

Étude Et Conception D'un Système De Production Et De Stockage D'énergie Electrique Utilisant La Technologie Piézoélectrique Au Péage De Kenge Dans La Province Du Kongo Central

MAKENGO NKESANI Sonny^{1,2}, LUKUAKA MAKENGELE Guylain¹, LELO TSOBO Ephrem¹,
LUSALA SEKE Victoire¹

¹Institut Supérieur des Techniques Appliquées de Matadi, République Démocratique du Congo.

² Institut Supérieur Pédagogique de Seke-Banza, République Démocratique du Congo.

Auteur Correspondant : MAKENGO NKESANI Sonny, sonnymakengo@gmail.com



Résumé : Cette étude présente la conception et l'analyse d'un système de récupération d'énergie basé sur la technologie piézoélectrique appliquée au péage de Kenge en République Démocratique du Congo. L'infrastructure étudiée, composée de huit voies de circulation (quatre dans chaque sens), constitue une source potentielle d'énergie mécanique générée par le trafic routier. L'approche adoptée combine analyse du site, modélisation physique, dimensionnement du système et étude de la chaîne de conversion énergétique. Les résultats montrent que, bien que le potentiel théorique soit élevé, les performances réelles restent limitées par les contraintes physiques et technologiques. Le système demeure toutefois pertinent comme solution complémentaire d'énergie renouvelable.

Mots-clés : Piézoélectricité, énergie renouvelable, récupération d'énergie, péage, stockage, RDC.

1. Introduction Générale

Dans un contexte mondial marqué par l'augmentation constante de la demande énergétique, l'épuisement progressif des ressources fossiles et les effets du changement climatique, les pays du monde entier sont engagés dans une transition vers des sources d'énergie renouvelables, durables et respectueuses de l'environnement. Cette transition énergétique constitue aujourd'hui un enjeu stratégique majeur, particulièrement pour les pays en développement confrontés à un déficit énergétique chronique et à des difficultés d'accès à l'électricité.

La République Démocratique du Congo possède d'importantes ressources naturelles pouvant contribuer à la production d'énergie renouvelable. Selon Liu et al. (2025), les technologies de récupération d'énergie appliquées aux infrastructures routières constituent une solution prometteuse pour le développement des routes intelligentes et des systèmes énergétiques autonomes. Cependant, malgré ce potentiel, plusieurs régions du pays connaissent encore des insuffisances importantes en matière d'approvisionnement énergétique. Les infrastructures électriques demeurent limitées et les besoins énergétiques augmentent continuellement avec la croissance démographique, l'urbanisation et le développement des activités économiques. Cette situation pousse les chercheurs et les ingénieurs à explorer des solutions alternatives capables de produire de l'énergie à partir de ressources locales encore peu exploitées.

Parmi les technologies émergentes figure la récupération de l'énergie mécanique à l'aide de matériaux piézoélectriques. La technologie piézoélectrique repose sur la capacité de certains matériaux à produire une tension électrique lorsqu'ils sont soumis à une contrainte mécanique telle qu'une pression, une vibration ou une déformation. Cette technologie ouvre de nouvelles perspectives dans le domaine des infrastructures intelligentes, notamment dans les routes, les ponts, les gares et les péages routiers. Le présent travail porte sur l'étude et la conception d'un système de production et de stockage d'énergie électrique utilisant la technologie piézoélectrique appliquée au péage de Kenge dans la province du Kongo Central. Le choix du péage de Kenge se justifie par l'importance du trafic routier observé sur cet axe stratégique reliant plusieurs régions économiques du pays. Le passage régulier des véhicules, particulièrement des poids lourds, génère une quantité importante d'énergie mécanique qui peut être récupérée et transformée en énergie électrique exploitable.

L'objectif principal de cette étude est de concevoir une infrastructure énergétique intelligente capable de convertir les contraintes mécaniques du trafic routier en énergie électrique renouvelable. Cette énergie pourrait être utilisée pour alimenter les équipements du péage tels que l'éclairage public, les systèmes de signalisation, les dispositifs de sécurité, les équipements administratifs et les systèmes de surveillance. L'étude combine plusieurs approches scientifiques et techniques, notamment :

- l'analyse du trafic routier ;
- la modélisation physique des phénomènes piézoélectriques ;
- le dimensionnement énergétique ;
- l'électronique de conditionnement ;
- le stockage énergétique ;
- l'intégration des systèmes intelligents et IoT.

Cette recherche présente également un intérêt pédagogique et scientifique important dans les domaines de la mécatronique, de l'électrotechnique, des systèmes énergétiques intelligents et des infrastructures routières modernes. Elle constitue une contribution potentielle au développement des technologies énergétiques innovantes en République Démocratique du Congo.

Ainsi, cette étude s'inscrit dans une dynamique de développement durable visant à promouvoir des solutions énergétiques locales, écologiques et adaptées aux réalités africaines.

2. Présentation du Site d'Étude



Figure 1: Péage de Kenge

2.1 Situation géographique

Le péage de Kenge est situé dans une zone stratégique de la province du Kongo Central en République Démocratique du Congo. Il se trouve sur un important axe routier reliant Kinshasa, Matadi et plusieurs provinces de l'intérieur du pays. Cette position géographique confère au site une importance économique et logistique considérable dans le transport des marchandises et des personnes. Le péage constitue un point de passage obligatoire pour un grand nombre de véhicules légers et lourds assurant les

échanges commerciaux entre le port de Matadi, la capitale Kinshasa et les autres centres urbains du pays. Cette forte circulation routière représente un potentiel énergétique important dans le cadre de la récupération d'énergie mécanique par technologie piézoélectrique.

La présence de plusieurs voies de circulation au niveau du péage favorise également l'installation de modules piézoélectriques sur une grande surface de chaussée. Cette configuration augmente les possibilités de récupération d'énergie et améliore le rendement global du système.

2.2 Données topographiques

Le site du péage de Kenge est localisé sur une zone relativement stable présentant une topographie faiblement ondulée. L'altitude moyenne du site facilite l'écoulement naturel des eaux de pluie et limite certains risques d'inondation pouvant affecter les infrastructures électriques et électroniques.

Cependant, certaines zones présentent des phénomènes d'érosion liés aux fortes précipitations observées durant la saison des pluies. Ces contraintes environnementales doivent être prises en compte lors de la conception du système piézoélectrique afin d'assurer la protection des équipements installés sous la chaussée. La stabilité topographique du site constitue néanmoins un avantage important pour l'intégration des dalles piézoélectriques et des systèmes de stockage énergétique.

2.3 Géologie locale

Le sous-sol de la région est principalement constitué de formations rocheuses anciennes recouvertes de couches latéritiques et de sols ferrallitiques. Ces sols présentent une résistance mécanique relativement acceptable pour supporter les infrastructures routières lourdes. La composition géologique du site influence directement :

- la stabilité des installations ;
- la résistance des fondations ;
- la capacité de drainage ;
- la durabilité des structures intégrées.

Dans le cadre de cette étude, les caractéristiques géologiques jouent un rôle important dans le choix des matériaux de protection des modules piézoélectriques et dans la conception des couches de support mécanique.

2.4 Climat et hydrologie

Le climat de la région de Kenge est de type tropical humide avec deux principales saisons :

- une saison pluvieuse ;
- une saison sèche.

Les températures sont généralement élevées tout au long de l'année avec des variations importantes de l'humidité relative. Les précipitations abondantes peuvent provoquer des infiltrations d'eau au niveau des infrastructures routières et affecter les performances des systèmes électroniques. Pour cette raison, les modules piézoélectriques doivent être conçus avec :

- des systèmes d'étanchéité ;
- des matériaux anticorrosion ;
- des protections thermiques ;
- des dispositifs de drainage adaptés.

Les conditions climatiques du site imposent donc une conception robuste capable de résister aux variations environnementales et aux contraintes mécaniques répétitives du trafic routier.

3. Analyse du Trafic Routier et du Potentiel Énergétique

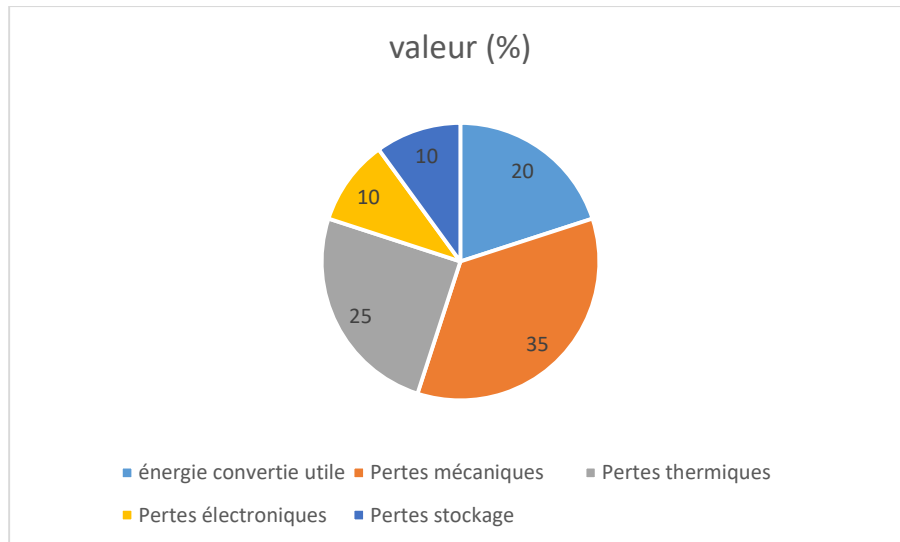


Figure 2: diagramme énergie

3.1 Typologie et volume du trafic

Le péage de Kenge enregistre quotidiennement un trafic routier important composé de plusieurs catégories de véhicules :

- voitures particulières ;
- bus de transport ;
- camions de marchandises ;
- remorques ;
- véhicules administratifs ;
- poids lourds industriels.

Les véhicules lourds représentent une part importante du trafic observé. Cette caractéristique est particulièrement avantageuse pour la technologie piézoélectrique car la quantité d'énergie mécanique récupérable dépend directement de la masse appliquée sur les capteurs. Le trafic journalier moyen est estimé à environ 800 véhicules par jour, avec des variations selon les périodes de l'année, les activités économiques et les horaires de circulation.

3.2 Caractéristiques de la circulation

La circulation au niveau du péage présente certaines particularités favorables à la récupération d'énergie mécanique. Les véhicules sont obligés de ralentir afin d'effectuer les opérations de contrôle et de paiement. Cette faible vitesse augmente la durée de contact entre les pneus et les modules piézoélectriques, ce qui améliore la transmission des contraintes mécaniques. La circulation est également caractérisée par :

- des vibrations répétitives ;

- des charges dynamiques importantes ;
- des pressions verticales élevées ;
- une fréquence régulière de passage.

Ces différents paramètres contribuent à améliorer le potentiel énergétique du système.

3.3 Énergie mécanique estimée

Sur la base des caractéristiques des véhicules et de la fréquence de passage, l'énergie mécanique totale journalière peut être estimée entre 8 et 12 MWh. En tenant compte du rendement des dispositifs piézoélectriques, cela permettrait de récupérer entre 250 et 400 kWh/jour selon la surface installée.

4. Fondements Théoriques de la Technologie Piézoélectrique

4.1 Principe physique

La piézoélectricité est un phénomène physique par lequel certains matériaux cristallins (notamment les céramiques de type PZT zirconate-titanate de plomb) produisent une tension électrique lorsqu'ils sont soumis à une déformation mécanique. Ce principe peut être appliqué dans les chaussées par l'intégration de capteurs sous la surface de la route.

4.2 Matériaux utilisés

Les recherches récentes sur les céramiques piézoélectriques de type PZT montrent une amélioration significative des performances de conversion électromécanique dans les applications routières (Ye et al., 2023). Les matériaux piézoélectriques courants sont :

- le PZT,
- le quartz (moins utilisé pour des raisons économiques),
- les polymères piézoélectriques (PVDF, etc.).

4.3 Intégration structurelle

Les modules sont intégrés dans des plaques rigides ou des dalles modulaires renforcées, installées sous les bandes de roulement les plus fréquentées. Chaque module est relié à un circuit de conversion d'énergie. Des expérimentations réelles menées par Heller et al. (2023) démontrent que l'intégration de capteurs piézoélectriques directement dans les chaussées permet de récupérer efficacement une partie de l'énergie mécanique produite par le trafic routier.

4.4 Rendement énergétique

Le rendement dépend de la masse des véhicules, de la surface impactée et du type de matériau. Des études internationales estiment une génération de 1,5 à 3 kWh/m²/jour. Une installation de 100 m² au péage de Kenge pourrait ainsi générer jusqu'à 300 kWh/jour. Zhang et al. (2024) montrent que la position des capteurs piézoélectriques sous la chaussée influence fortement le rendement énergétique et la quantité d'électricité récupérée sous différentes conditions de trafic.

5. Conception du Système de Stockage et de Distribution

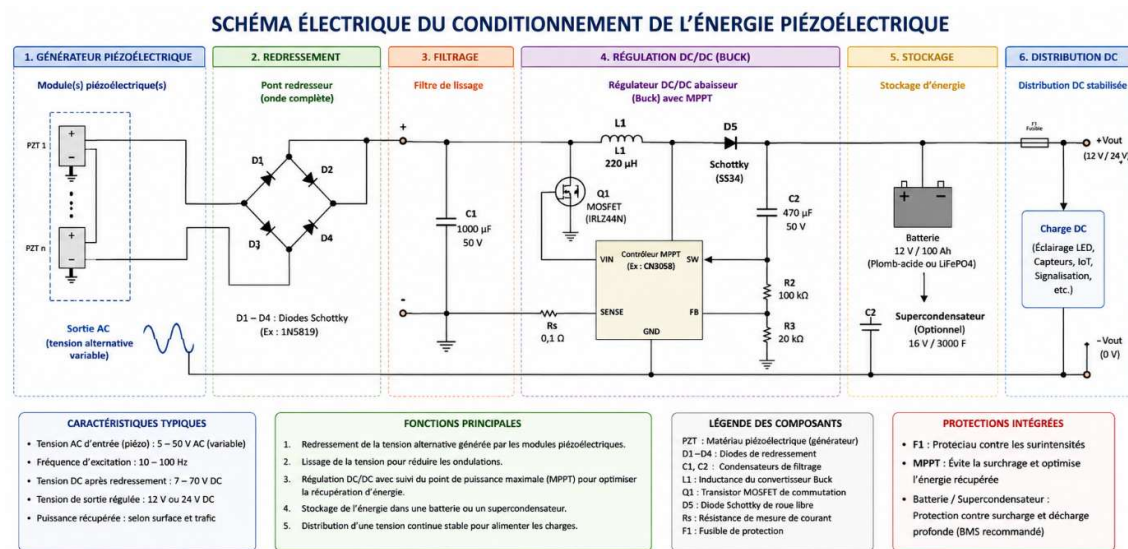


Figure 3 : schéma électrique du conditionnement de l'énergie

5.1 Choix du système de stockage

Les batteries lithium-ion (LiFePO₄ de préférence) sont recommandées pour leur longue durée de vie, leur densité énergétique, et leur sécurité. Un système modulaire permettra l'extension progressive.

5.2 Systèmes de gestion (BMS)

Un système de gestion intelligent contrôlera la charge, la décharge, la température et l'état de santé des batteries, garantissant efficacité et sécurité.

5.3 Distribution locale L'énergie produite alimentera :

- les bâtiments administratifs (bureaux, équipements informatiques, éclairage),
- la signalisation lumineuse et la vidéosurveillance,
- les blocs sanitaires,

- certaines échoppes des commerçants.

6. Principe général du système piézoélectrique

Le principe général du système piézoélectrique repose sur la transformation de l'énergie mécanique produite par les véhicules en énergie électrique exploitable. Cette conversion est rendue possible grâce à l'effet piézoélectrique, phénomène physique observé dans certains matériaux capables de générer une tension électrique lorsqu'ils subissent une pression, une vibration ou une déformation mécanique.

Dans le cadre du péage de Kenge, des modules piézoélectriques sont installés sous la chaussée, principalement au niveau des zones fortement sollicitées par le passage des véhicules. Lorsqu'un véhicule roule sur la surface équipée, son poids exerce une force mécanique sur les capteurs piézoélectriques. Cette contrainte provoque une déformation microscopique des matériaux piézoélectriques, entraînant un déplacement des charges électriques internes et la création d'une différence de potentiel électrique.

L'énergie électrique produite par les capteurs est généralement de faible tension alternative et non stable. Elle ne peut donc pas être utilisée directement. Pour cette raison, le système comporte une chaîne de traitement énergétique comprenant plusieurs étapes :

1. La récupération de l'énergie mécanique

Les vibrations et pressions dues au trafic routier constituent la source d'énergie primaire du système.

2. La conversion piézoélectrique

Les capteurs convertissent l'énergie mécanique en énergie électrique par effet piézoélectrique direct.

3. Le conditionnement électrique

Le courant produit est redressé et stabilisé à l'aide de circuits électroniques comprenant des redresseurs, des filtres et des régulateurs de tension.

4. Le stockage de l'énergie

L'énergie convertie est stockée dans des batteries ou des super condensateurs afin d'assurer une alimentation continue même en l'absence de trafic.

5. La distribution et l'utilisation

L'énergie stockée peut alimenter différents équipements du péage tels que :

- l'éclairage public ;
- les systèmes de signalisation ;
- les caméras de surveillance ;
- les équipements informatiques ;
- les capteurs intelligents et dispositifs IoT.
-

7. Schéma fonctionnel du système

Le fonctionnement du système peut être résumé par la chaîne énergétique suivante:

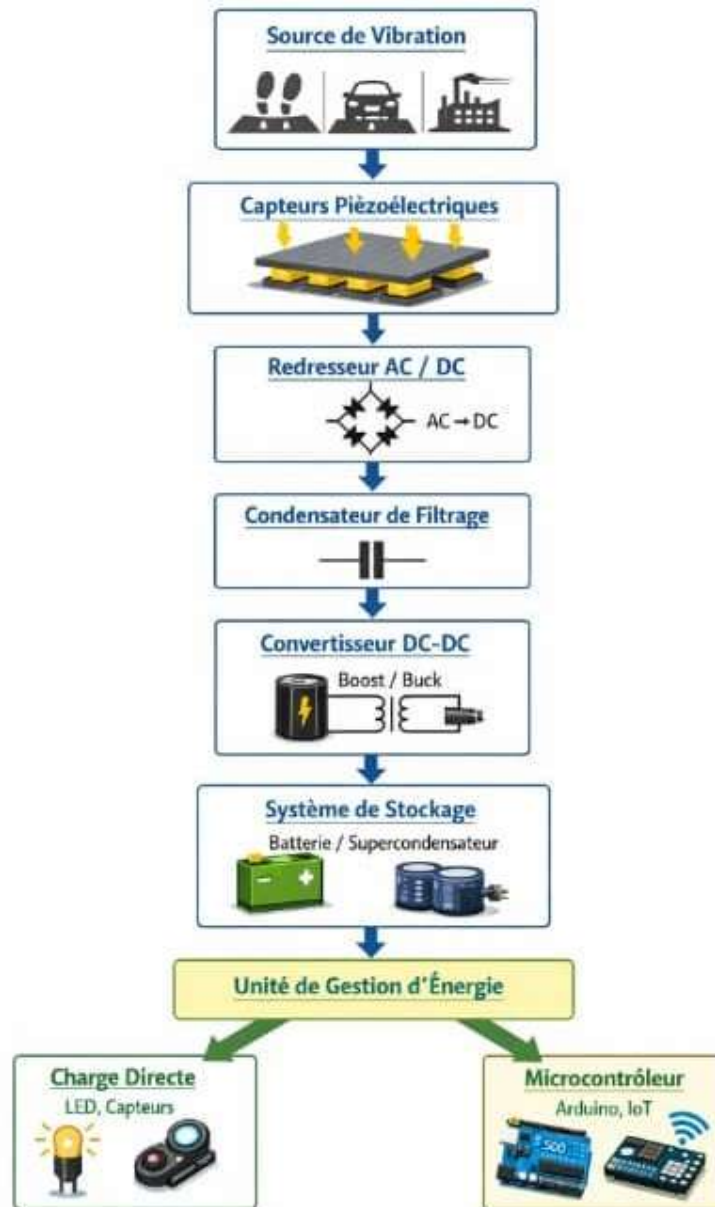


Figure 4: schéma fonctionnel

7.1. Description détaillée des blocs fonctionnels du système piézoélectrique

Le système de production et de stockage d'énergie électrique utilisant la technologie piézoélectrique est constitué de plusieurs blocs fonctionnels interconnectés. Chaque bloc assure une fonction spécifique dans la chaîne de conversion de l'énergie, depuis la récupération des contraintes mécaniques produites par les véhicules jusqu'à l'alimentation des équipements électriques du péage.

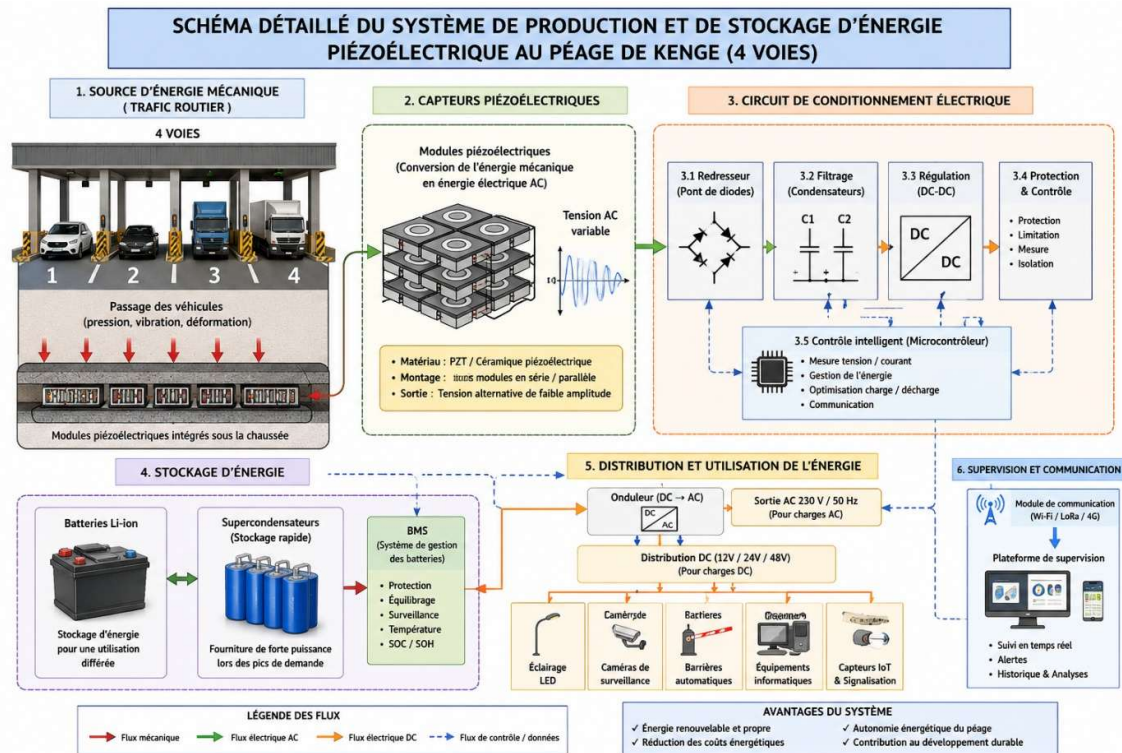


Figure 5: blocs fonctionnels du système piézoélectrique

Le fonctionnement global du système suit la chaîne suivante :

1. Bloc de sollicitation mécanique : Passage des véhicules

Ce bloc constitue la source primaire d'énergie du système. Il correspond au trafic routier circulant sur les voies du péage. Lorsque les véhicules traversent la chaussée équipée :

- leur poids exerce une pression verticale sur la surface ;
- les pneus génèrent des vibrations et des microdéformations ;
- les charges dynamiques créent des contraintes mécaniques répétitives.

Ces efforts mécaniques représentent une énergie mécanique récupérable. Les véhicules lourds (camions, remorques, bus) sont particulièrement intéressants car :

- leur masse est élevée ;
- la force appliquée sur les capteurs est importante ;
- les déformations produites sont plus grandes.

La force exercée par un véhicule est donnée par :

$$F = m \times g$$

Où :

- F est la force appliquée ;
- m la masse du véhicule ;
- g l'accélération de la pesanteur.

Au niveau du péage de Kenge, la faible vitesse des véhicules favorise une meilleure transmission des contraintes mécaniques aux modules piézoélectriques.

2. Bloc des modules piézoélectriques

Ce bloc représente le cœur du système énergétique. Les modules piézoélectriques sont installés sous la chaussée ou dans des dalles spéciales renforcées. Ils sont constitués de matériaux capables de produire de l'électricité lorsqu'ils subissent une compression mécanique. Les matériaux utilisés peuvent être :

- le PZT (zirconate-titanate de plomb) ;
- le quartz ;
- les polymères piézoélectriques comme le PVDF.

2.1. Fonctionnement du module

Lorsqu'un véhicule passe :

1. la pression déforme le matériau piézoélectrique ;
2. les charges électriques internes se déplacent ;
3. une tension électrique apparaît aux bornes du capteur.

Le phénomène repose sur l'effet piézoélectrique direct. La tension produite dépend :

- de la force appliquée ;
- de la fréquence des vibrations ;
- des propriétés du matériau ;
- de la surface active du capteur.

Les modules sont généralement assemblés :

- en série pour augmenter la tension ;
- en parallèle pour augmenter le courant.

2.2. Structure physique

Chaque module comprend :

- une couche piézoélectrique ;
- des électrodes conductrices ;
- une structure métallique de protection ;
- une couche d'isolation ;
- un boîtier mécanique résistant aux charges routières.

Les modules doivent résister :

- aux fortes pressions ;
- aux vibrations répétitives ;
- à l'humidité ;
- aux variations thermiques.

3. Bloc de conditionnement électrique

Les travaux de Yue et al. (2024) montrent que l'utilisation de circuits intelligents de redressement et de suivi du point de puissance maximale (MPPT) permet d'améliorer considérablement le rendement des systèmes piézoélectriques. L'énergie produite par les capteurs piézoélectriques n'est pas directement utilisable. Elle est :

- alternative ;
- instable ;
- de faible intensité ;
- variable selon le trafic.

Le rôle du circuit de conditionnement est donc d'adapter cette énergie. Ce bloc comprend plusieurs sous-ensembles électroniques.

3.1 Redresseur

Le redresseur transforme le courant alternatif produit par les capteurs en courant continu. Les composants utilisés sont généralement:

- des diodes ;
- des ponts de Graetz ;
- des redresseurs synchrones.

Le redressement est indispensable pour permettre le stockage dans les batteries.

3.2 Filtrage

Après redressement, la tension contient des ondulations et des parasites. Des condensateurs sont utilisés pour :

- lisser la tension ;
- réduire les fluctuations ;
- stabiliser le signal électrique.

Le filtrage améliore la qualité de l'énergie récupérée.

3.3 Régulation de tension

La tension produite varie constamment selon :

- le poids des véhicules ;
- la vitesse ;
- la fréquence du trafic.

Le régulateur :

- maintient une tension stable ;
- protège les batteries ;
- évite les surtensions.

Des convertisseurs courant continu en courant continu (DC-DC) peuvent être utilisés pour :

- augmenter la tension (boost converter) ;
- diminuer la tension (buck converter).

4. Bloc de stockage d'énergie

Le stockage permet de conserver l'énergie produite afin de l'utiliser même lorsque le trafic est faible ou absent.

4.1. Types de stockage possibles

4.1.1. Batteries lithium-ion

Elles sont les plus recommandées grâce à :

- leur forte densité énergétique ;
- leur longue durée de vie ;
- leur rendement élevé ;
- leur faible maintenance.

4.1.2. Super condensateurs

Ils permettent :

- une charge rapide ;
- une forte puissance instantanée ;
- une bonne résistance aux cycles répétés.

Ils peuvent être associés aux batteries dans un système hybride.

4.1.3. Système de gestion des batteries (BMS)

Le BMS contrôle :

- la charge ;
- la décharge ;
- la température ;
- l'équilibrage des cellules.

Il protège les batteries contre :

- les surcharges ;
- les décharges profondes ;
- les courts-circuits.

5. Bloc de distribution électrique

Ce bloc assure l'alimentation des équipements électriques du péage. L'énergie stockée peut être utilisée pour :

- l'éclairage public ;
- les lampadaires LED ;
- les caméras de surveillance ;
- les barrières automatiques ;
- les équipements informatiques ;
- les capteurs IoT ;
- les systèmes de communication ;
- les panneaux de signalisation.

5.1. Distribution en courant continu ou alternatif

Le système peut fonctionner :

- en courant continu (DC) pour les équipements électroniques ;
- en courant alternatif (AC) grâce à un onduleur.

L'onduleur convertit le courant continu (DC) en courant alternatif (AC) afin d'alimenter des équipements classiques en 220 V.

6. Bloc de supervision et de communication

Les infrastructures intelligentes autoalimentées utilisant des technologies de récupération d'énergie et des capteurs connectés ouvrent la voie au développement des routes intelligentes autonomes (Birgin et al., 2023).

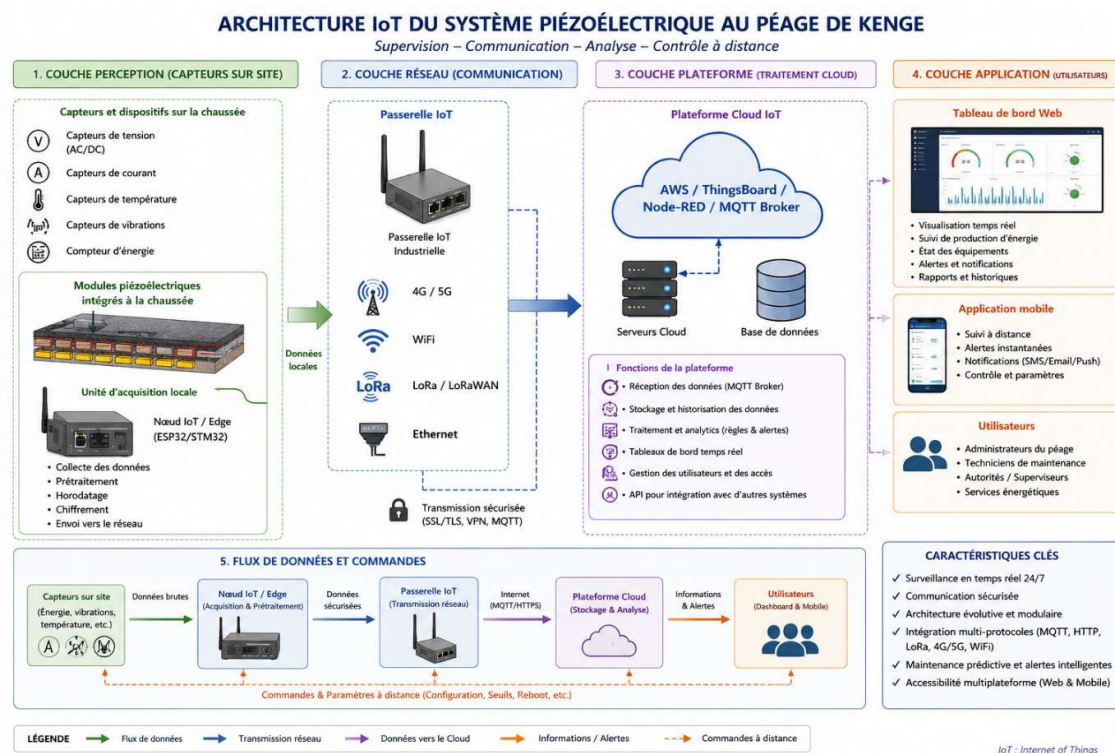


Figure 6: Architecture du système piézoélectrique

Dans une version avancée, le système peut intégrer :

- des capteurs intelligents ;
- des modules de communication ;
- une plateforme de surveillance à distance.

Les technologies possibles sont :

- Wi-Fi ;
- LoRa ;
- GSM/4G ;
- Internet des Objets (IoT).

Ce bloc permet :

- la surveillance en temps réel ;
- l'analyse des performances ;
- la maintenance préventive ;
- l'optimisation énergétique.

L'ensemble des blocs fonctionnels forme une chaîne énergétique intelligente capable de convertir les contraintes mécaniques du trafic routier en énergie électrique utilisable. Le bon fonctionnement du système dépend :

- de la qualité des capteurs piézoélectriques ;
- du rendement du conditionnement électronique ;
- de l'efficacité du stockage ;
- de la gestion intelligente de l'énergie.

Cette architecture permet de développer une infrastructure routière autonome, intelligente et durable adaptée aux besoins énergétiques locaux du péage de Kenge.

8. Modélisation du rendement global du système piézoélectrique

1. Puissance mécanique appliquée

La puissance mécanique générée par le passage des véhicules peut être exprimée comme :

$$P_{mec} = F \cdot v$$

- F : force exercée par le véhicule (N)
- v : vitesse du véhicule (m/s)

Dans notre du péage la vitesse est faible mais la force élevée (poids lourds) donc énergie récupérable intéressante.

2. Énergie mécanique récupérable

Sur une durée donnée :

$$E_{mec} = P_{mec} \cdot t$$

Cette expression mathématique représente l'énergie disponible avant conversion. L'énergie électrique récupérée après conversion dépend du rendement du système piézoélectrique :

$$E_{elec} = \eta \cdot E_{méc}$$

Où :

- E_{elec} est l'énergie électrique produite ;
- $E_{méc}$ est l'énergie mécanique disponible ;
- η le rendement global du système.

Ainsi, le système piézoélectrique constitue une technologie innovante de récupération d'énergie capable de valoriser les contraintes mécaniques du trafic routier afin de produire une énergie renouvelable locale et durable.

3. Conversion piézoélectrique

Le capteur ne convertit qu'une partie de cette énergie :

$$E_{elec} = \eta_{piezo} \cdot E_{mec}$$

9. Comparaison de la Technologie Piézoélectrique avec d'Autres Technologies Énergétiques

Dans le domaine des énergies renouvelables et des infrastructures intelligentes, plusieurs technologies peuvent être utilisées pour produire de l'électricité à partir des ressources disponibles localement. Chaque technologie possède des avantages, des limites et

des conditions spécifiques d'exploitation. Afin d'évaluer la pertinence du système piézoélectrique proposé pour le péage de Kenge, il est important de comparer cette technologie avec d'autres solutions énergétiques couramment utilisées, notamment :

- l'énergie solaire photovoltaïque ;
- l'énergie éolienne ;
- les groupes électrogènes ;
- les systèmes hybrides renouvelables.

Cette comparaison permet de mieux comprendre les performances, les contraintes et les perspectives d'intégration du système piézoélectrique dans le contexte des infrastructures routières de la République Démocratique du Congo.

9.1. Comparaison avec l'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque constitue aujourd'hui l'une des technologies renouvelables les plus utilisées dans le monde. Elle repose sur la conversion directe du rayonnement solaire en énergie électrique grâce aux cellules photovoltaïques. Le principal avantage des panneaux solaires réside dans leur forte maturité technologique, leur rendement relativement stable et leur faible impact environnemental. Dans les régions tropicales comme la RDC, l'ensoleillement important représente un potentiel énergétique considérable. Cependant, les systèmes photovoltaïques présentent certaines limites importantes :

- la production dépend fortement de l'ensoleillement ;
- les performances diminuent durant les saisons pluvieuses ;
- la production est nulle pendant la nuit ;
- les panneaux nécessitent de grandes surfaces d'installation.

Contrairement au solaire, la technologie piézoélectrique exploite directement l'énergie mécanique produite par le trafic routier. Cette énergie peut être générée aussi bien de jour que de nuit tant que les véhicules circulent sur la chaussée. Le système piézoélectrique présente également l'avantage d'utiliser une infrastructure déjà existante, notamment les routes et les péages, sans nécessiter de vastes surfaces supplémentaires.

Néanmoins, le rendement énergétique de la piézoélectricité reste actuellement inférieur à celui des systèmes photovoltaïques industriels. Pour cette raison, une combinaison entre les deux technologies apparaît particulièrement intéressante dans le cadre des systèmes hybrides intelligents.

9.2. Comparaison avec l'énergie éolienne

L'énergie éolienne utilise la force du vent pour produire de l'électricité grâce à des turbines aérodynamiques. Cette technologie offre une bonne capacité de production dans les zones fortement exposées aux vents réguliers. Les éoliennes présentent plusieurs avantages :

- production énergétique élevée ;
- énergie propre et renouvelable ;
- réduction des émissions polluantes ;
- faible coût d'exploitation après installation.

Cependant, leur efficacité dépend fortement des conditions climatiques locales. Dans certaines régions de la RDC, la vitesse du vent reste insuffisante pour garantir une production stable et rentable. De plus, les installations éoliennes nécessitent :

- des espaces ouverts importants ;

- des mâts de grande hauteur ;
- des infrastructures de maintenance spécialisées.

À l'inverse, la technologie piézoélectrique peut être directement intégrée dans les infrastructures routières existantes sans modifier significativement l'environnement urbain ou routier. La piézoélectricité présente également l'avantage d'être moins dépendante des conditions météorologiques. Son fonctionnement dépend principalement du trafic routier et des contraintes mécaniques appliquées aux capteurs.

Toutefois, la puissance produite par les systèmes piézoélectriques demeure généralement plus faible que celle des installations éoliennes de grande capacité.

9.3. Comparaison avec les groupes électrogènes

Les groupes électrogènes sont largement utilisés en République Démocratique du Congo pour compenser les insuffisances du réseau électrique. Ils fonctionnent principalement à base de carburants fossiles tels que le diesel ou l'essence. Leur principal avantage réside dans leur capacité à fournir rapidement une puissance importante et stable. Ils sont également faciles à installer dans les zones non raccordées au réseau national. Cependant, cette technologie présente de nombreuses limites :

- consommation importante de carburant ;
- coût élevé d'exploitation ;
- émissions importantes de CO₂ ;
- pollution sonore ;
- maintenance fréquente ;
- dépendance aux produits pétroliers.

Contrairement aux groupes électrogènes, le système piézoélectrique produit une énergie renouvelable, propre et silencieuse. Il permet également de valoriser une énergie mécanique généralement perdue dans les infrastructures routières. La technologie piézoélectrique contribue ainsi à :

- réduire la dépendance aux carburants fossiles ;
- diminuer les émissions polluantes ;
- promouvoir le développement durable ;
- améliorer l'autonomie énergétique locale.

Toutefois, les groupes électrogènes conservent actuellement une capacité de production plus importante et restent nécessaires comme source de secours dans les systèmes hybrides.

9.4 Comparaison avec les systèmes hybrides renouvelables

Les systèmes hybrides combinent plusieurs sources d'énergie renouvelable afin d'améliorer la stabilité, le rendement et l'autonomie énergétique. Dans le cadre du péage de Kenge, l'intégration :

- de la piézoélectricité ;
- des panneaux solaires ;
- du stockage intelligent ;
- et éventuellement de petites éoliennes,

Les systèmes hybrides présentent plusieurs avantages :

- meilleure continuité énergétique ;
- optimisation du rendement global ;
- réduction des pertes ;
- amélioration du stockage ;
- adaptation aux variations climatiques et du trafic.

La technologie piézoélectrique peut jouer un rôle complémentaire très intéressant dans ce type d'architecture énergétique, notamment pendant :

- les périodes nocturnes ;
- les heures de trafic intense ;
- les périodes de faible production solaire.

L'intégration des systèmes intelligents de supervision et de gestion énergétique permet également d'optimiser automatiquement la distribution de l'énergie selon les besoins du site.

10. Dimensionnement du système piézoélectrique du péage de Kenge

10.1. Données de base recueillies sur le site

- Nombre total de véhicules : $N = 800$ véhicules/jour
- Nombre de voies : $n = 4$ voies
- Passage moyen par voie :

$$\frac{800}{4} = 200 \text{ véhicules/jour /voie}$$

- Masse moyenne d'un véhicule : $m = 15\,000$ kg (mix léger et poids lourds)
- Accélération de la pesanteur : $g = 9,81$ m/s²
- Vitesse moyenne au péage : $V \approx 30$ km/h = 8,33 m/s

10.2. Calcul de la force exercée par un véhicule

La force verticale exercée sur les capteurs correspond au poids du véhicule :

$$F = m \times g$$

Application numérique : $F = 15\,000 \times 9,81$

$$F = 147\,150 \text{ N}$$

Chaque véhicule exerce donc environ : $F \approx 147$ kN

10.3. Puissance mécanique générée

La puissance mécanique appliquée sur les modules piézoélectriques est donnée par :

$$P = F \times v$$

Application : $P = 147\,150 \times 8,33$

$$P \approx 1\,225\,759\text{ W}$$

$$P \approx 1,23\text{ MW}$$

Cette valeur représente la puissance mécanique instantanée transmise lors du passage d'un véhicule.

10.4. Énergie mécanique récupérable par véhicule

L'énergie mécanique dépend de la durée de sollicitation des capteurs. Nous supposons :

- temps moyen de contact : $t = 0,5\text{ s}$

L'énergie mécanique devient : $E = P \times t$

Application : $E = 1\,225\,759 \times 0,5$

$$E \approx 612\,879\text{ J}$$

Soit : $E \approx 613\text{ kJ}$ par véhicule

10.5. Énergie mécanique journalière totale

Avec :

$$N = 800\text{ véhicules/jour}$$

On obtient :

$$E_{\text{totale}} = 612879 * 800$$

$$E_{\text{totale}} = 490303200\text{ j/jour}$$

Conversion en kWh :

$$1\text{ kwh} = 3,6 * 10^6\text{ j}$$

Donc :

$$E_{\text{totale}} = \frac{490303200}{3,6 * 10^6}$$

$$E_{\text{totale}} \approx 136,2\text{ kwh/jour}$$

10.6. Énergie électrique réellement récupérable

Les systèmes piézoélectriques possèdent un rendement relativement faible. Nous supposons que :

- rendement global :

$$\eta = 20\% = 0,2$$

L'énergie électrique récupérable est :

$$E_{\text{elec}} = \eta * E_{\text{mec}}$$

Application :

$$E_{\text{elec}} = 0,2 * 136,2$$

$$E_{\text{elec}} \approx 27,24\text{ kwh/jour}$$

10.7. Analyse technique des résultats

Avec 4 voies, le potentiel énergétique reste intéressant mais plus faible que l'estimation précédente basée sur 4 voies. Une production moyenne d'environ 27 kWh/jour peut néanmoins permettre :

- l'alimentation de l'éclairage du péage ;
- le fonctionnement des caméras de surveillance ;
- l'alimentation des capteurs intelligents ;
- la recharge de batteries de secours ;
- l'alimentation partielle des équipements administratifs.

L'intégration d'un système hybride combinant :

- piézoélectricité,
- panneaux solaires photovoltaïques,
- stockage intelligent,

Le système hybride nous permettrait d'améliorer considérablement l'autonomie énergétique du site.

11. Estimation de la Demande Énergétique du Site

11.1. Consommation des bâtiments

Les bureaux consomment principalement pour la climatisation, l'éclairage, et les équipements informatiques. Estimation : 80 à 120 kWh/jour.

11.2. Charges secondaires

Les blocs sanitaires (pompes, éclairages), les caméras, les dispositifs de sécurité, les commerces locaux contribuent également à la demande.

11.3. Équilibre production/consommation

Avec une capacité de 300 kWh/jour, la production excède la demande immédiate, ce qui permet une autonomie complète, voire une revente éventuelle du surplus via un micro-réseau local.

12. Contraintes Techniques et Solutions Proposées

12.1. Contraintes environnementales

- Érosion : nécessite des caniveaux bétonnés et des systèmes de drainage.
- Ruissellement : mise en place de bassins de rétention.
- Température élevée : nécessite des matériaux résistants à la chaleur.

12.2. Contraintes techniques

Les études expérimentales de Ni et al. (2024) montrent que les charges dynamiques verticales et horizontales des véhicules influencent directement la stabilité de la production électrique des capteurs piézoélectriques routiers.

- Durabilité des capteurs : cycles thermiques, vibrations, impacts.
- Maintenance régulière : surveillance et remplacement des modules défectueux.

12.3. Solutions d'adaptation

- Choix de matériaux robustes.
- Modules facilement remplaçables.
- Formation du personnel local à la maintenance.

13. Analyse Économique et Perspectives de Déploiement

13.1. Coût d'investissement initial

- Modules piézoélectriques : 30 000 à 40 000 USD
- Système de stockage : 20 000 à 30 000 USD
- Infrastructure (câblage, BMS, installation) : 30 000 à 50 000 USD
- Total : environ 80 000 à 120 000 USD pour un prototype de 100 m².

13.2. Bénéfices à court et moyen terme

- Réduction des coûts d'énergie.
- Amélioration de la fiabilité électrique locale.
- 3 Création d'emplois pour la gestion du système.

13.3. Perspectives d'extension

Les systèmes hybrides combinant la piézoélectricité et les technologies photovoltaïques représentent actuellement l'une des solutions les plus prometteuses pour améliorer l'autonomie énergétique des infrastructures routières intelligentes (Randriantsoa et al., 2023).

- Réplication sur d'autres péages et axes à fort trafic en RDC.
- Intégration avec panneaux solaires pour un système hybride.
- Connexion à un micro-réseau communautaire.

13.4. Impact environnemental et développement durable

L'exploitation de l'énergie piézoélectrique présente un impact environnemental relativement faible comparé aux sources d'énergie fossiles. Les bénéfices environnementaux incluent :

- la réduction des émissions de CO₂ ;
- la valorisation d'une énergie perdue ;
- la diminution de la dépendance aux groupes électrogènes ;
- la promotion des énergies renouvelables.

Le système s'inscrit pleinement dans les objectifs du développement durable, notamment :

- l'accès à une énergie propre ;
- l'innovation industrielle ;
- les infrastructures durables ;

- la lutte contre le changement climatique.

14. Conclusion Générale

Cette étude a permis de concevoir et d'analyser un système de production et de stockage d'énergie électrique utilisant la technologie piézoélectrique appliquée au péage de Kenge dans la province du Kongo Central. Le travail s'est appuyé sur une approche multidisciplinaire intégrant la physique appliquée, l'électronique de puissance, les systèmes énergétiques et les technologies intelligentes. L'analyse du site a montré que le péage de Kenge possède des caractéristiques favorables à l'exploitation de l'énergie mécanique générée par le trafic routier. Le passage régulier des véhicules, notamment des poids lourds, constitue une source importante de contraintes mécaniques pouvant être converties en énergie électrique grâce aux matériaux piézoélectriques.

L'étude a également permis de comprendre le fonctionnement général du système, depuis la récupération des efforts mécaniques jusqu'au stockage et à la distribution de l'énergie produite. Les différents blocs fonctionnels étudiés capteurs piézoélectriques, circuits de conditionnement, stockage énergétique et systèmes de distribution démontrent la faisabilité technique de cette technologie dans le contexte des infrastructures routières congolaises. Les calculs de dimensionnement ont montré qu'avec quatre voies de circulation et un trafic moyen d'environ 800 véhicules par jour, le système peut produire une quantité d'énergie exploitable pour alimenter plusieurs équipements du péage, notamment :

- l'éclairage public ;
- les systèmes de sécurité ;
- les équipements administratifs ;
- les dispositifs de signalisation ;
- les capteurs intelligents.

Même si le rendement énergétique actuel des systèmes piézoélectriques demeure limité par certaines contraintes technologiques, les perspectives d'amélioration sont très prometteuses. Les avancées dans les domaines :

- des matériaux intelligents ;
- de l'intelligence artificielle ;
- de l'Internet des Objets ;
- du stockage énergétique ;
- des systèmes hybrides renouvelables

Ce projet représente également une opportunité importante pour la République Démocratique du Congo en matière :

- d'innovation technologique ;
- de développement durable ;
- d'autonomie énergétique ;
- de modernisation des infrastructures routières ;
- de formation scientifique et technique.

En outre, l'intégration de cette technologie dans les infrastructures nationales pourrait contribuer à la valorisation des ressources locales et à la réduction du déficit énergétique qui affecte plusieurs régions du pays.

Ainsi, le système piézoélectrique appliqué au péage de Kenge apparaît comme une solution énergétique innovante, écologique et durable, capable de transformer les infrastructures routières classiques en véritables plateformes intelligentes de production d'énergie renouvelable.

Référence :

- [1]. Ndiaye, A., Diouf, M., & Fall, B. (2020). *Technologies d'énergie renouvelable en Afrique de l'Ouest*. Revue Énergie & Environnement.
- [2]. Kabuya, M. (2018). *État des infrastructures routières en RDC*. Mémoire de master, Université de Kinshasa.
- [3]. World Bank. (2022). *Road Transport and Infrastructure Assessment in Sub-Saharan Africa*. Washington D.C.
- [4]. Jaffrezic-Renault, N. (2017). *Capteurs piézoélectriques et récupération d'énergie mécanique*. Techniques de l'Ingénieur.
- [5]. SolarGIS & NASA POWER Data. (2023). *Climat et irradiation solaire en RDC*. <https://solargis.com/maps-and-gis>
- [6]. IEEE Smart Road Systems. (2021). *Piezoelectric Energy Harvesting for Smart Transportation*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems.
- [7]. ONU-Habitat. (2019). *Développement urbain durable en Afrique centrale*. Nairobi.
- [8]. Agency for International Development (USAID). (2020). *Renewable Energy Feasibility Studies in Developing Countries*.
- [9]. Ministère des Infrastructures, RDC. (2021). *Rapport technique sur l'état des routes nationales en RDC*.
- [10]. Kumar, S. et al. (2016). *Piezoelectric materials and energy harvesting: a comprehensive review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 58, 692-712.
- [11]. Liu, J., Li, X., & Wang, H. (2025). Using piezoelectric technology to harvest energy from pavement: A review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*.
- [12]. Heller, L. F., Brito, L. A. T., Coelho, M. A. J., et al. (2023). Development of a Pavement-Embedded Piezoelectric Harvester in a Real Traffic Environment. *Sensors*, 23(9), 4238.
- [13]. Zhang, Y., Lai, Q., Zhang, H., et al. (2024). Optimal lateral embedded position of piezoelectric energy harvesters under various traffic conditions. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*.
- [14]. Ye, J., Ding, G., Wu, X., et al. (2023). Development and performance research of PSN-PZT piezoelectric ceramics based on road vibration energy harvesting technology. *Materials Today Communications*.
- [15]. Yue, X., Javvaji, S., Tang, Z., et al. (2024). A Bias-Flip Rectifier With Duty-Cycle-Based MPPT for Piezoelectric Energy Harvesting. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*.
- [16]. Randriantsoa, A. N. A., Fakra, D. A. H., Rakotondrajaona, L., et al. (2023). Recent advances in hybrid energy harvesting technologies using roadway pavements. *International Journal of Pavement Research and Technology*.
- [17]. Ni, J., Wang, H., Song, X., et al. (2024). Road Piezoelectric Power Output Model and Experimental Study under Bidirectional Vehicle Load Excitation. *Transportation Research Record*.
- [18]. Birgin, H. B., García-Macías, E., D'Alessandro, A., & Ubertaini, F. (2023). Self-powered weigh-in-motion system combining vibration energy harvesting and self-sensing composite pavements. *Construction and Building Materials*.

Biographie :



Sonny Makengo Nkesani, Ingénieur-chercheur et Enseignant dans l'enseignement supérieur. Spécialisé en Physique et Techniques Appliquées, orientation Électronique, ma première mission est de contribuer à la recherche appliquée tout en formant des ingénieurs compétents. Je travaille à faire le lien entre la recherche fondamentale et les solutions technologiques concrètes.