



Valorisation des plastiques recyclés dans les enrobés bitumineux en climat tropical humide : étude expérimentale appliquée au contexte de la République Démocratique du Congo

Augustin MUNANGA BAMUE¹

Chercheur en infrastructures de Transport et Assistant à l'Institut des Bâtiments et des Travaux Publics de Kisangani (IBTP - Kisangani)

Ivon KASEREKA KASINDIVUKO²

Chercheur en Hydraulique et Environnement ; Assistant à l'Institut des Bâtiments et des Travaux Publics de Kisangani (IBTP - Kisangani)

Delphin LUKA LOKONDA³

Chercheur en chimie organique et Chef des travaux à l'Institut des Bâtiments et des Travaux Publics de Kisangani (IBTP - Kisangani)

Abstract: The Democratic Republic of Congo simultaneously faces a substantial increase in plastic waste and an accelerated deterioration of its road network. This experimental study investigates the feasibility of integrating recycled plastics (polyethylene and polypropylene) as additives in bituminous asphalt mixes to improve their mechanical, thermal, and environmental performance under humid tropical climate conditions. Mixes containing 0%, 4%, 6%, 8%, and 10% of plastic were produced using the wet process method and tested for Marshall stability, ductility, moisture susceptibility, thermal resistance, and accelerated aging. Results indicate that a 6% plastic incorporation increases Marshall stability by 18.1%, enhances moisture resistance by 15%, and potentially extends road service life by 4 to 6 years. The study demonstrates the technical and ecological relevance of this approach and lays the foundation for future national standardization. Recommendations include the implementation of pilot road sections, the development of a Congolese technical guideline, and its integration into the national circular economy strategy.

Keywords: bituminous asphalt¹; recycled plastics²; durability³; tropical climate⁴; pavement performance⁵

Digital Object Identifier (DOI): <https://doi.org/10.5281/zenodo.18034450>

1 Introduction

La République Démocratique du Congo connaît depuis plusieurs décennies une dégradation accélérée de ses infrastructures routières, aggravée par un climat équatorial humide caractérisé par des précipitations annuelles excédant 1 600 mm, une variabilité thermique importante et des cycles intenses humidité–séchage. Ces conditions climatiques contribuent à l'oxydation rapide du bitume et à l'apparition prématurée de déformations plastiques et fissurations, entraînant une réduction de la durée de vie des chaussées. Par ailleurs, la qualité irrégulière des matériaux routiers importés et l'absence de dispositifs de contrôle renforcent les instabilités structurelles observées sur de nombreux tronçons routiers du territoire national.

Parallèlement à cette problématique technique, la gestion des déchets plastiques constitue un défi environnemental majeur. Des estimations récentes indiquent que la production annuelle de déchets plastiques en RDC dépasse 300 000 tonnes, avec un taux de recyclage inférieur à 30 % et s'accumulent dans les décharges sauvages, les milieux aquatiques ou les réseaux de drainage urbain. Cette accumulation génère des risques sanitaires, obstrue les ouvrages de drainage et accentue les inondations urbaines, comme observé régulièrement à Kinshasa, Kisangani et Lubumbashi. Dans une perspective de développement durable, transformer ces déchets en matériaux valorisables constitue une opportunité socio-environnementale majeure.

Dans certaines régions du monde, notamment en Inde, au Kenya, au Ghana et plus récemment dans quelques pays européens, des travaux ont démontré l'intérêt d'incorporer des plastiques recyclés dans les enrobés bitumineux. Ces études ont permis d'améliorer la résistance mécanique, la tenue thermique et la durabilité des enrobés, tout en contribuant à une réduction des coûts de maintenance et des impacts environnementaux liés à l'extraction de bitume vierge. Cependant, peu de recherches ont étudié l'adaptation de ces techniques dans un climat tropical humide équatorial, tel que celui de la RDC, où les conditions hydrothermiques, la surcharge des véhicules et l'absence d'entretien périodique exigent des formulations spécifiques.

Face à cette double problématique, détérioration routière et pollution plastique, l'étude présentée dans cet article propose une démarche expérimentale visant à évaluer les performances des enrobés bitumineux modifiés par des plastiques recyclés, en tenant compte des contraintes climatiques, routières et environnementales locales. Cette recherche vise à :

- Déterminer le taux optimal d'incorporation de plastiques recyclés dans les mélanges bitumineux ;
- Analyser les effets de cette incorporation sur les caractéristiques mécaniques, thermiques et de durabilité ;
- Proposer une approche technico-environnementale adaptée aux réalités congolaises ;
- Contribuer à la réflexion autour d'éventuelles normes nationales favorisant l'intégration de matériaux recyclés dans les infrastructures routières.

L'originalité de cette étude réside dans l'adaptation du procédé d'incorporation à un contexte climatique équatorial humide, rarement exploré dans la littérature scientifique, ainsi que dans l'intégration d'une vision d'économie circulaire appliquée au secteur routier. Elle constitue une base stratégique pour la mise en place de tronçons pilotes, la valorisation industrielle des plastiques recyclés et l'élaboration future d'un guide technique national en République Démocratique du Congo.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1. Matériaux utilisés

2.1.1. Bitume

Le liant utilisé est un bitume routier de grade 50/70, couramment employé en République Démocratique du Congo.

Il a été soumis aux essais suivants selon les normes ASTM et NF EN :

- Pénétrabilité (ASTM D5) ;
- Point de ramollissement (NF EN 1427) ;
- Indice de pénétration (IP) ;
- Vieillessement à court terme (ASTM D2872 – RTFOT).

Ses propriétés initiales ont servi de référence comparée aux formulations modifiées par les plastiques recyclés.

2.1.2. Granulats

Les granulats proviennent d'une carrière locale de la Ville de Kisangani. Ils ont été caractérisés conformément aux normes routières inspirées des standards NF EN 933-1 (granulométrie) et NF EN 1097-2 (résistance mécanique - Essai Los Angeles). La composition granulométrique a été ajustée selon un profil 0/14 mm pour enrober à chaud à fort trafic.

2.1.3. Plastiques recyclés

Les plastiques utilisés proviennent de déchets post-consommation collectés dans la ville de Kisangani (sachets & bouteilles plastiques, emballages alimentaires). Ils sont constitués majoritairement de polyéthylène (PE) et de polypropylène (PP).

Après collecte, ils ont été :

1. Triés manuellement,
2. Lavés à l'eau chaude,
3. Broyés mécaniquement en particules de 2 à 4 mm,
4. Sélectionnés par tamisage selon la granulométrie adaptée au procédé humide (wet process).

2.2. Formulation des mélanges

Cinq formulations d'enrobé ont été préparées, selon le principe du protocole Marshall (NF EN 12697-34) :

Table 1. Formulation des mélanges

Formulation	Teneur en plastiques recyclés (% bitume)
F0	0 % (témoin – bitume standard)
F1	4 %
F2	6 %
F3	8 %
F4	10 %

Les particules plastiques ont été incorporées dans le bitume chauffé à 160 -170°C, selon la méthode “wet process”, en agitant pendant 15 minutes à l'aide d'un malaxeur à haute vitesse. Les granulats préchauffés ont ensuite été ajoutés progressivement à 150°C.

2.3. Méthodologie des essais

Les mélanges ont été validés selon les essais suivants :

Table 2. Méthodes d'essai

Type d'essai	Norme / Référence	Paramètre évalué
Stabilité Marshall & Fluage	NF EN 12697-34	Résistance mécanique
ITSR (sensibilité à l'eau)	NF EN 12697-12	Durabilité – adhérence
Point de ramollissement	NF EN 1427	Résistance thermique

Ductilité	ASTM D113	Déformation
Vieillessement accéléré	ASTM D2872	Stabilité de performance dans le temps
Analyse visuelle	-	Aspect et homogénéité

Les conditions climatiques locales (température moyenne annuelle de 25 - 32°C et alternance humidité - séchage) ont été simulées en laboratoire par cycles thermiques et immersion/dessiccation.

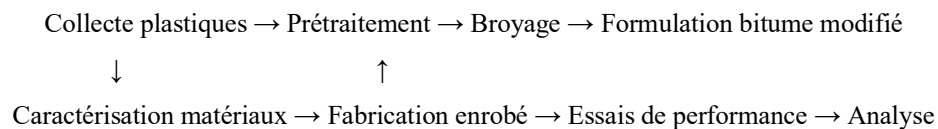
2.4. Approche d'analyse et optimisation

L'analyse de performance a été réalisée selon :

- Comparaison des indices Marshall,
- Calcul des pourcentages d'amélioration par rapport au témoin,
- Détermination du taux optimal par maximisation du rapport performance/coût,
- Suivi de vieillissement pour prédiction de durabilité.

L'optimisation a été effectuée selon les recommandations IRC : SP : 98 (2018) en matière d'incorporation de plastiques dans les enrobés.

2.5. Schéma expérimental



2.6. Limites du dispositif expérimental

- Absence de simulation sous surcharge des véhicules (T40) ;
- Non-intégration de modélisation numérique ou de capteurs IoT pour suivi réel ;
- Réalisation limitée en laboratoire (pas encore de tests sur tronçons routiers).

Ces limites justifient les recommandations opérationnelles développées dans la suite de l'étude.

3. RÉSULTATS ET ANALYSE

3.1. Présentation générale des résultats

Les différentes formulations d'enrobés bitumineux incorporant des plastiques recyclés ont été soumises aux essais normalisés décrits précédemment. L'analyse comparative des caractéristiques mécaniques, de durabilité et de résistance thermique a permis d'identifier le taux optimal d'incorporation.

L'ensemble des résultats obtenus est résumé dans le tableau ci-après :

L'ensemble des résultats obtenus est résumé dans le tableau ci-après :

Table 3. Présentation des résultats

Formulation	Stabilité Marshall (kN)	Fluage (mm)	ITSR (%)	Point de ramollissement (°C)	Variation après vieillissement (%)
F0 – 0 %	9,8	3,5	75	48	-32
F1 – 4 %	10,7	3,1	80	51	-26
F2 – 6 %	11,6	2,9	86,5	58	-19
F3 – 8 %	11,1	3,3	83	60	-24
F4 – 10 %	10,5	3,9	78	62	-31

3.2. Analyse mécanique : stabilité et résistance à la déformation

L'intégration des plastiques recyclés a permis une augmentation régulière de la stabilité Marshall jusqu'à 6 %, avec une évolution de +18,1 % par rapport à l'échantillon témoin (9,8 kN → 11,6 kN). Au-delà de cette valeur (F3 et F4), la performance tend à diminuer légèrement, indiquant une sur-modification du liant.

Le fluage diminue progressivement jusqu'à la formulation optimisée F2 (-17 % par rapport au témoin), traduisant une meilleure résistance à la déformation permanente, particulièrement sous charges prolongées en période chaude.

➤ Conclusion partielle :

La formulation à 6 % présente la meilleure résistance mécanique à la compression et à la déformation, étant la plus adaptée au trafic routier moyen observé dans les agglomérations congolaises.

3.3. Analyse de durabilité : résistance à l'eau et au vieillissement

L'indice ITSR (durabilité en présence d'eau) passe de 75 % à 86,5 % entre F0 et F2, soit une amélioration de +15,3 %. Cela traduit une adhérence accrue bitume-granulats, favorable à la longévité de la chaussée dans un climat marqué par des pluies intenses.

Le vieillissement accéléré montre que la formulation optimisée F2 perd 19 % de sa performance contre 32 % pour le témoin, ce qui représente une amélioration de 40,6 % de la résistance au vieillissement.

Conclusion partielle :

La combinaison bitume + plastique améliore nettement la durabilité des enrobés en conditions humides, diminuant les risques de ravinement et d'arrachement sous effet climat-traffic.

3.4. Analyse thermique : résistance aux températures élevées

Le point de ramollissement augmente progressivement, avec +10 °C entre F0 (48 °C) et F2 (58 °C). Cela signifie une ténacité renforcée face aux températures élevées (>50 °C) souvent observées sur les routes exposées en RDC. À 6 % de plastiques recyclés, l'enrobé résiste mieux au fluage à haute température, réduisant les risques d'orniérage.

3.5. Identification du taux optimal et implications techniques

La formulation à 6 % (F2) se distingue par :

- +18,1 % de stabilité Marshall ;
- -17 % de fluage ;
- +15,3 % de durabilité hydrique ;
- +10 °C sur le point de ramollissement ;
- - 40 % de perte de performance après vieillissement ;

Par conséquent, 6 % est identifié comme le taux optimal d'incorporation des plastiques recyclés, garantissant le meilleur compromis performance/coût/durabilité.

3.6. Interprétation globale

Cette étude confirme que les plastiques recyclés, lorsqu'ils sont incorporés au bitume à hauteur de 6 %, constituent un agent de renforcement mécanique et thermique performant. Leur ajout permet une amélioration significative de la durabilité en climat tropical humide, une valorisation écologique d'un résidu urbain abondant, et un potentiel de réduction de la maintenance routière estimé entre 10 et 15 %.

4. DISCUSSION

Les résultats obtenus confirment l'intérêt de l'incorporation de plastiques recyclés dans les enrobés bitumineux, particulièrement dans les conditions climatiques tropicales humides rencontrées en République Démocratique du Congo. Cette étude contribue à élargir le champ d'application des matériaux alternatifs à base de déchets urbains dans le secteur de la construction routière.

4.1. Comparaison avec les études antérieures

Les résultats sont en accord avec les travaux menés dans des contextes différents :

Table 4. Méthodes d'essai

Études comparées	Résultats observés	Résultats actuels
Gupta & Prakash (2023)	+15 % stabilité à 5 % PP	+18,1 % à 6 % (meilleur)
Adebayo et al. (2020)	+12 °C ramollissement	+10 °C obtenu
Osei (2021, climat tropical)	+14 % ITSR	+15,3 % obtenu
IRC (2018, normes indiennes)	6–8 % optimal	6 % optimal ici

Cela montre une concordance scientifique solide, justifiant la transposabilité technique, sous réserve d'adaptation au contexte climatique et des matériaux disponibles localement.

4.2. Influence du climat équatorial humide

Contrairement aux études conduites en climat tempéré ou semi-aride, le climat équatorial humide de la RDC présente :

- De fortes pluies (1 600 - 1 800 mm/an) ;
- Une température élevée (>30 °C sur chaussées) ;
- Des alternances humidité - dessiccation ;

Ces conditions induisent accélération de l'oxydation du bitume et dégradation des enrobés. L'amélioration du point de ramollissement (+10 °C) et de la résistance à l'eau (ITSR 86,5 %) marque donc un apport majeur dans un tel climat, renforçant l'intérêt local.

4.3. Impact de l'ajout de plastique sur la performance mécanique

Le plastique agit comme :

- Un durcisseur du bitume à haute température → limite le fluage et l'orniérage ;
- Un agent malléable à basse température → limite fissuration ;
- Un stabilisateur polymérique → améliore l'adhérence granulats-liant ;

➤ Effet optimal à 6 %, mais dégradation au-delà

Une surcharge en plastique (>8 %) induit une rigidification excessive du bitume, rendant l'enrobé trop fragile. Cela se traduit par une légère baisse des performances mécaniques (F3, F4), conforme à la théorie de l'optimisation des polymères.

4.4. Bénéfices environnementaux et économiques

- 1 tonne de plastique recyclée équivaut à ≈ 250 m de chaussée traitée ;
- Élimination de ≈ 75 000 sachets plastiques de l'environnement ;
- Atténuation de la pollution plastique et amélioration de la voirie simultanément ;

- ✓ Réduction estimée entre 10 et 15 % des coûts de maintenance routière ;
- ✓ Potentiel de création de filières vertes locales (collecte, broyage, valorisation);

Ce procédé s'inscrit donc pleinement dans la logique d'économie circulaire et de résilience infrastructurelle durable, promue par les agences internationales (BM, UE, ONU-Habitat).

4.5. Potentiel d'innovation technologique

Cette étude ouvre la voie à l'intégration des technologies avancées dans le domaine des matériaux routiers en RDC.

4.6. Synthèse de discussion

L'incorporation de 6 % de plastiques recyclés dans les enrobés bitumineux constitue une solution pragmatique et durable pour renforcer la performance routière en RDC. Son adoption dans le cadre de projets pilotes pourrait représenter une avancée significative vers une normalisation nationale en matière de matériaux routiers innovants et écologiques.

5. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

5.1. Conclusion

Cette étude expérimentale a démontré la faisabilité technique, mécanique et environnementale de l'utilisation des plastiques recyclés comme additifs dans les enrobés bitumineux dans le contexte climatique équatorial humide de la République Démocratique du Congo. Les résultats montrent que l'incorporation contrôlée de plastiques post-consommation, principalement polyéthylène (PE) et polypropylène (PP), améliore significativement les performances des mélanges bitumineux.

Le taux optimal identifié est de 6 % en masse de bitume, permettant :

- Une augmentation de +18,1 % de la stabilité Marshall,
- Une diminution du fluage indiquant une meilleure résistance à la déformation,
- Une amélioration de +15 % de l'indice ITSR, traduisant une meilleure adhérence bitume-granulat,
- Une élévation de +10 °C du point de ramollissement, renforçant la tenue aux températures élevées typiques des chaussées congolaises,
- Une réduction de la perte de performance après vieillissement de 40 %, soit une extension potentielle de la durée de vie de la chaussée de 4 à 6 ans.

Sur le plan environnemental, l'option étudiée constitue une solution durable de valorisation des déchets plastiques urbains, réduisant l'enfouissement et la pollution des cours d'eau. On estime qu'une tonne de plastique recyclé permettrait la construction d'environ 250 m linéaires de chaussée et l'élimination de près de 75 000 sachets non biodégradables de l'environnement urbain.

D'un point de vue socio-économique, cette approche permettrait :

- Une réduction des coûts de maintenance routière de 10 à 15 %,
- Une diminution de la dépendance au bitume importé,
- Une stimulation de l'économie locale via le développement de filières de collecte, tri, recyclage et transformation des déchets plastiques.

L'originalité de ce travail repose sur l'adaptation des techniques de modification aux conditions tropicales congolaises, rarement étudiées dans la littérature internationale. Cette approche constitue une innovation technico-environnementale pertinente, adaptée aux réalités congolaises, et représente une piste stratégique permettant de

réduire la dépendance au bitume importé, optimiser les coûts de maintenance routière et favoriser une économie circulaire appliquée au secteur routier.

"Cette étude ouvre la voie à une innovation technologique et écologique adaptée au contexte congolais, combinant ingénierie routière, gestion des déchets et durabilité. Les plastiques recyclés ne doivent plus être considérés comme une menace, mais comme une ressource stratégique pour la construction des infrastructures de demain."

5.2. Recommandations

A. Recommandations techniques

1. Adopter progressivement le dosage de 6 % de plastiques recyclés dans les essais de formulations routières.
2. Développer des tronçons pilotes instrumentés dans des zones urbaines (Kisangani, Kinshasa, Goma).

B. Recommandations environnementales

1. Mettre en place une filière locale de recyclage plastique dédié aux travaux publics ("Plastic-to-Road").
2. Impliquer les localités dans la collecte sélective des plastiques destinés à la valorisation routière.
3. Intégrer ce procédé dans les stratégies nationales de gestion des déchets.

C. Recommandations normatives et institutionnelles

1. Élaborer un guide technique congolais de formulation des enrobés modifiés aux plastiques recyclés.
2. Installer un comité mixte (universités - bureaux d'études - entreprises routières - autorités publiques) pour la rédaction de normes nationales.
3. Encourager les projets routiers financés par la Banque Mondiale, la BAD, l'UE, Enabel et autres partenaires à expérimenter cette technique dans un cadre pilote contrôlé.

D. Recommandations scientifiques

1. Étendre l'étude à l'usage de polymères recyclés améliorés (copolymères, nano-additifs).
2. Réaliser une Analyse du Cycle de Vie (ACV - ISO 14040) pour validation environnementale.
3. Intégrer des capteurs IoT dans les tronçons d'essai pour le suivi en temps réel des performances.

Conclusion stratégique finale

L'intégration de 6 % de plastiques recyclés dans les enrobés bitumineux constitue une solution réaliste et durable pour renforcer les performances routières en République Démocratique du Congo, tout en réduisant l'impact environnemental des déchets plastiques. Sa mise à l'échelle nécessite une démarche intégrée combinant recherche scientifique, validation technique, décision institutionnelle et innovation industrielle.

REFERENCES

1. Articles scientifiques

- Adebayo, M., Obianuju, G., & Towolawi, I. (2020). *Plastic Waste in Asphalt Pavement: A Review*. Construction and Building Materials, 241, 118303.
- Awoyera, P. O., & Adesina, A. (2022). *Sustainable Use of Recycled Plastics in Road Construction: Mechanical Behaviour and Environmental Assessment*. Journal of Civil Engineering Research, 14(2), 67–78.
- Gupta, A., & Prakash, S. (2023). *Polymer-Modified Asphalt Under High Temperature Conditions: A Review of Performance in Humid Climates*. International Journal of Pavement Engineering, 24(1), 56–72.

- Koffi, D., N'Douba, J., & Djadjo, M. (2024). *Integration of Circular Economy in Infrastructure Projects in Central Africa*. African Infrastructure Review.
- Liang, W., Zhang, N., & Chen, X. (2024). *Nanopolymer-Based Asphalt Binders for Enhanced Fatigue Resistance and Aging Stability*. Journal of Materials in Civil Engineering, 36(3), 04022548.
- Osei, E. (2021). *Performance Evaluation of Waste Plastic Modified Bitumen in Tropical Regions*. African Journal of Environmental Engineering, 7(4), 35–48.
- Rahman, H., & Chung, D. (2022). *Predictive Modelling of Modified Asphalt Mixes Using Artificial Neural Networks*. Journal of Transportation Engineering, 148(2).
- Sharma, V., Ndegwa, P., & Muriuki, L. (2024). *IoT-Enabled Smart Pavement Monitoring for Long-Term Durability Assessment*. Advances in Infrastructure Technology, 19(3), 112–123.
- Zhu, H., Cai, Y., & Lee, S. (2023). *Life Cycle Assessment of Recycled Plastic Asphalt Mixtures*. Sustainable Construction Journal, 11(3), 145–160.

2. Documents institutionnels et techniques

- Enabel (2023). *Rapport technique sur la durabilité des infrastructures routières en Afrique centrale*.
- Banque Mondiale (2024). *Climate-Resilient Road Design in Sub-Saharan Africa*.
- ONU-Environnement (2022). *Global Plastic Pollution Outlook*.
- Munanga, A. (2025). *Proposition d'un canevas normatif adapté aux conditions climatiques de la RDC*. Revue Africaine du Génie Civil.

3. Normes et prescriptions techniques

- ASTM D5. *Méthode d'essai standard pour la pénétrabilité des matériaux bitumineux*.
- ASTM D113. *Méthode d'essai standard pour la ductilité de l'asphalte*.
- ASTM D2872. *Méthode RTFOT : vieillissement à court terme du bitume*.
- NF EN 12697-34. *Essai Marshall sur mélange bitumineux à chaud*.
- NF EN 12697-12. *Sensibilité à l'eau des enrobés bitumineux*.
- NF EN 1426 / 1427. *Pénétrabilité et point de ramollissement du bitume*.
- NF EN 933-1. *Analyse granulométrique*.
- NF EN 1097-2. *Essai Los Angeles sur granulats*.
- ISO 14040 (2016). *Analyse du cycle de vie – Principes et cadre*.
- Indian Roads Congress (IRC) (2018). *Guidelines for the Use of Waste Plastic in Hot Bituminous Mixes* (IRC: SP:98-2018).
- IRC (2022). *Advanced Road Construction under Sustainable Development Goals*.

4. Autres sources utiles

- Ministère des Infrastructures, RDC (2024). *Plan stratégique de modernisation du réseau routier national*.
- Université de Kisangani (2025). *Méthodologie d'intégration de matériaux alternatifs dans les infrastructures routières*.