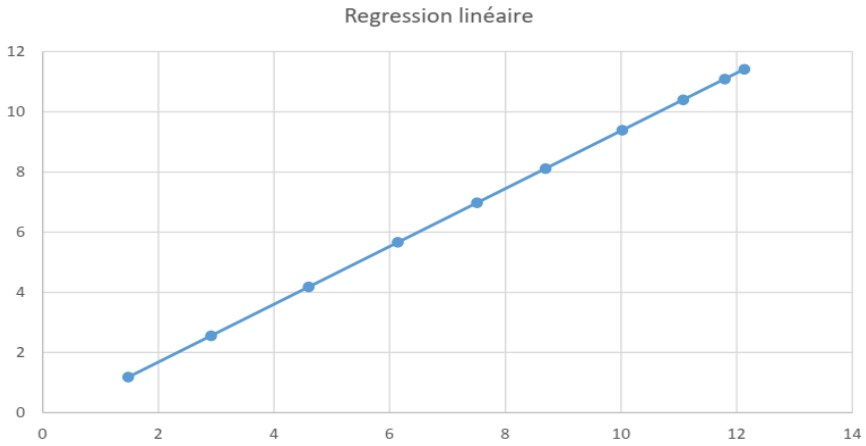


Fig. 23. Régression linéaire de degré 1 : y=0,96x-0,232, R=0,9998

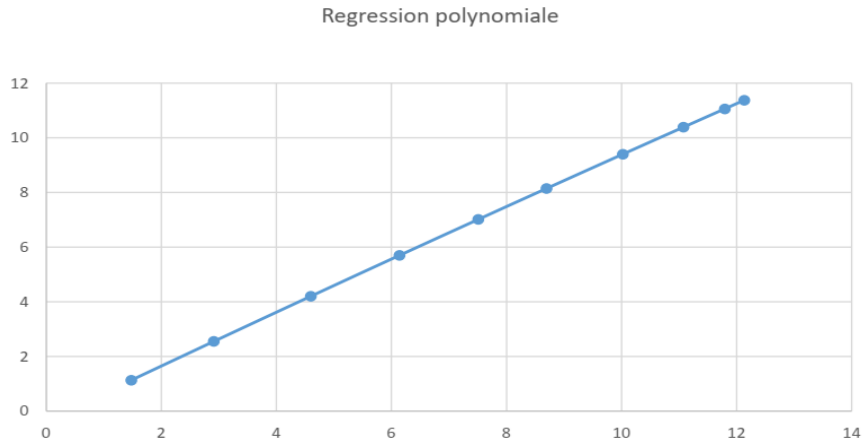


Fig. 24. Régression polynômiale de degré 2 y=0,003x² +1,003x-0,341

4.4.6 DISCUSSION DES RESULTATS

4.4.6.1 RELATION ENTRE LES DÉPLACEMENTS LATÉRAUX DES NIVEAUX DU BÂTIMENT SITUÉ SUR LES SOLS DE TYPE A ET C

4.4.6.1.1 MÉTHODE AUTOMATIQUE

- **Régression linéaire**

L'analyse de régression linéaire effectuée entre les déplacements latéraux de niveaux de la structure pour les deux types de sol (A et C), en se basant sur les résultats issus du calcul automatique montre une forte corrélation entre les deux séries, ce qui permet de prédire la réponse en sol C à partir de celle en sol A avec une bonne précision. Cela signifie que le sol de type C amplifie en moyenne 2,5 fois les déplacements par rapport au sol de type A. Cette corrélation peut être utilisée comme l'outil d'estimation dans la phase de prédimensionnement.

- **Régression polynômiale (degré 2)**

L'ajustement par un polynôme du second degré montre une légère courbure dans la réponse, surtout pour les valeurs élevées de déplacement. Ce modèle affine encore mieux la prédiction des déplacements en sol C à partir du sol de classe À, surtout pour les étages supérieurs.

4.4.6.1.2 MÉTHODE SIMPLIFIÉ EN BROCHETTE

- **Régression linéaire**

Les résultats de l'analyse statistique entre les déplacements latéraux obtenus par le calcul simplifié pour les sols de type A et ceux du sol de type C mettent une corrélation linéaire très forte avec un coefficient de corrélation R = 0,998, cela traduit une relation quasi-parfaite entre les deux séries des données. Ce qui implique que les déplacements latéraux étudiés pour un bâtiment implanté dans l'un des sols peuvent être estimés à partir de l'autre.

- **Régression par un polynôme quadratique**

Cet ajustement donne le résultat très proche de celui du modèle linéaire. Toute cette légère amélioration n'est pas significative, ce qui confirme la pertinence et la suffisance du modèle linéaire pour présenter cette relation. Sur le plan physique, cette forte similitude de comportement malgré la différence de type de sol indique que la réponse de la structure analysée est principalement gouvernée par ses caractéristiques propres (géométrie, masse, rigidité) plutôt que par les écarts géotechniques entre les deux types de sol considérés. Il faut donc un dimensionnement rigoureux tenant compte à la fois du type de sol et de la régularité structurelle pour une réponse sismique maitrisée.

4.4.6.2 RELATION ENTRE LES EFFORTS TRANCHANTS DE NIVEAUX DU BÂTIMENT SITUÉ SUR LES SOLS DE TYPE A ET C

4.4.6.2.1 MÉTHODE AUTOMATIQUE

Relations statistiques

- **Droite de régression**

Le coefficient R=0,999 montre qu'il y a donc une corrélation linéaire quasi parfaite. Cela confirme que malgré la différence des amplitudes, la distribution des efforts tranchants suit une évolution similaire étage par étage.

- **Fonction polynomiale**

L'ajustement par une fonction polynomiale du second degré donne également des bons résultats, mais sans avantage significatif par rapport au modèle linéaire.

Techniquement les résultats montrent que les efforts tranchants obtenus pour le sol de type c sont systématiquement supérieurs à ceux du sol de type A pour tous les niveaux de l'ouvrage. Cette différence s'explique par les propriétés géotechniques plus défavorables du sol de classe C qui est caractérisé par une faible rigidité et une grande amplification des mouvements sismique, comparé au sol de classe A qui est plus rigide et mieux compacté

Les types de sol influence directement l'intensité des efforts sismiques et par conséquent les sollicitations internes.

4.4.6.2.2 MÉTHODE SIMPLIFIÉE EN BROCHETTES

Modèle de régression

- **Droite de régression**

Il y'a donc une corrélation linéaire très forte. Cela démontre une évolution quasi proportionnelle des efforts entre les deux types de sols, suggérant que le comportement dynamique global reste similaire, bien que les amplitudes différentes.

- **Fonction polynomiale de second degré**

L'ajustement par un polynôme du second degré est aussi précis que ce précédent. La répartition des efforts tranchants par niveau met une progression régulière et que la modélisation linéaire est suffisante dans la majorité de cas.

Techniquement, les résultats montrent que les efforts tranchants obtenus pour le sol de type c sont systématiquement supérieurs à ceux du sol de type A pour tous les niveaux de l'ouvrage. Cette différence s'explique par les propriétés géotechniques plus défavorables du sol de classe C qui est caractérisé par une faible rigidité et une grande amplification des mouvements sismique, comparé au sol de classe A qui est plus rigide et mieux compacté.

Les types de sol influence directement l'intensité des efforts sismiques et par conséquent les sollicitations internes.

4.4.6.3 RELATION ENTRE LES EFFORTS TRANCHANTS OBTENUS A PARTIR DU MODÈLE SIMPLIFIÉ EN BROCHETTES ET DU CALCUL AUTOMATIQUE

4.4.6.3.1 SOL DE CLASSE A

- Corrélation très forte entre les deux méthodes

- Le coefficient de corrélation R=0,9968 indique une très forte liaison linéaire entre les valeurs des efforts tranchants issues de deux méthodes.
- Cela signifie que, bien que les valeurs ne soient pas identiques, l'évolution des efforts selon l'altitude suit le même comportement dans les deux approches.

- Écarts significatifs de valeurs absolues

Les valeurs obtenues par la méthode automatique sont nettement supérieures à celles de la méthode simplifiée à tous les niveaux. Cela s'explique par le fait que la méthode automatique intègre plus de paramètre dynamique tels que la masse modale, la forme propre ainsi que les amplifications dues aux vibrations.

- Impact sur le dimensionnement

- L'utilisation de la modélisation en brochettes pourrait sous-estimer les efforts pour le sol de type A, ce qui serait conservateur mais potentiellement insuffisant en cas de séisme fort.
- La méthode automatique est plus réaliste et permet un dimensionnement plus fiable des éléments résistants.

4.4.6.3.2 SOL DE CLASSE C

- **Corrélation**

Pour le sol de classe C, la corrélation est forte mais moindre pour le sol de classe A

- Corrélation légèrement inférieure à celle observée pour le sol de classe A
- Les deux méthodes suivent une même tendance globale mais avec des écarts plus variables selon les niveaux
- La méthode automatique donne les valeurs inferieures par rapport celles de la méthode simplifiée.

4.4.6.4 Relation Entre Les Déplacements Latéraux Obtenus A Partir Du Modèle Simplifié En Brochettes Et Du Calcul Automatique

4.4.6.4.1 Sol De Classe A

- Concordance globale des résultats

Les déplacements obtenus par la modélisation en brochettes sont supérieurs à ceux obtenus par la méthode automatique mais les deux ajustements donnent presque les mêmes résultats. Le coefficient de corrélation R = 0,9996 ≅ 1 indique une relation quasi parfaite entre les deux séries de résultats. Ceci atteste de la fiabilité de la méthode simplifiée dans le contexte du sol de type A.

- **Modèles de régression**

Les fonctions de régression (linéaire et quadratique) ajustées aux données présentent un très bon accord avec les valeurs observées.

Cela confirme que les déplacements suivent une tendance régulière et prévisible selon la hauteur du bâtiment, facilitant ainsi l'analyse simplifiée de structures. L'usage de la méthode simplifiée permet alors un gain de temps et une bonne précision, ce qui est avantageux en phase préliminaire de conception.

4.4.6.4.2 Sol De Classe C

- **Concordance globale des résultats**

Les déplacements obtenus par les deux méthodes sont presque les mêmes avec un petit écart à l'avantage de la modélisation en brochette.

- **Modèles de régression**

Les deux fonctions de régression permettent un ajustement satisfaisant des déplacements obtenus, ce qui confirme une tendance régulière. Toutefois, dans ce contexte, la régression quadratique offre un meilleur ajustement.

- **Implication pour la conception sismique**

Sur un sol de type C, la méthode automatique est fortement recommandée pour garantir une précision suffisante, la méthode simplifiée peut être utilisée à des fins préliminaires, mais avec des marges des sécurités accrues surtout pour les structures de grandes hauteurs.

5 Conclusion Et Recommandations

5.1 Conclusion

Le risque sismique augmente significativement avec la hauteur des structures, rendant indispensable une conception rigoureuse et un dimensionnement adéquat pour garantir leur stabilité face aux séismes. Dans cette étude, une analyse modale spectrale a été menée sur un bâtiment de dix niveaux, en considérant deux types de sols: un sol de classe A et un sol de classe C, correspondant respectivement aux conditions géotechniques des villes de Goma et de Bukavu.

Cette analyse a mis en évidence l'influence déterminante des caractéristiques du sol sur le comportement dynamique des structures. Des différences notables ont été observées en termes de périodes propres et d'efforts internes, soulignant l'importance de prendre en compte les conditions géotechniques locales dès la phase de conception.

Les effets sismiques calculés ont été superposés aux charges statiques (charges permanentes et d'exploitation) conformément aux combinaisons prévues par les normes en vigueur. Toutefois, le respect des règles de dimensionnement parasismique, bien qu'essentiel, ne suffit pas à lui seul à assurer la sécurité d'un ouvrage.

La performance sismique d'une structure dépend également de nombreux autres facteurs, tels qu'une conception architecturale réfléchie, la régularité de la structure en plan et en élévation, le choix judicieux des matériaux, ainsi que de la qualité de l'exécution sur le chantier. C'est pourquoi l'ingénieur doit adopter une approche intégrée, prenant en compte les exigences parasismiques dès les premières phases du projet et veillant à une mise en œuvre soignée et réaliste.

Une telle approche globale est indispensable pour garantir la sécurité des occupants, minimiser les pertes matérielles et assurer la résilience des infrastructures face aux aléas sismiques, en particulier dans des zones sismiques sensibles comme celles de Goma et Bukavu.

5.2 RECOMMANDATIONS

Au terme de ce travail, nous formulons les recommandations suivantes:

- Réaliser systématiquement des études géotechniques approfondies avant toute conception en zone sismique, afin de bien caractériser le sol et adapter le modèle de calcul en conséquence.
- Privilégier une régularité géométrique des structures, tant en plan qu'en élévation, pour réduire les effets de torsion et garantir une meilleure réponse sismique.
- Former et sensibiliser les ingénieurs, architectes et entrepreneurs aux exigences parasismiques, en mettant à jour régulièrement leurs connaissances selon les normes les plus récentes.
- Renforcer le contrôle qualité lors de la mise en œuvre sur chantier, car une bonne conception ne peut être efficace qu'avec une exécution soignée.
- Encourager l'élaboration et l'application de normes locales ou régionales adaptées aux zones sismiques du Kivu, fondées sur des données sismotectoniques actualisées et des études de vulnérabilité spécifiques au contexte local.

Ces recommandations visent à améliorer la résilience des structures, réduire les risques pour les populations, et contribuer à une meilleure planification urbaine dans les zones sismiques telles que Goma et Bukavu.

REFERENCES

[1] Millard, A. (2004a). Structures sous séismes : Expérimentation en laboratoire. Hermes, Lavoisier. Paris, France.
[2] CAPRA, A. & DAVIDOVICI, V. (1982). *Calcul dynamique des structures en zone sismique*. Eyrolles. Paris, France.
[3] Plumier, A. (2014). Technique de l'ingénieur, séismes et bâtiment-analyse des constructions.
[4] Eurocode 1. (2004b). Actions sur les structures.
[5] Eurocode 8. (s. d.-a). Calcul des structures pour leur résistance aux séismes.
[6] Eurocode 8. (1998). Conception et dimensionnement des structures pour leur résistance aux séismes- Partie 3.
[7] Jacky, M. (2010). Le risque sismique – les séismes et leurs effets – construction parasismique. Grenoble –INP. France.
[8] Jean Lemaître, Pierre-Alain Boucard, & François Hild. (2007). *Résistance mécanique des solides*. Dunod, Paris, France.
[9] Zacek M. (1996). *Construire Parasismique, Edition Parenthèses*. 72, Cours Julien -13006, Marseille -France.
[10] Michael, E. (2019). Earthquake Perils Lead, Swiss Re, Dégâts du séisme : Directs et indirects. Swiss Re.
[11] Muvundja, F (avec Kabongo, S & Tshibangu, J.). (2017). Caractérisation géotechnique des sols volcaniques autour de Goma, RDC.
[12] Nicolas, J. (2008). Maçonneries en zone sismique : Méthode et exemples de dimensionnement selon l'Eurocode 8 (CERIB). Paris, France.
[13] Balendier, P. (2010). Introduction aux phénomènes d'origine sismique.
[14] https://www.bing.com/search?q=%E2%80%A2%09P.%20BALENDIER.%20(2010).%20Introduction%20aux%20ph%C3%A9nom% C3%A8nes%20d%E2%80%99origine%20sismique.&qs=n&form=QBRE&sp=-1&lq=0&pq=wilfredo.%20 (s.%20d.-c).%20guide%20de%20construction%20parasismique%20(craterre).&sc=0-67&sk=&cvid=4005C27465A14F2290550FC5FF9D68DA. Consulté en ligne 06 décembre 2025 à 11h27.
[15] Victor, D., & Alain, C. (2015). *Pratique du calcul sismique-guide d'application de* l'Eurocode 8 (Eyrolles). Paris, France.
[16] Bouarirene Noureddine & Tellal Lamouri. (2019). *Étude dynamique comparative des bâtiments avec spectre de réponse réel et règlementaire*. Mémoire de Master en Génie Civil, Université Akli Mohand Oulhadje – Bouira, Algerie.
[17] Jugurtha KARICHE. (2018). Rôle de transfert multiple de contraintes, déficit de sismicité et caractéristiques physiques des ruptures sismiques. Thèse de doctorat en Géophysiques. Université de Strasbourg. France. 244 p.
[18] Kalondero Moise M. (2024). Etude comparative des comportements des structures en beton armé et celles métalliques lorsqu'elles sont soumises aux séismes. Mémoire de licence]. IBTP / Butembo. RD Congo.
[19] Mavonga T, Zana. N, & Durrhein, RJ. (2010). Studies of cristal structure seismic precursors to volcanic eruptions and earthquake hazard in the eastean provinces of Democratic Republic of Congo. *Journal of African Earth Sciences, 58,* 623-633.

[20] Règles Parasismiques Algériennes RPA 99 / Version 2003. Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique. Comitee de redaction.
[21] Modificatifs et Compléments aux Règles Parasismiques Algériennes (RPA99). Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (CGS) 2003. Groupe de Travail Spécialisé (GTS).
[22] Moundom, A., Mapendo Kabyabu, F., Muhindo Kasay, T., Guetsa Kamanou, F., Ngapgue, F, and Tamo Tatietse, T., (2026). Contribution au calcul des structures des bâtiments de type R+9 sans éléments de contreventement dans les zones sismiques de Goma et de Bukavu en République Démocratique du Congo (RDC). International Journal of Innovation and Scientific Research, ISSN 2336-0046, Vol. 83 No. 2, pp. 165-211.
[23] Règles BAEL 91 révisées 99, (Février 2000). Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites. Paris, France. 221 p.