

Remplacement d'une ligne électrique caténaire de câble en cuivre par celle utilisant le câble en aluminium: Cas de la ligne caténaire de la Société Nationale des Chemins de fers du Congo (SNCC)

[Replacement of a copper cable catenary power line with one using aluminum cable: Cas de la ligne caténaire de la Société Nationale des Chemins de fers du Congo (SNCC)]

Tshambula Miji Fota Grégoire¹, Kabulo Mutamba Timothée², and Tshipi Chen Kam'Hono Idephonse³

¹Département d'Electricité et Electromécanique, Institut Supérieur de Techniques Appliquées de Kolwezi, RD Congo

²Département d'Electronique, Institut Supérieur de Techniques Appliquées de Kolwezi, RD Congo

³Département d'Electricité et Electromécanique, Institut Supérieur de Techniques Appliquées de Kolwezi, RD Congo

Copyright © 2023 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: In a country with a limited road network, the country has only 5,033 km of non-interconnected railways that do not have the same standards. Only 858 km of rails were electrified and served the mining region south of Katanga. The rail infrastructure of the Democratic Republic of Congo (DRC) has a vital role. At a time when preserving the environment and reducing greenhouse gas emissions are major concerns, electric locomotives are emerging as an efficient and environmentally friendly option compared to other modes of transportation by offering higher efficiency.

KEYWORDS: Catenary, Copper, Aluminum, Power line.

RESUME: Dans un pays doté d'un réseau routier limité, le pays ne dispose que de 5 033 km de voies ferrées non interconnectées et n'ayant pas les mêmes standards. Seulement 858 km de voies étaient électrifiées et desservait la région minière au sud du Katanga. L'infrastructure ferroviaire de la République démocratique du Congo (RDC) joue un rôle essentiel. À une époque où la préservation de l'environnement et la réduction des émissions de gaz à effet de serre sont des préoccupations majeures, les locomotives électriques apparaissent comme une option efficace et respectueuse de l'environnement par rapport aux autres modes de transport en offrant un rendement plus élevé.

MOTS-CLEFS: Caténaire, Cuivre, Aluminium, Ligne électrique.

1 INTRODUCTION

La RDC, pays de 2,3 millions de km² ne compte que très peu de routes praticables. Elle ne dispose que de 5 033 km de voies ferrées non interconnectées et n'ayant pas les mêmes standards. Seulement 858 km de voies étaient électrifiées et desservait la région minière au sud du Katanga. Avec le besoin mondial du cuivre, toute la ligne caténaire a été vidée de ses câbles en cuivre par les inciviques. 1 026 km de voies à un écartement de 0,6 m desservent la région agricole et aurifère du nord-est de la RDC, le tronçon Kisangani – Ubundu a un écartement de 1,00 m tandis que tout le reste du réseau a un écartement de 1,067 m. Etant donné qu'actuellement la RDC fait face au défi de manque d'infrastructures routières, le transport ferroviaire existant devrait être d'un grand secours pour palier à cette difficulté. Vu l'empressement de tous les pays à vouloir se détourner de

l'usage des carburants, pour la préservation la nature et éviter le réchauffement climatique, les locomotives électriques répondent parfaitement à cette exigence. Actuellement la SNCC (Société Nationale des chemins de fer du Congo) est confrontée à un problème très sérieux du côté des locomotives électriques, qui est celui de vol des câbles en cuivre. C'est la cause pour laquelle les locomotives électriques ne fonctionnent presque pas en RDC. Ainsi, nous nous proposons de remplacer les câbles en cuivre (trop convoité) par les câbles en aluminium (presque pas convoité).

Par la même occasion, nous voulons redynamiser le transport par voie ferrée, protéger les infrastructures routières existantes, diminuer les embouteillages que créent la circulation intense des longs camions qui transportent les minerais, diminuer le taux de mortalité causée par les accidents de ces camions, lutter contre le réchauffement climatique, et accroître la rentabilité de la SNCC compte tenu du rendement de la locomotive électrique par rapport aux autres moyens de locomotion.

Cette étude se concentre spécifiquement sur le passage des lignes caténaires utilisées dans les systèmes ferroviaires aux électriques des câbles en cuivre conventionnels aux câbles en aluminium. Afin d'évaluer la viabilité du câble en aluminium et ses avantages par rapport au câble en cuivre, nous nous concentrons sur les caractéristiques électriques, mécaniques et économiques du câble en aluminium, notamment celles de l'almélec. L'analyse comparative complète de cet article met en évidence à la fois les défis et les avantages potentiels de cette transformation.

2 PREFERENCE D'UN CÂBLE PAR RAPPORT A UN AUTRE

Un certain nombre d'éléments peuvent inciter les chercheurs et les décideurs à choisir des câbles en aluminium plutôt que des câbles en cuivre pour les lignes caténaires. Voici quelques idées basées sur les données auxquelles réfléchir: *La conductivité, les propriétés électriques, la section, les propriétés mécaniques des matériaux, module d'élasticité, coefficient de la dilatation, masse volumique, contrainte à la rupture (contrainte mécanique), les propriétés thermiques, capacité calorifique volumique, conductivité thermique, point de fusion, résistance thermique, le prix du conducteur électrique.*

2.1 CONDUCTIVITÉ

Du point de vue conductivité, l'aluminium occupe la quatrième place après le cuivre ¹. L'excellente conductivité électrique des câbles en aluminium permet de transmettre efficacement l'énergie électrique à travers les fils caténaires ². L'aluminium a une conductivité qui, même si elle n'est pas aussi élevée que celle du cuivre, est suffisante pour répondre aux besoins de la majorité des systèmes ferroviaires électrifiés ². Et du point de vue prix, l'aluminium est plus de trois fois moins cher que le cuivre tel que représente dans le tableau ci-dessus ³.

Matériau	Résistivité x 10 ⁻⁸ Ω.m	Matériau	Résistivité x 10 ⁻⁸ Ω.m	Métal	Prix
argent	1,6	platine	10	Acier	0,629 €/kg
cuiivre	1,7	fer	10	Inox	2,249 €/kg
or	2,4	silicium	10	Aluminium	1,658 €/kg
aluminium	2,7	étain	18	Or	41,4 €/g
magnésium	4,6	plomb	21	Argent	0,5 €/g
tungstène	5,6	germanium	46	Cuivre	5,607 €/kg
zinc	6	constantan	49	Fer	0,079 €/kg
nickel	7	mercure	96	Plomb	1,836 €/kg
laiton	7	nichrome	100	Zinc	2,409 €/kg
cadmium	7,6	carbone	3500		

Fig. 1. Comparaison des prix entre l'aluminium et le cuivre

2.2 COMPARAISON ENTRE LE CUIVRE – ALUMINIUM

2.2.1 LES PROPRIÉTÉS ÉLECTRIQUES

LA SECTION

La ligne caténaire qu'utilise la SNCC a une section de 108mm² en cuivre pour le fil de contact, ayant une résistivité électrique de 1.7*10⁻⁸Ωm. Pour calculer la section de l'aluminium qui doit remplacer le cuivre, nous procédons de la manière suivante:

Sachant que la résistivité de l'aluminium est 2.7*10⁻⁸ Ωm.

Le rapport de la résistivité de l'aluminium par la résistivité du cuivre vaut:

$$\frac{2.7*10^{-8}}{1.7*10^{-8}} = \frac{2.7}{1.7} = 1.6$$

La section de l'aluminium sera alors trouvée en multipliant la section du cuivre par le coefficient calculé ci-haut: S=1.6*108=172.8mm²

Pour le câble porteur, la section qu'utilise la SNCC est de 84 mm². Ainsi pour trouver la section d'aluminium, il suffit de prendre le coefficient déterminé ci-dessus qui est de 1.6 multiplier par la section du cuivre.

$$S=1.6*84=134.4\text{mm}^2.$$

Les sections normalisées sont:

- Pour le fils de contact c'est 185mm².
- Pour le câble porteur c'est 150mm².

2.2.2 CALCUL DE RÉSISTANCE POUR LE CONDUCTEUR EN CUIVRE

Sachant que: l=1km, s=178.2 mm², ρ=2.70*10⁻⁸Ωm

Selon Pouillet

- $R = \rho \frac{l}{s}$; $R = 1.70 * 10^{-8} \frac{1000}{108 * 10^{-6}}$; $R = \frac{17}{108} = 0.15\Omega$ pour le fil de contact
- $R = \rho \frac{l}{s}$; $R = 1.70 * 10^{-8} \frac{1000}{84 * 10^{-6}}$; $R = \frac{17}{84} = 0.20\Omega$ pour le câble porteur

Sachant que: l=1km, s=178.2 mm², ρ=2.70*10⁻⁸Ωm

Selon Pouillet

- $R = \rho \frac{l}{s}$; $R = 1.70 * 10^{-8} \frac{1000}{108 * 10^{-6}}$; $R = \frac{17}{108} = 0.15\Omega$ pour le fil de contact
- $R = \rho \frac{l}{s}$; $R = 1.70 * 10^{-8} \frac{1000}{84 * 10^{-6}}$; $R = \frac{17}{84} = 0.20\Omega$ pour le câble porteur

2.2.3 CALCUL DE RÉSISTANCE POUR LE CONDUCTEUR EN ALUMINIUM

Nous savons que: l=1km, s=178.2 mm², ρ=2.82*10⁻⁸Ωm. $R = \rho \frac{l}{s}$; $R = 2.82 * 10^{-8} \frac{1000}{178.2 * 10^{-6}}$; $R = \frac{28.2}{178.2}$, R=0.15Ω Pour le fil de contact

$$R = \rho \frac{l}{s}; R = 2.82 * 10^{-8} \frac{1000}{138.6 * 10^{-6}}; R = \frac{28.2}{138.6}$$

R=0.20Ω Pour le câble porteur

$$R = \rho \frac{l}{s} (1 + \alpha (t_{fin} - t_{init}))$$

Généralement T° init=20°C; α=410⁻³

Du point de vue résistance électrique, aucune différence entre les deux conducteurs. Cela prouve facilement que la section trouvée d'aluminium supportera le même courant que la section du cuivre.

2.2.4 MODULE D'ÉLASTICITÉ

Un module d'élasticité ou module élastique est une grandeur intrinsèque d'un matériau, défini par le rapport d'une contrainte à la déformation élastique provoquée par cette contrainte ⁴. Les déformations étant sans dimension, le module d'élasticité est homogène à une pression et son unité SI est donc le pascal; en pratique on utilise plus tôt un multiple, le MPa ou le GPa ⁵.

- Module d'élasticité: pour câble en cuivre 100000 MPa, pour le conducteur en aluminium 67000 MPa.
Leur rapport vaut: $100000/67000 = 1.4$ plus grand que l'aluminium.
- Module d'élasticité massif: Pour le conducteur en cuivre 120000 MPa, Pour le conducteur en aluminium 67500 MPa
Leur rapport vaut: $120000/67500 = 1.7$ plus grand que l'aluminium.

2.2.5 COEFFICIENT DE LA DILATATION

Pour le conducteur en cuivre, son coefficient de dilatation est de $1710 \cdot 10^{-6} K^{-1}$. Pour le conducteur en aluminium, son coefficient de dilatation est de $24 \cdot 10^{-6} K^{-1}$.

Le rapport entre ces deux valeurs vaut: $\frac{24}{17} = 1.4$. L'aluminium est plus grand que le cuivre.

2.2.6 MASSE VOLUMIQUE

La masse volumique du cuivre est 8400 kg/m^3 et celle de l'aluminium 2700 kg/m^3 .

$$\frac{8400}{2700} = 3.1$$

Cela prouve que le cuivre pèse trois fois que l'aluminium; la raison pour laquelle nous n'allons pas redimensionner les poteaux de la caténaire SNCC.

2.2.7 CONTRAINTE À LA RUPTURE (CONTRAÎNTE MÉCANIQUE)

En mécanique des milieux continus, et en résistances des matériaux en règle générale, la contrainte mécanique décrit les forces que les particules élémentaires d'un milieu exercent les unes sur les autres par unité de surface ⁶. Pour le conducteur en cuivre, la contrainte à la rupture en traction est de 380 à 450 MPa. Pour le conducteur en aluminium, la contrainte à la rupture en traction est de 150 à 190 MPa. Pour le conducteur en aluminium, la contrainte à la rupture en traction est de 150 à 190 MPa. Soit $\frac{380}{150} = 2,53$ à $\frac{450}{190} = 2,368$ fois moins que le cuivre.

2.2.8 LES PROPRIÉTÉS THERMIQUES

Pour les matériaux isotropes (homogènes), l'amplitude de la conductivité thermique k est généralement constante dans toutes les directions et en chaque point du matériau; cependant, elle peut varier localement dans les matériaux composites anisotropes (hétérogènes) en raison de la présence de nombreuses phases ⁷.

2.2.9 CAPACITÉ CALORIQUE VOLUMIQUE

Chaleur spécifique ou capacité calorifique volumique est la capacité à emmagasiner la chaleur rapportée à son volume ⁸. Elle est définie par la chaleur nécessaire pour élever de 1 degré Celsius la température d'un mètre cube de matériau ⁸.

Tableau 1. Le rapport entre la capacité thermique massique d'aluminium à celle du cuivre

Matériau de construction	Capacité thermique massique (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	Substances A température ambiante	Capacité thermique massique (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
Cuivre pur	386	Air sec	1005
Aluminium (duralumin)	881	Azote	1042
Acier	470	diamant	502
Granite	820	Eau solide (0°C)	2060
Grès	710	Eau liquide	4186

$\frac{881}{386}=2.3$. La capacité thermique massique de l'aluminium est supérieure que le cuivre.

2.2.10 CONDUCTIVITÉ THERMIQUE

La conductivité thermique est la quantité de la chaleur transférée en une unité de temps au travers d'un matériau d'une unité de surface et d'une unité d'épaisseur, quand les deux faces opposées diffèrent d'unité de température⁹. L'aluminium est un excellent conducteur de la chaleur et d'électricité¹⁰.

La conductivité thermique de l'aluminium est utilisée dans de nombreuses applications d'évacuation de la chaleur, c'est-à-dire de refroidissement¹⁰.

2.2.11 POINT DE FUSION

Aluminium: 660.3⁰ C point de fusion et 2470 ° C point d'ébullition.

Cuivre: 1083⁰ C points de fusion et 2562⁰ C point d'ébullition.

Le point de fusion ou température de fusion d'un corps représente la température à une pression donnée, à laquelle un élément fond, c'est-à-dire passer de l'état solide à l'état liquide¹¹.

2.2.12 RÉSISTANCE THERMIQUE

La résistance de la plupart des matériaux conducteurs augmente avec la température, en raison de l'agitation accrue des molécules du matériau qui gêne le passage des charges¹². La figure ci-dessous indique que la résistance du cuivre augmente de façon presque linéaire avec la température.

$$R=R_0 (1+\alpha\Delta T)$$

$$\alpha = 410^{-3}$$

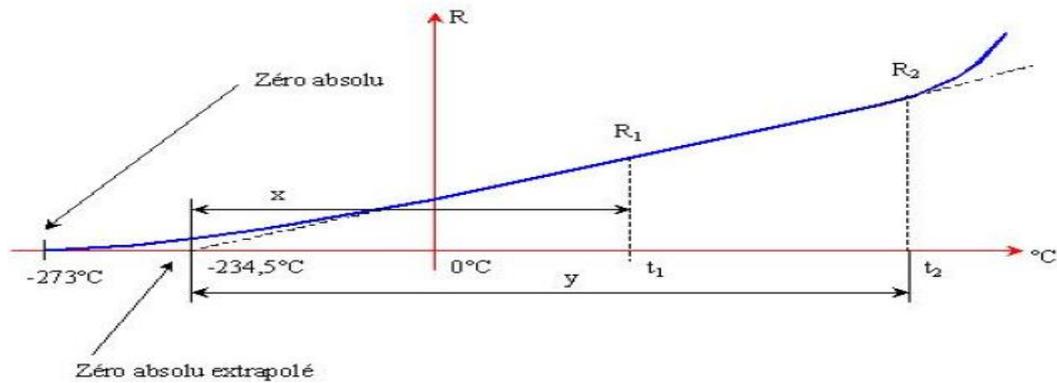


Fig. 2. Courbe de résistance thermique.

2.2.13 LE PRIX DU CONDUCTEUR ÉLECTRIQUE

Pour le cuivre de la section de 84mm² par kilomètre 15000\$ et le cuivre de 108mm² 20000\$ tandis que pour le conducteur d'aluminium de 150mm² par kilomètre 5200\$ et de 185mm² par kilomètre 6000\$.

Le prix total cuivre 35000\$/Km et l'aluminium 13200\$/Km

35000/1200= 3.12 fois plus élevé que l'aluminium.

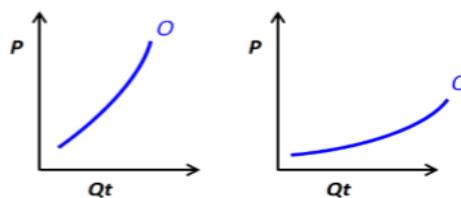


Fig. 3. Courbes de prix.

La figure à droite représente le prix du conducteur en cuivre en fonction de la quantité tandis que la figure à gauche représente le prix conducteur en aluminium en fonction de la quantité.

3 DIMENSIONNEMENT DE LA NOUVELLE LIGNE CATENAIRE

3.1 PROPRIÉTÉS ÉLECTRIQUES

3.1.1 LE COURANT

Le système pantographe-caténaire est un élément clé de l'alimentation électrique du train ². Des études plus récentes menées par l'AEF (l'Agence d'Essai Ferroviaire) font le lien entre le courant électrique traversant le contact et la rupture du fil. Ces travaux, en plus des relevés de courant qui ont mis en évidence les cas critiques lorsque le train est en marche, seront très utiles lors de cette étude. Nous savons que la société nationale de chemin de fer utilise une tension de 25000V et une puissance de 2MVA, en monophasé.

Il est nécessaire de savoir le courant le qui passe dans le fil en utilisant la formule suivant:

$$S = V * I; I = \frac{S}{V}$$

$I = 2000000/25000=80A$ c'est le courant qui passe dans fil conducteur.

USURE

L'usure de la bande due aux impacts d'arcs électriques fait aussi l'objet de notre travail.

Pour limiter l'arc électrique il suffit de brancher une résistance en série avec le pantographe comme illustré sur le circuit ci-dessous.

$$I_2 = \frac{E}{R_1 + R_2}$$

Cette dernière étude du contact électrique entre le pantographe et la caténaire, illustrée par la figure ci-dessous, donne la distribution de la température en régime permanent le long de la ligne.

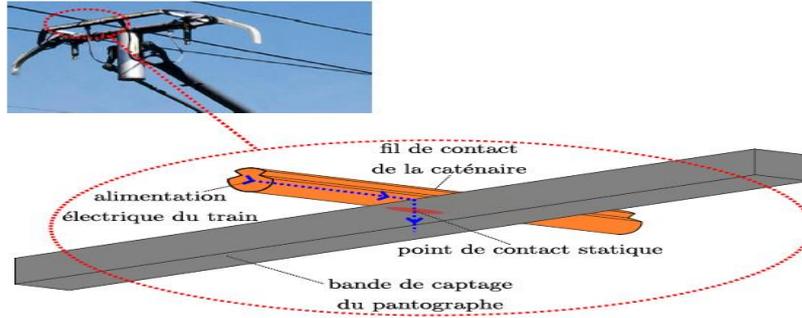


Fig. 4. Bande de captage du pantographe.

Le souci étant de protéger la ligne et minimiser la bande de captage, pour résoudre cela la bande de captage sera en charbon graphité car sa résistance à la rupture est faible face à celle de l'aluminium, sa température de fusion est faible face à celle d'aluminium et aussi son coefficient de frottement par rapport à celui d'aluminium. On utilise aussi du charbon graphite en dessin (crayon).

4 SECTION D'UN CONDUCTEUR

$$S = \frac{3.6}{1.7} * 108$$

$$S = 228 \text{mm}^2$$

Section normalisée est 240mm² Pour le conducteur en aluminium.

4.1 L'INDUCTANCE

$$L = \left(\frac{1}{2} + 2 \ln \frac{D}{r} \right) 10^{-7} \text{ H/m}$$

Avec: D la distance entre phase et neutre qui est de 5,75 m;

R est le rayon du fil de contact qui est de 8.7mm

Pour le câble porteur R =7mm.

Tableau 2. Quelques propriétés électriques.

PROPRIETES ELECTRIQUES D'ALUMINIUM	VALEURS	UNITES
LA RESISTANCE ELECTRIQUE	0.19	Ω/km
INDUCTANCE		H/m
LA RESISTIVITE ELECTRIQUE	3.6*10 ⁻⁸	Ωm
LA SECTION	240	mm ²

4.2 PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES

4.2.1 RÉSISTANCE MÉCANIQUE

Contact entre pantographe et fil de contact: aluminium mini d'une âme en acier de 10%, c'est-à-dire la résistance d'acier est de 1410 à 1450 Mpa or pour l'aluminium est de 160 à 190 Mpa et le 10% d'acier vaut 145 Mpa ajoute a 190 Mpa. La valeur trouve de la résistance mécanique de fil de contact vaut: 335 Mpa or pour le cuivre utilise été de 380Mpa, pour le fil de contact et sur le pantographe la matière de captage du courant c'est le graphite, il est préférable d'use la partie retrouvant sur le pantographe qu'use le fil de contact.

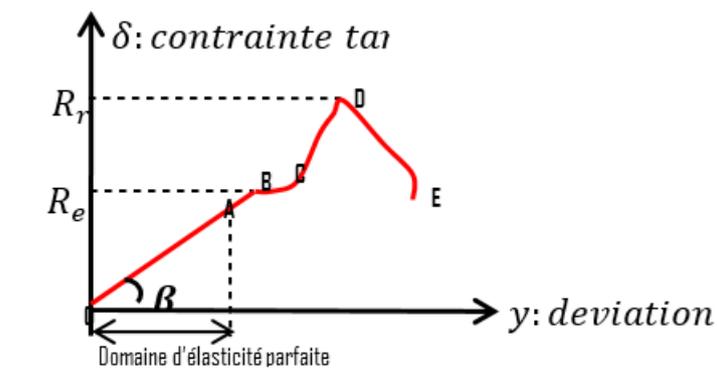


Fig. 5. La résistance mécanique.

4.2.2 EFFORT A LA RUPTURE

$$R_r = \frac{F_r}{S}$$

$$F_r = R_r * S;$$

$$F_r = 335 * 240 = 80400 \text{ N}$$

$$F_r = 41040 \text{ N}$$

Avec:

R_r : Résistance à la rupture

S : section du conducteur

FORCE DE CONTACT SOUS LIGNE AERIENNE DE CONTACT 25 KV

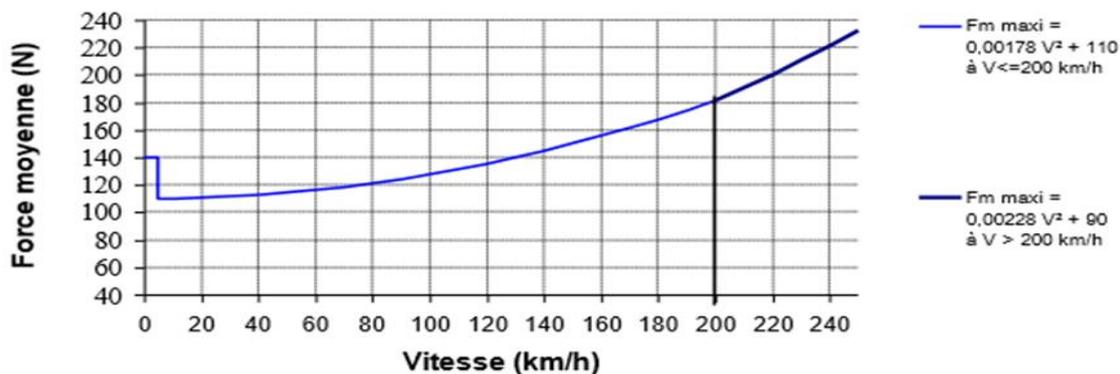


Fig. 6. La force de contact en fonction de la vitesse.

4.2.3 ALLONGEMENT A LA RUPTURE

$$A\% = 100 \frac{L-L_0}{L_0}$$

Si a augmenté la rupture diminue

LE POIDS

- Poids du câble dimensionne est calculé comme suite:

$$\omega = g * \rho$$

Avec: g l'accélération la pesanteur 9; 81m/s²

ρ est la densité du câble dimensionne 3485Kg/m³

$$\omega = 9.81 * 3485 = 34187.85 \text{ N/m}^3$$

$$P = v * \omega$$

$$\text{Or } V = s * l$$

$$V = 24 * 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$P = 0.24 * 34187.85$$

$$P = 8205.08 \text{ N}$$

Le poids en gramme vaut le poids en newton divise par l'accélération de la pesanteur

$$m = \frac{P}{g} = \frac{8205.08}{9.81}$$

m = 836.4 Kg/Km pour fil de contact

Pour le câble porteur après le calcul on a: m = 522.75kg/Km

La masse totale mt = 1359.1Kg/Km

Le 644 Kg est le poids du câble dimensionne sur une distance de un kilomètre.

- Le poids du conducteur de cuivre existant

$$\omega = g * \rho$$

$$\rho = 8930 \text{ Kg/m}^3$$

$$\omega = 9.81 * 8930 = 87603.3 \text{ N/m}^3$$

$$P = v * \omega$$

$$\text{Or } V = s * l$$

$$V = 108 * 10^{-3}$$

$$P = 0.108 * 87603.3$$

$$P = 9461 \text{ N}$$

$$m = \frac{9461}{9.81}$$

m = 964Kg/Km pour le fil de contact du cuivre

Pour le câble porteur du cuivre après calcul on a m = 750.12Kg/Km

La masse totale mt = 1714.12Kg/Km

Le rapport entre le conducteur du cuivre par rapport à celui dimensionné est:

$$\frac{1714.12}{1359.1} = 1.2 \text{ fois supérieure que celui dimensionné; cela prouve que le support existant ne seront pas redimensionné.}$$

ω : Poids volumique (N/m³)

g: l'accélération la pesanteur (m/s²)

ρ : la masse volumique (kg/m³)

S: la section (m²)

L: la longueur (m)

V: le volume (m³)

m: masse (Kg)

ρ = poids (N)

Tableau 3. Tableau de quelques propriétés mécaniques.

PROPRIETES MECANQUES D'AL	VALEURS	UNITES
RESISTANCE MECANIQUE	335	Mpa
COEFFICIENT DE LA DILATATION	$26.3 * 10^{-6}$	K ⁻¹
MASSE VOLUMIQUE	3485	kg/m ³
MODULE D'ELASTICITE	88500	Mpa
LIMITE D'ELASTICITE	175	MPa

5 VULNÉRABILITÉ AU VOL

En raison de sa valeur économique élevée, le cuivre est vulnérable au vol et au vandalisme, ce qui entraîne des retards dans les services ferroviaires et augmente les coûts de sécurité. La recherche de matériaux de substitution moins attrayants pour les voleurs a été stimulée par la nécessité de protéger les fils de cuivre contre le vol¹³.

Vous pouvez voir que le problème de vol a été résolu. Le fait que cette bobine de câble en aluminium ne soit plus surveillée sur l'avenue prouve l'efficacité des mesures mises en place pour remédier à ce problème.



Fig. 7. image du câble en aluminium ayant passé plusieurs jours sans gardiennage près de la tribune situé sur l'avenue Mobutu au quartier Mutoshi à Kolwezi RDC.



Fig. 8. Image du câble en aluminium ayant passé plusieurs jours sans gardiennage en face de la CENI situé sur l'avenue Kasavubu au quartier commercial à Kolwezi RDC.

6 AVANTAGE ET CONCLUSION

En conclusion, cette étude souligne les énormes avantages de l'adoption de câbles en aluminium dans un système de caténaire par rapport aux fils de cuivre, notamment ceux de type Almélec. Cette transformation présente une opportunité de développement tant au niveau économique qu'environnemental en République démocratique du Congo (RDC), où l'efficacité du réseau ferroviaire est cruciale pour l'acheminement des marchandises et des passagers.

Étant donné que les câbles en aluminium sont légers et ont des coûts d'installation et de maintenance inférieurs, il est possible de mieux allouer les ressources financières, ce qui est crucial compte tenu de l'expansion continue du système ferroviaire.

Sur le plan environnemental, l'utilisation de câbles en aluminium s'inscrit dans les préoccupations internationales de durabilité et de réduction des émissions de gaz à effet de serre. En passant à une technologie plus respectueuse de l'environnement, nous pouvons réduire notre empreinte carbone et préserver nos écosystèmes locaux.

Enfin, en encourageant l'adoption d'alternatives plus respectueuses de l'environnement et économiquement viables, les conclusions de cette étude ont le potentiel d'avoir un impact positif sur l'industrie ferroviaire mondiale. Ainsi, tout en améliorant la connexion et la mobilité à l'intérieur du pays, la République démocratique du Congo peut être utilisée comme exemple pour la transition vers des réseaux ferroviaires plus efficaces et plus respectueux de l'environnement.

REFERENCES

- [1] Rautio T, Hamada A, Kumpula J, Järvenpää A, Allam T. Enhancement of electrical conductivity and corrosion resistance by silver shell copper core coating of additively manufactured AlSi10Mg alloy. *Surface and Coatings Technology*. 2020; 403: 126426.
- [2] Wu G, Dong K, Xu Z, Xiao S, Wei W, Chen H, et al. Pantograph–catenary electrical contact system of high-speed railways: recent progress, challenges, and outlooks. *Railway Engineering Science*. 2022; 30 (4): 437-467.
- [3] Slade ME. *An Econometric Model of the US Copper and Aluminum Industries: How Cost Changes Affect Substitution and Recycling*; Routledge; 2018.
- [4] Gu X, Hu J, Huang M. Anisotropy of elasticity and fabric of granular soils. *Granular Matter*. 2017; 19: 1-15.
- [5] Craveur JC. *Modélisation par éléments finis*.: Dunod; 2022.
- [6] BOUCHAOUR M, MERAD L. *TRAVAUX PRATIQUES CARACTERISATION DES MATERIAUX*. 2022.
- [7] Abderrahim A, Moussa G. *Simulation du transfert thermique par conduction au sein de matériaux hétérogènes (Doctoral dissertation, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA)*. 2022.

- [8] Chili N, Bourmel M. Étude d'un système de stockage thermique par chaleur latente a changement de phase: application à un système solaire de production d'eau chaude sanitaire (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou). 2021.
- [9] MEDINI A, MEDINI A. Réalisation d'une maquette didactique pour étude du phénomène de la conduction thermique (Doctoral dissertation, Université Ibn Khaldoun-Tiaret-). 2021.
- [10] Satish R, Seshagiri Rao V, Ananthapadmanaban D, Ravi B. Tensile strength and hardness correlations with microscopy in friction welded aluminium to copper. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*. 2016; 97: 121-126.
- [11] Hodge NE, Ferencz RM, Solberg J. Implementation of a thermomechanical model for the simulation of selective laser melting. *Computational Mechanics*. 2014; 54 (1): 33-51.
- [12] Amar L, Madjid A. Identification des paramètres électriques de la machine asynchrone à cage d'écureuil (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri). 2012.
- [13] Sidebottom A, Belur J, Bowers K, Tompson L, Johnson SD. Theft in price-volatile markets: On the relationship between copper price and copper theft. *Journal of Research in Crime and Delinquency*. 2011; 48 (3): 396-418.