

La BLE Pour L'accès A La Téléphonie Fixe : Contributions Et Limites Du CPL Outdoor

Igor MATA-TOMBO M'BOKILA¹, Faustin BIMUALA BAMUENI²

¹Chef de Travaux, UPN, RD Congo

²Professeur Associé, UNIKIN, RD Congo

Auteur Correspondant : Igor MATA-TOMBO M'BOKILA, igor.mata@upn.ac.cd



Résumé : En République Démocratique du Congo, l'infrastructure de téléphonie fixe demeure inadaptée et insuffisamment développée, se limitant souvent aux zones urbaines historiques. Face à une demande croissante pour des services de communication fixe, l'exploitation des réseaux électriques de basse tension via le Courant Porteur en Ligne (CPL) Outdoor se présente comme une solution novatrice. Cette recherche explore les dimensions techniques de cette approche, utilisant la modélisation théorique, la simulation paramétrique et une analyse contextualisée, spécifiquement appliquée à la ville de Kinshasa.

L'étude met en lumière des défis majeurs associés aux applications vocales, notamment la latence, la gigue et la synchronisation. Pour atténuer ces limitations, nous proposons une architecture centralisée reposant sur les normes HomePlug AV/IEEE 1901, intégrant des mécanismes de qualité de service (QoS) au niveau de la couche MAC.

Les simulations réalisées démontrent qu'avec des paramètres de configuration adéquats et une priorisation appropriée des flux, le CPL Outdoor peut fournir des services de téléphonie conformes aux recommandations de la norme ITU-T G.114, atteignant des délais de bout en bout inférieurs à 150 ms et des taux de perte de paquets inférieurs à 1 %. Toutefois, la pérennité de cette solution est conditionnée par la stabilité du réseau électrique et la gestion des perturbations électromagnétiques. En tant qu'alternative transitoire, cette stratégie ouvre également des perspectives pour des architectures hybrides où le CPL peut jouer le rôle de « dernier kilomètre », en complémentarité avec la fibre optique, contribuant ainsi à élargir l'accès universel aux télécommunications, en particulier dans des contextes à faibles infrastructures filaires.

Motd-clés : CPL Outdoor ; Téléphonie fixe ; Boucle locale électrique ; Réseaux en temps réel ; Latence ; Synchronisation et Gigue.

Abstract: In the Democratic Republic of Congo, where conventional telephony infrastructure remains generally underdeveloped, Outdoor Power Line Communication (PLC) emerges as a promising alternative, leveraging existing electrical distribution networks to deliver voice services. This study assesses the feasibility of PLC for telephony in Kinshasa through theoretical modeling, parametric simulation, and contextual analysis.

Particular emphasis is directed towards addressing latency, jitter, and synchronization challenges inherent to voice applications. To mitigate these issues, a Quality of Service (QoS) framework based on HomePlug AV/IEEE 1901 standards at the MAC layer is proposed. Simulation results indicate that under appropriate configuration and traffic prioritization consistent with ITU-T G.114 recommendations, PLC can achieve end-to-end delays below 150 ms and packet loss rates not exceeding 1%. However, reliability remains critically influenced by electromagnetic interference. Beyond its role as a transitional solution, PLC can be positioned as a complementary technology to fiber optics, contributing to hybrid architectures that enhance universal access to telecommunications in regions characterized by limited wired infrastructure.

Keywords : Outdoor PLC ; PLC Signal ; Fixed Telephony ; Electrical Local Loop ; Real-Time Networks ; Jitter ; Latency ; Synchronization.

Introduction

1. Contexte et justification du sujet

Le développement des télécommunications filaires repose historiquement sur l'existence d'une boucle locale dédiée, principalement constituée de paires de cuivre, permettant de relier les abonnés au réseau téléphonique commuté. Dans les pays industrialisés, cette infrastructure a progressivement évolué vers la fibre optique jusqu'à l'abonné, assurant des débits élevés et une excellente qualité de service pour les applications voix et données.

En revanche, dans de nombreux pays en développement, dont la RD Congo, l'infrastructure de téléphonie fixe reste souvent confinée aux zones urbaines historiques et s'avère insuffisante pour répondre à une demande croissante en services de communication fixe. Cette situation contraste fortement avec l'extension relativement large du réseau électrique basse tension (BT), qui constitue l'une des rares infrastructures filaires atteignant effectivement les domiciles des abonnés.

Parallèlement, les technologies de Courant Porteur en Ligne (CPL) ont connu une évolution significative, passant de solutions bas débit dédiées à la télégestion à des standards haut débit, lesquels sont capables de supporter des services multimédias et temps réel. Tel est le cas de EDF en France avec sa filiale EdevCPL ; En Afrique le SBEE, au Bénin. La ville de Fribourg, en Suisse, est citée parmi les premières à déployer un réseau CPL de desserte avec la technologie ASCOM, en 2001, avec le FAI Swisscom.

L'exploitation du CPL au niveau de la boucle locale électrique, dite CPL Outdoor, offre ainsi des perspectives inédites pour la fourniture de services téléphoniques dans des contextes où les infrastructures classiques font défaut ou s'avèrent économiquement prohibitives.

Dans ce contexte, la boucle locale électrique apparaît comme un support alternatif potentiel pour l'accès téléphonique, pour peu que les contraintes techniques propres aux applications voix puissent être maîtrisées.

2. Problème de l'étude

Bien que le CPL offre des débits théoriques largement suffisants pour le transport de la parole téléphonique, son utilisation pour des applications temps réel pose des défis techniques majeurs. Le réseau électrique n'ayant pas été conçu pour la transmission de données, il présente des caractéristiques défavorables telles que le bruit impulsionnel, l'atténuation variable, la topologie non maîtrisée et l'accès asynchrone au support.

La téléphonie fixe exige, quant à elle, des contraintes strictes et viables en matière de latence, de gigue et de synchronisation, sans lesquelles la qualité de la communication devient inacceptable pour l'utilisateur. L'interaction humaine impose notamment que le délai bout-en-bout reste inférieur à des seuils bien définis, et que les échantillons de parole soient restitués de manière régulière (ITU, 2003)

Le problème essentiel de l'étude réside donc dans la compatibilité entre, d'une part, les exigences de qualité de service de la téléphonie fixe et, d'autre part, les caractéristiques intrinsèques d'un réseau CPL Outdoor déployé sur une boucle locale électrique publique.

Il s'agit de déterminer si, et sous quelles conditions, cette technologie peut constituer une solution d'accès téléphonique techniquement viable.

3. But et objectifs de l'étude

Le but principal de cette étude est d'analyser la faisabilité technique de l'exploitation de la boucle locale électrique, à travers le CPL Outdoor, comme infrastructure d'accès pour la téléphonie fixe, dans un contexte urbain, dans la ville de Kinshasa.

Pour atteindre ce but, les 02 objectifs spécifiques suivants sont poursuivis :

- analyser et évaluer les exigences et conditions techniques en vue de garantir des services de qualité et acceptable, propres à la téléphonie fixe sur CPL Outdoor ;

- discuter de la pertinence de cette solution comme alternative ou complément aux infrastructures téléphoniques existantes ou non existantes dans le contexte congolais.

Méthodologie

1. Approche générale de recherche

La présente étude adopte une approche méthodologique mixte, combinant :

- une analyse théorique basée sur la modélisation des performances temporelles de la téléphonie sur réseau CPL ;
- une modélisation analytique des délais et de la gigue induits par le mode d'accès au support ;
- une simulation numérique paramétrique permettant d'évaluer la faisabilité sous différentes conditions de charge ;
- une contextualisation appliquée à un environnement urbain réel, en l'occurrence un quartier type de la ville de Kinshasa.

Cette approche vise à établir une validation scientifique progressive :

Théorie → Modèle → Simulation → Application contextuelle.

2. La boucle locale électrique comme support de transmission

2.1. Caractéristiques du réseau électrique basse tension

A l'origine, le réseau électrique BT n'a pas été conçu que pour la transmission de signaux HT. Il est caractérisé par une topologie arborescente, avec des longueurs de ligne variables, des impédances non homogènes et la présence de nombreuses sources de bruit électromagnétique. Ces perturbations proviennent principalement des équipements électriques connectés au réseau (moteurs, alimentations à découpage, dispositifs électroniques domestiques), d'après Carcelle (2006).

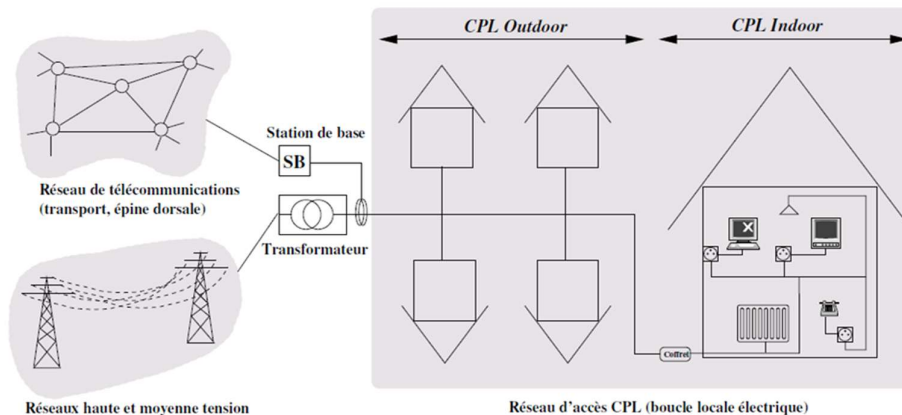


Figure I : Structure de la boucle locale électrique (Crussiere, 2005)

Le réseau CPL se divise en 02 parties : le segment **outdoor**, correspondant au réseau extérieur de distribution, et le segment **indoor**, lié aux installations domestiques des abonnés. Le réseau outdoor est connecté au réseau dorsal de télécommunication par un coupleur et une station de base installés au niveau du transformateur MT/BT.

Cette station, constituée d'un modem CPL de desserte, assure la conversion des données (Internet, téléphonie, etc.) en signaux adaptés à la transmission sur les lignes électriques. Elle permet également la collecte et le renvoi des données des abonnés vers le cœur du réseau (SRO, NRO, POP). Ainsi, tous les abonnés d'un même quartier partagent la même branche du réseau BT pour accéder aux services.

Malgré les contraintes évoquées ci-haut, la boucle locale électrique présente plusieurs avantages majeurs pour les télécommunications :

- une couverture géographique déjà étendue ;
- un accès direct jusqu'au domicile de l'abonné ;
- une réduction significative des coûts de génie civil.

Ces atouts justifient l'intérêt croissant porté sur le CPL Outdoor comme technologie d'accès.

2.2. Principe du Courant Porteur en Ligne Outdoor

Selon Carcelle (2006), le CPL Outdoor consiste à superposer un signal de télécommunications haute fréquence (généralement entre quelques MHz et plusieurs dizaines de MHz) au signal électrique de puissance (50 Hz), comme illustré dans la figure II. L'injection du signal CPL s'effectue au niveau du poste de transformation MT/BT, à l'aide de coupleurs adaptés (capacitif ou inductif), tandis que la réception s'opère chez l'abonné via un modem CPL branché sur une prise électrique.

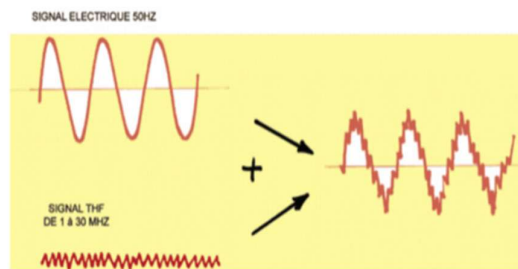


Figure II : Signal électrique et signal CPL superposés

Dans une logique de réseau de desserte, les modems CPL sont organisés selon une architecture maître-esclave ou centralisée, permettant une gestion coordonnée des communications et une meilleure maîtrise des performances. En effet, au niveau de chaque poste MT/BT, un modem CPL est installé, assurant le lien entre le poste MT/BT et le compteur électrique de client. Le modem situé au niveau du poste MT/BT sera appelé *maître* et les modems des utilisateurs appelés sont des *esclaves*.

Pareille mise en œuvre devra se faire avec la coopération du distributeur officiel d'électricité : la SNEL au Congo démocratique. Ainsi toute la zone desservie par le transformateur (habitations ou entreprises) pourra bénéficier de la connexion téléphonique distribuée, via le réseau électrique.

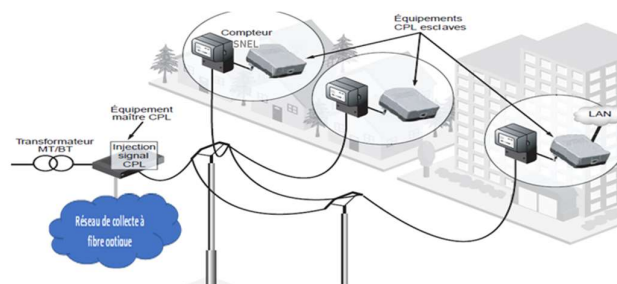


Figure III : Architecture simplifiée du mode centralisé et de l'architecture CPL Outdoor

La Figure III illustre l'architecture d'un réseau CPL Outdoor de distribution électrique en mode centralisé. On retrouve l'équipement central au niveau du transformateur MT/BT. Cet équipement contrôle le bon fonctionnement du réseau CPL, et plus particulièrement, les liens réseau qui existent avec les équipements CPL stations (esclaves), situés derrière les compteurs électriques d'habitations.

3. Contraintes spécifiques de la téléphonie sur CPL

3.1. Exigences de débit

Contrairement aux applications multimédias, lesquelles sont gourmandes en bande passante, la téléphonie vocale nécessite un débit relativement faible. Une communication téléphonique fixe non compressée requiert un débit de 64 kbit/s , tandis que l'utilisation de codecs de compression permet de descendre jusqu'à quelques kilobits par seconde. Ainsi, du point de vue strict du débit, les réseaux CPL modernes, capables d'offrir plusieurs dizaines (voire centaines) de mégabits par seconde, sont largement dimensionnés pour le transport de la voix.

3.2. Contraintes de latence et de gigue

La principale difficulté liée à la téléphonie sur CPL réside dans le respect des contraintes temporelles. Les applications voix sont interactives et tolèrent difficilement des délais excessifs. Il est généralement admis que la latence aller-retour ne doit pas dépasser 300 ms , pour garantir une communication naturelle conviviale entre interlocuteurs.

Or, les réseaux CPL fonctionnent sur un mode d'accès asynchrone au support, souvent basé sur des mécanismes de type CSMA/CA. Ce mode d'accès introduit une variabilité du temps de traversée du réseau, appelée *gigue*, qui complique la restitution régulière des échantillons de parole au niveau du récepteur.

3.3. Problèmes de synchronisation

La synchronisation constitue une contrainte majeure pour la téléphonie numérique. Dans le cas du flux PCM à 64 kbit/s , un échantillon de 8 bits devra être délivré toutes les 125 microsecondes. Toute irrégularité dans l'arrivée des paquets nécessite la mise en œuvre de mécanismes de mise en mémoire tampon (jitter buffer), qui augmentent la latence globale (Carcelle, 2006).

Dans un réseau CPL Outdoor, la traversée de plusieurs segments (CPL Indoor et Outdoor, réseau dorsal/équipements de commutation) accentue ces phénomènes, rendant indispensable une gestion rigoureuse de la qualité de service. La Figure IV illustre la contrainte de synchronisation au niveau du téléphone distant.

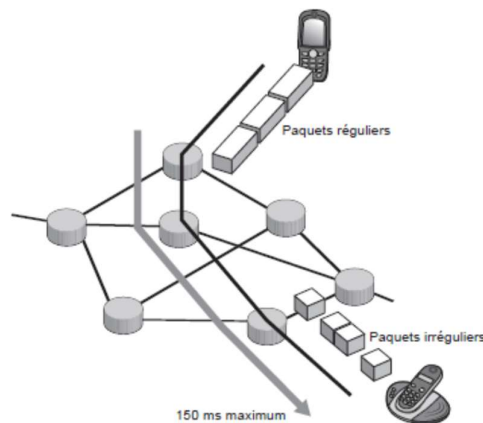


Figure IV : Contraintes de la communication téléphonique

En somme, pour garantir un service de téléphonie de qualité sur un réseau d'accès CPL, les conditions suivantes devront être respectées :

- 1° **Le temps total de transport** d'une trame CPL ne doit pas dépasser **124 ms** (**150 ms** soustrait d'environ **26 ms** de délais dus au codage, à la synchronisation et à la dépaquetisation).
- 2° **Le temps de transit d'accès** au support (backoff CSMA/CA) devra rester inférieur à **100 ms**, même en cas de trafic soutenu sans collision.

- 3° L'utilisation de *standards récents* tels que *HomePlug AV*, *IEEE 1901* ou *G3-PLC* est recommandée, avec une **priorité élevée attribuée aux terminaux téléphoniques** au niveau de la couche MAC.

La Figure V schématise les différents organes traversés par un flux de parole, depuis le réseau CPL (Indoor et Outdoor) jusqu'à la dorsale en fibre optique.

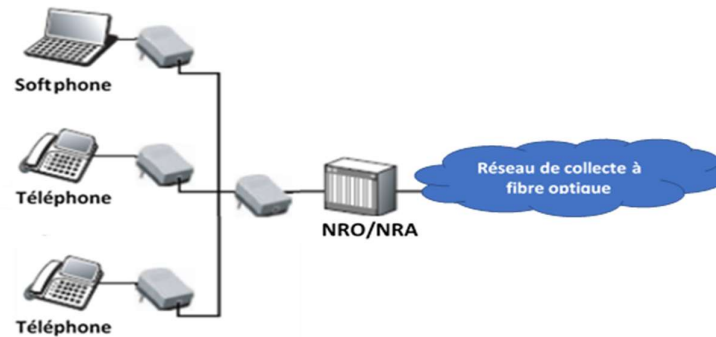


Figure V : Équipements traversés par un flot de parole numérique/analogique CPL

Le flux de données issu du réseau CPL indoor transite vers le réseau CPL outdoor, administré par un modem CPL maître situé au poste de transformation MT/BT, avant d'être injecté dans la dorsale à fibre optique. Celle-ci, à travers ses commutateurs (OLT, centraux locaux) au niveau de NRO et POP, assure la commutation et le routage des paquets au sein de l'infrastructure de téléphonie fixe. Selon la densité d'abonnés, plusieurs modules CPL maîtres peuvent être déployés afin d'optimiser la gestion des terminaux esclaves et la qualité du service.

4. Architectures réseau CPL adaptées à la téléphonie

03 principaux modes de fonctionnement sont actuellement recensés pour le CPL Outdoor :

- **Mode maître-esclave,**
- **Mode pair-à-pair,**
- **Mode centralisé.**

Dans le cadre de cet article, le système conçu repose sur le **standard HomePlug AV**, fonctionnant selon un **mode centralisé hybride**, combinant les avantages des 02 premiers modes. Un équipement central attribue des ressources temporelles aux stations CPL, tout en autorisant des communications directes entre elles.

Cette approche permet d'introduire des mécanismes de priorisation au niveau de la couche MAC, indispensables pour la téléphonie.

Des technologies CPL, d'après leur mode architectural, sont signalées dans la grille ci-dessous.

Tableau II : Quelques technologies CPL en fonction du mode réseau

Technologie		Mode / Architecture
Ascom APA 450 (4,5 Mbit/s)		Maître-esclave
Itran (Main.net) PLTNet & ITM1 (2 Mbit/s)		Maître-esclave
HomePlug	1.0 (14 Mbits/s)	Pair-à-pair
	1.0 Turbo (85 Mbits/s)	Pair-à-pair
	AV-2 (600 Mbits/s)	Centralisé
DS2	DSS4200 (45 Mbits/s)	Pair-à-pair
	200 Mbits/s	Maître-esclave
Spidcom	45 Mbits/s	Pair-à-pair
	SPC200 (200 Mbits/s)	Maître-esclave

Les communications entre stations CPL esclaves s'auto opèrent directement, pour peu que, sont respectées les règles de synchronisation et d'accès définies par le maître, garantissant ainsi **rapidité et efficacité** du réseau d'accès.

5. Modélisation et simulation d'un réseau CPL Outdoor pour la téléphonie

5.1. Cadre d'analyse du problème

Dans une configuration où le CPL est déployé en tant que réseau d'accès au sein de la BLE, le signal téléphonique est injecté à partir d'un modem CPL maître au niveau du poste de transformation MT/BT. Les abonnés, munis de modems CPL esclaves, peuvent accéder aux services de téléphonie via leurs prises électriques.

Afin de rendre l'étude exploitable et reproductible, les hypothèses qui suivent, sont éventuellement de mise :

- 1° Le réseau CPL Outdoor utilise un standard de type HomePlug AV ou IEEE 1901.
- 2° L'architecture réseau est de type centralisé avec gestion des priorités MAC ;
- 3° Existence de deux classes de trafic : voix v et autres services d ;
- 4° L'accès au réseau est du type CSMA/CA avec deferral ;
- 5° Le trafic voix est périodique selon la recommandation IUT-T G.711 ;
- 6° Le trafic des données agrégé de type best-effort ;
- 7° Le canal physique est quasi stationnaire sur une fenêtre courte d'analyse ;
- 8° Le réseau dorsal (FO ou IP) n'est pas le facteur limitant.

Le système étudié est donc limité au segment comme suit :

Abonné A → CPL Indoor → CPL Outdoor → Point d'injection → Backbone

Le réseau étudié pourra être modélisé avec :

- a) un segment BLE est partagé par N abonnés actifs ;
- b) un accès IEEE 1901 en mode contention, avec une priorité plus forte pour la voix ;
- c) des répéteurs espacés tous les 200 m ;
- d) une distance maximale de 800 m entre poste et abonné ;

e) les erreurs de la couche Physique absorbées dans le débit effectif réel (R_{eff}).

Cette précision sur le **débit utile effectif** est très importante dans la mesure où, le canal physique CPL est affecté par l'atténuation fréquentielle, le bruit impulsif et les multi-trajets ; il serait donc trompeur de calculer les délais avec le débit brut donné (R_{PHY}) (IEEE 1901, 2020).

5.2. Modèle de trafic voix

Le trafic voix est modélisé comme un flux périodique généré toutes les 20 millisecondes comme mentionné ci-haut. Ainsi, nous avons : $T_p = 20 \text{ ms}$.

Si chaque paquet transporter contient une quantité de données équivalent à 160 B, on peut noter donc : $L = 160 \text{ octets}$

Ainsi, le débit (trafic) voix par utilisateur est modélisé conformément à la recommandation ITU-T G.711, chiffré à 64 kbit/s, justifié par la relation mathématique suivante :

$$R_u = \frac{L \times 8}{T_p} \quad (\text{F-01})$$

$$R_u = \frac{160 \text{ octets} \times 8}{0.02} = 64 \text{ kbit/s}$$

Ainsi, la charge effective R_{eff} qui représente la charge totale du trafic est modélisée par la formule suivante :

$$R_{eff} = N \times R_u \quad (\text{F-02})$$

Où :

N représente le nombre d'abonnés actifs sur le canal (nombre d'utilisateurs)

R_u représente le débit (trafic) par utilisateur

Comme le débit du canal Physique CPL (R_{PHY}) est annoncé à 20 Mbit/s, en comparant les 02 valeurs, nous pouvons simuler différents niveaux de charges en fonction du nombre d'abonnés actifs sur le réseau avec la relation suivante :

$$\eta = \frac{R_{eff}}{R_{PHY}} \quad (\text{F-03})$$

Où η varie entre 0 et 1 et représente l'efficacité réelle du lien CPL, tenant compte des en-têtes, du codage, des reprises, de l'état du canal et du bruit.

5.3. Modélisation du délai d'accès au support

Le réseau CPL utilise le mécanisme CSMA/CA dont le délai d'accès moyen peut être modélisé par l'algorithme proposé par Bianchi (2000) où ce délai dépend de trois paramètres physiques : le délai moyen de backoff, le délai de gel/deferall et le coût moyen des collisions et retransmissions ; afin de refléter la spécificité de la couche MAC (IEEE 1901, 2020). Nous avons donc :

$$D_{acc,c} = D_{bo,c} + D_{fr,c} + D_{col,c} \quad (F-04)$$

Avec : $c \in \{v, d\}$, les deux classes

Cette dernière formule peut être décomposée comme suit :

$$D_{acc,c} = \frac{W_c - 1}{2} \cdot \sigma + M_c \cdot q_b \cdot T_b + \frac{p_c}{1 - p_c} \cdot T_c \quad (F-05)$$

où :

- a) W_c est la taille de la fenêtre de contention de la classe c ;
- b) σ est la durée d'un slot ;
- c) M_c est le paramètre moyen de deferral de la classe c ;
- d) q_b est la probabilité de trouver le canal occupé ;
- e) T_b est la durée moyenne d'un épisode de canal occupé ;
- f) p_c est la probabilité de collision ;
- g) T_c est la durée moyenne d'une collision suivie d'une reprise.

En analysant le terme de la formule (F-05), pour prioriser la voix, il suffirait tout simplement d'imposer que la taille de la fenêtre de contention de la voix soit plus petite que celle des autres services (IEEE 1901, 2020), donc : $W_v < W_d$. Ainsi la voix attend moins avant sa première tentative. Par ailleurs, selon Hao, S. et al. (2021), l'analyse du deuxième terme nous informe que pour encore favoriser la voix, il faut configurer le système tel que $M_v < M_d$, c'est-à-dire que la voix renonce moins vite que les données et reprend plus tôt la compétition. Dans le troisième terme, le facteur $\frac{p_c}{1 - p_c}$ représente le moyen d'échecs avant un succès.

5.4. Modélisation de collision multi-utilisateurs et occupation du canal

Pour les deux classes (voix et données), Nous avons proposé comme modèle pour la collision multi-utilisateurs les formules mathématiques suivantes :

$$p_v = 1 - (1 - \tau_v)^{n_v - 1} (1 - \tau_d)^{n_d} \quad (F-06)$$

$$p_d = 1 - (1 - \tau_d)^{n_d - 1} (1 - \tau_v)^{n_v} \quad (F-07)$$

Tandis que l'occupation du canal est donnée par :

$$q_b = 1 - (1 - \tau_v)^{n_v} (1 - \tau_d)^{n_d} \quad (F-08)$$

Où :

a) τ_v et τ_d représente respectivement la probabilité de transmission de la voix et celle des données. Elles peuvent être modéliser par la formule suivante :

$$\tau_c = \frac{2(1-p_c)}{W_c + 1 + M_c \cdot q_b \cdot W_c} \quad (F-09)$$

b) n_v définit le nombre de flux voix actifs

c) n_d définit le nombre d'abonnés actifs non-voix

Il est essentiel de comprendre ici que la voix ne subit pas seulement les autres flux voix ; elle subit aussi le trafic best-effort (les autres services). Donc prioriser la voix revient à **faire baisser simultanément** W_v , M_v et **idéalement** T_c **perçu par la voix**, tout en laissant monter W_d et M_d .

5.5. Modélisation du délai total du trafic voix

Nous proposons un modèle analytique simplifié du délai sur une boucle locale électrique CPL fondé sur IEEE 1901, distinguant 02 classes de trafic : voix et données. Comme le délai d'accès inclut explicitement trois composantes comme mentionné ci-haut, le délai total voix est obtenu en ajoutant la paquetsisation, la file d'attente prioritaire, la transmission PHY utile, la propagation et la gigue.

La priorisation de la parole est réalisée par réduction de la fenêtre de contention et du niveau de deferral de la classe voix, au prix d'une dégradation contrôlée des services best-effort.

Ainsi, le délai bout-en-bout du trafic voix est évalué par :

$$D_{tot,v} = D_{cod,v} + D_{q,v} + D_{acc,v} + D_{tx,v} + D_{prog,v} + D_{jitter,v} \quad (F-10)$$

Où :

a) $D_{cod,v}$ représente le délai de codage et paquetsisation de la voix.

b) $D_{q,v}$ représente le délai de la file d'attente. Pour la téléphonie fixe, la voix doit être mise dans une file prioritaire stricte au niveau des modems CPL esclave comme maître. Le délai de la file d'attente peut être modéliser avec cette formule :

$$D_{q,v} = \frac{\rho_v}{\mu_v - \lambda_v} \quad (F-11)$$

Où : λ_v représente le taux d'arrivée des paquets voix et μ_v le taux de service voix.

Avec :

$$\mu_v \approx \frac{1}{D_{acc,v} + D_{tx}}$$

Cette dernière formulation nous montre clairement la condition pour que le système soit stable, il faut que $\lambda_v < \mu_v$. Si cette inégalité n'est pas vérifiée, aucune priorité sur la couche MAC n'est vérifiable et ainsi le système tout entier devient instable.

c) $D_{tx,v}$ représente le délai de la transmission donné par :

$$D_{tx,v} = \frac{L_v}{R_{eff}}$$

d) $D_{prog,v}$ représente le délai de la propagation sur la canal CPL.

e) $D_{jitter,v}$ représente le délai de la marge de gigue (tampon de jitter).

Le critère de validation, selon le seuil ITU-T (1972), est ainsi chiffré à $D_{tot,v} \leq 150 \text{ ms}$ pour une qualité acceptable pour laisser de la marge au codec, à la signalisation et au reste du chemin. Par ailleurs, pour obtenir une vraie priorité de la voix, il ne suffit pas seulement de dire « QoS », il faut cependant imposer des choix au niveau de la couche MA comme explicité ci-haut, mais aussi une discipline de file stricte.

Avec ce modèle, nous avons montré analytiquement que :

1. Lorsqu'on diminue W_v , on réduit presque linéairement le terme de backoff ;
2. Lorsqu'on diminue M_v , on réduit le coût de deferral propre au CPL ;
3. Lorsqu'on augmente W_d et M_d , on dégrade volontairement les autres services, ce qui libère le médium pour la voix ;
4. Au-delà d'une certaine charge, le goulot d'étranglement n'est plus au niveau de la couche physique mais la file d'attente au niveau de la couche MAC.

6. Simulation de l'étude

6.1. Cadre d'exploitation : Simulation paramétrique

Une simulation numérique a été réalisée sous MATLAB en faisant varier le nombre d'utilisateurs actifs de 10 à 160, en considérant une proportion de 10 % de trafic voix et 90 % de trafic de type best-effort. D'autres simulateurs peuvent aussi être utilisés comme NS-3 ou tout simulateur réseau compatible IEEE 1901.

Le modèle proposé intègre explicitement les mécanismes d'accès au médium propres au standard IEEE 1901, notamment la contention, les collisions et le mécanisme de deferral, ainsi que les effets de file d'attente au niveau des flux voix.

Les résultats de simulation montrent que le délai d'accès au support augmente de manière non linéaire avec la charge du réseau. Cette augmentation est principalement due à la croissance de la probabilité d'occupation du canal et à l'intensification des phénomènes de contention entre stations.

En outre, l'introduction d'une priorisation du trafic voix, à travers une réduction de la fenêtre de contention et du niveau de deferral, permet de limiter l'impact de cette congestion sur les flux temps réel.

6.2. Indicateurs de performance retenus

Comme mentionné plus haut et en fonction des contraintes de la téléphonie sur CPL, les performances sont évaluées selon quatre critères principaux :

1° Délai d'accès au médium (canal CPL)

2° Délai de la file d'attente

3° Délai total de communication voix

4° Taux de charge du système voix

6.3. Simulation numérique de la charge totale (débit)

Selon la formule (F-02), la charge totale du trafic est modélisée par la formule suivante et dépend du trafic par utilisateur du canal CPL (R_u) et du nombre d'abonnés actifs (N) :

$$R_{eff} = N \times R_u$$

Pour simuler numériquement ce modèle, nous avons pris deux exemples pratiques en fonction de N_a , qui est la variable : une valeur inférieure à 80 et une autre qui lui est supérieure.

- Si $N = 40$ abonnés actifs, la charge totale du trafic sera donc :

$$R_{eff} = 40 \times 64 = 2560 \text{ kbit/s (Soit 2,5 Mbit/s)}$$

Comme le débit du canal Physique CPL (R_{PHY}) est annoncé à 20 Mbit/s, en comparant les 02 valeurs en fonction de la formule (F-03), nous concluons que la charge totale représente moins de 13 % du débit effectif du lien CPL. D'où, une faible occupation.

- Si $N = 120$ abonnés actifs, la charge totale du trafic s'élèvera à 7,68 Mbit/s, représentant près de 40 % du débit effectif du canal CPL.

Dans ces conditions, même si le débit physique du CPL semble suffisant, l'*overhead MAC* (en-têtes, acquittements, temporisations CSMA/CA) réduit le débit utile disponible. Lorsque le nombre d'abonnés actifs augmente, les *collisions* se multiplient, provoquant retransmissions et délais supplémentaires.

Cette accumulation entraîne une **saturation progressive** du réseau bien avant d'atteindre la capacité théorique du lien. Le paragraphe suivant va nous aider à confirmer cette thèse.

Ces deux cas de simulations numériques sont illustrés par la figure suivante. Ce graphique montre la charge totale en tant que pourcentage du débit du canal Physique CPL pour chaque configuration, illustrant clairement les différences de saturation de réseau.

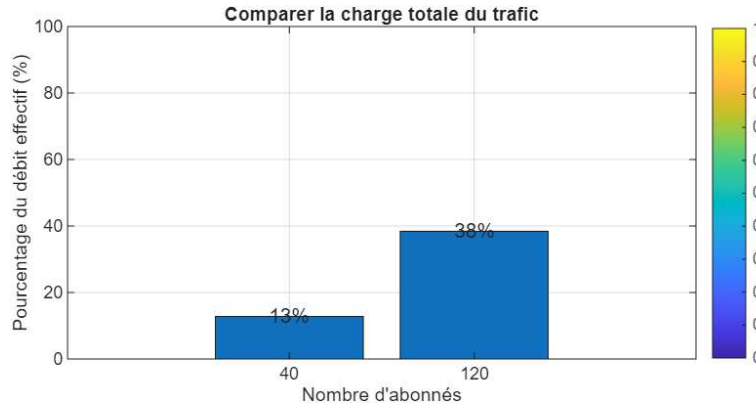


Figure VI : Simulation graphique de la charge totale du trafic en fonction des abonnés

6.4. Simulation numérique du délai d'accès

En fonction des formules (F-04 et F-05), nous voulons simuler l'impact du délai d'accès voix pour différents niveaux de charge. Nous pouvons ainsi, aisément écrire la formule qui permet de modéliser le délai d'accès du trafic voix comme suit :

$$D_{acc,v} = D_{bo,v} + D_{fr,v} + D_{col,v} \quad (F-04,a)$$

Avec : $\mathcal{V}$, le trafic voix

Cette dernière formule peut être décomposée comme suit :

$$D_{acc,v} = \frac{w_v - 1}{2} \cdot \sigma + M_v \cdot q_b \cdot T_b + \frac{p_v}{1 - p_v} \cdot T_c \quad (F-05,a)$$

où :

- W_v est la taille de la fenêtre de contention de la voix ;
- σ est la durée d'un slot ;
- M_v est le paramètre moyen de deferral de la voix ;
- q_b est la probabilité de trouver le canal occupé ;
- T_b est la durée moyenne d'un épisode de canal occupé ;
- p_v est la probabilité de collision de la voix ;
- T_c est la durée moyenne d'une collision suivie d'une reprise.

Voici les hypothèses que nous avons retenues pour réaliser nos simulations sur Matlab comme simulateur :

- Le trafic voix représente que 10% du trafic total. Pour le début, pour la taille de la fenêtre de contention de la classe c égale à 40 abonnés, celle de la voix (W_v) sera égale à 8 et pour les données (W_d), nous aurons donc 32.
- Le paramètre moyen de deferral de la voix (M_v) est fixé à 1 tandis que celui des données (M_d) est égal à 4.
- Le débit physique du canal CPL (R_{PHY}) est fixé à 20 Mb/s.
- La taille du paquet voix est de 160 octets, transmise toutes les 20 ms.

Nous prenons comme exemples numériques quatre cas de simulations du nombre d'abonnés actifs pour déterminer le délai d'accès de la voix :

- Pour $N = 40$, nous trouvons $D_{acc,v} = 0.588$ ms
- Pour $N = 80$, nous trouvons $D_{acc,v} = 0.931$ ms
- Pour $N = 120$, nous trouvons $D_{acc,v} = 1.213$ ms
- Pour $N = 150$, nous trouvons $D_{acc,v} = 1.403$ ms

Ceci nous montre que le délai d'accès de la voix a une variation modérée, ce n'est donc pas elle seule qui détruit la qualité du canal. Cependant, lorsque $N > 120$, le délai d'accès dépasse 1 ms et va donc contribuer significativement au délai total, comme le confirmé la figure suivante :

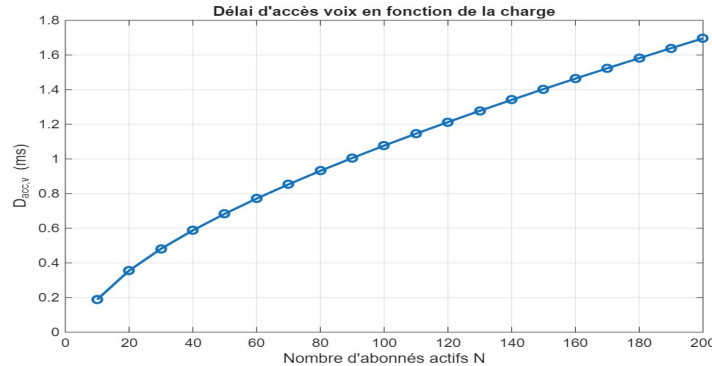


Figure VII : Simulation graphique du délai d'accès voix en fonction des abonnés

6.5. Simulation numérique du délai total de la voix

Partant de la formule F-10, nous pouvons simuler numériquement les valeurs prises par le délai total de la voix en fonctions du nombre d'abonnés actifs sur le réseau CPL en fixant les délais du codage, de la propagation et de la gigue ainsi de la durée d'un paquet.

$$D_{tot,v} = D_{cod,v} + D_{q,v} + D_{acc,v} + D_{tx,v} + D_{prog,v} + D_{jitter,v} \quad (F-10)$$

Le tableau III reprend les différentes simulations numériques du délai d'accès, du délai de la file d'attente, du délai total ainsi que du taux de charge de la voix par rapport au nombre d'abonnés actifs.

Tableau III : Valeurs numériques des simulations

Abonnés actifs N	Flux voix n_v	$D_{acc,v}$ (ms)	$D_{q,v}$ (ms)	$D_{tot,v}$ (ms)	Taux de charge (ρ)	Observation (Etat du canal)
40	4	0.588	0.098	40.755	0.130	Très bon
80	8	0.931	0.658	41.658	0.398	Bon
120	12	1.213	4.179	45.461	0.766	Acceptable avec marge
130	13	1.278	9.149	50.495	0.872	Dégradation perceptible
140	14	1.341	84.147	125.557	0.984	Dégradation nette
150	15	1.403	∞	∞	1.100	Zone très dangereuse
160	16	1.464	∞	∞	1.222	Instable

Les différentes simulations graphiques ci-dessous nous permettent cependant de visualiser les allures du délai total de la voix en fonction de la charge totale ainsi que le taux de charge de la voix en fonction des abonnés actifs.

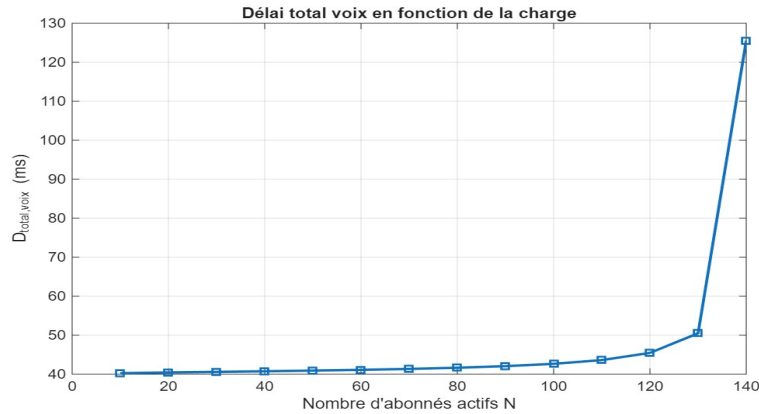


Figure VIII : Simulation graphique du délai total voix en fonction des abonnés

Cette courbe reste quasi plate au début, puis présente un **coude** à partir d'environ 130-140 abonnés actifs, avant une montée brutale vers 150 – 160 abonnés. La courbe nous montre en même temps **la limite pratique de la capacité du canal CPL** par rapport à la téléphonie, qui est de 130 abonnés actifs.

La figure suivante représente l'évolution du taux de charge du trafic voix $\rho_v = \lambda_v / \mu_v$ en fonction du nombre d'abonnés actifs.

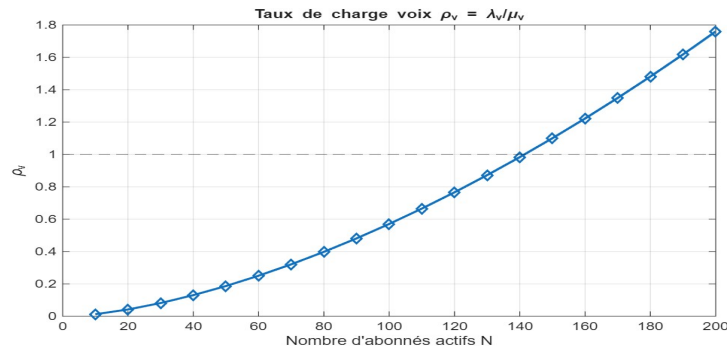


Figure IX : Simulation graphique du taux de charge voix en fonction des abonnés

Ce paramètre traduit le niveau d'occupation de la capacité de service par le flux vocaux. Lorsque ρ_v reste largement inférieur à 1, le système demeure stable et les délais de file restent faibles. En revanche, à mesure que ρ_v se rapproche de l'unité, la file d'attente croît fortement, entraînant une augmentation rapide du délai total. La droite horizontale $\rho_v = 1$ correspond ainsi au seuil critique d'instabilité du service voix. C'est cette courbe qui montre **la cause structurelle** de la dégradation ; elle donc un **indicateur de stabilité**.

Il convient de souligner que l'augmentation du délai total est principalement imputable à la croissance du délai de file d'attente, tandis que les délais de transmission et de propagation demeurent relativement constants. Malgré cette augmentation, les performances obtenues restent conformes aux recommandations de l'ITU-T en matière de qualité de service pour la téléphonie, notamment en maintenant un délai bout-en-bout inférieur à 150 ms.

Ces résultats démontrent que, sous des conditions de charge modérée à élever et avec une gestion appropriée des priorités, le CPL Outdoor peut supporter efficacement des services de téléphonie fixe.

Bref, le vrai facteur limitant serait probablement le bruit impulsionnel ou la saturation du débit utile.

7. Application au contexte urbain de Kinshasa

Appliquée à une ville comme Kinshasa, cette architecture présente un potentiel significatif. La densité de population, combinée à la présence de postes de transformation desservant, en électricité, des quartiers de la ville, permettrait d'envisager une couverture téléphonique étendue à partir d'un nombre limité de points pour injection du CPL.

La mise en place de répéteurs CPL, espacés d'environ 200 m, pourrait maintenir un niveau de signal acceptable sur l'ensemble de la ligne de distribution basse tension. Toutefois, la qualité du service reste fortement dépendante de l'état du réseau électrique, du niveau de bruit impulsionnel et de la maîtrise des sources de perturbation.

Afin d'encadrer cette étude et de permettre une évaluation quantitative cohérente avec le modèle analytique développé, les hypothèses suivantes sont retenues :

1. Un poste de transformation MT/BT dessert en moyenne entre **80 et 200 abonnés**.
2. Le taux d'activité simultanée est estimé à **30 % des abonnés raccordés**, ce qui correspond à une charge réaliste en environnement urbain.
3. La distance moyenne entre le poste et les abonnés est supposée inférieure à **400 m**, afin de limiter l'atténuation du signal CPL.
4. Des répéteurs CPL sont déployés avec un espacement d'environ **200 m**, permettant de maintenir un niveau de signal acceptable sur l'ensemble du réseau.

Ces paramètres, combinés au modèle de délai développé dans les sections précédentes, permettent d'estimer la capacité effective d'un poste MT/BT à supporter des services de téléphonie fixe avec des contraintes de qualité de service respectant les recommandations internationales.

8. Limites méthodologiques

Cette étude présente certaines limites dont les plus importantes sont repris dans les lignes suivantes :

- 1) absence de mesures expérimentales *in situ* ;
- 2) modélisation simplifiée du canal CPL ;
- 3) hypothèse d'un réseau électrique relativement stable.

Ces limites pourront être levées dans les travaux doctoraux futurs grâce à :

- 1) une **campagne de mesures terrain** sur le réseau électrique urbain ;
- 2) un **banc d'essai CPL réel** expérimental ;
- 3) une validation expérimentale.

Discussion

L'analyse présentée dans cet article met en évidence que le CPL Outdoor, lorsqu'il est associé à des mécanismes de priorisation adaptés au niveau de la couche MAC, est capable de supporter des services de téléphonie fixe avec des performances compatibles avec les exigences de qualité de service.

Les résultats de simulation montrent que le délai total de communication reste maîtrisé tant que la charge du système demeure inférieure à un seuil critique, au-delà duquel les effets de file d'attente deviennent prédominants. Ce comportement confirme que la limitation principale du système ne réside pas dans le débit physique du canal, mais dans la gestion de l'accès au médium et des files d'attente.

Comparée aux solutions purement filaires ou sans fil, cette approche présente l'avantage de capitaliser sur une infrastructure existante, réduisant ainsi les coûts de déploiement. Néanmoins, il serait imprudent de considérer le CPL comme une panacée ; il doit plutôt être envisagé comme un complément ou une solution transitoire, particulièrement dans les zones où le déploiement de la fibre optique jusqu'à l'abonné demeure économiquement difficile.

Conclusion

Cette étude démontre que la boucle locale électrique, exploitée à travers le Courant Porteur en Ligne Outdoor, constitue une solution techniquement viable pour le déploiement de services de téléphonie fixe dans des environnements urbains à contraintes d'infrastructure.

Le modèle analytique proposé, intégrant les mécanismes d'accès au médium définis par la norme IEEE 1901, notamment les phénomènes de contention et de deferral, ainsi que la modélisation des files d'attente, permet de caractériser de manière cohérente les performances temporelles du système.

Les résultats obtenus montrent que, sous des conditions de charge maîtrisées et en présence de mécanismes de priorisation du trafic voix, les exigences de qualité de service peuvent être satisfaites. En particulier, le respect des contraintes de latence définies par les recommandations internationales constitue un indicateur clé de la viabilité de cette approche.

Par ailleurs, cette étude met en évidence que la limite de performance du système est principalement liée à la saturation progressive des files d'attente, ce qui souligne l'importance d'une gestion efficace des ressources au niveau de la couche MAC.

Dans cette perspective, le CPL apparaît comme une solution pertinente pour le dernier kilomètre, en complément d'un réseau dorsal en fibre optique. Cette architecture hybride permet de concilier performance, coût et rapidité de déploiement, notamment dans des contextes urbains tels que celui de Kinshasa.

Enfin, les travaux présentés ouvrent des perspectives de recherche importantes, notamment en matière de validation expérimentale, d'amélioration des modèles de canal et d'optimisation des mécanismes de qualité de service. Ces axes constituent le prolongement naturel de cette étude dans le cadre de recherches doctorales futures.

Références

- [1]. Bianchi G. (2000). *Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function*. In **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, Vol. 18, n°3, pp. 535–547.
- [2]. Dostert, K. (2001). **Powerline Communications**. New York, NY : Prentice Hall. USA
- [3]. Hao, S., Liu, Y., Wang, Z., & Song, J. (2021). MAC performance analysis for reliable power-line communications based on IEEE 1901 protocol.
Sensors, 21(1), 196. <https://doi.org/10.3390/s21010196>
- [4]. IEEE Standard Association (2010). **IEEE Std 1901-2010 : IEEE Standard for Broadband over Power Line Networks : Medium Access Control and Physical Layer Specifications**. New York : IEEE.
- [5]. IEEE Standard Association (2020). **IEEE Std 1901-2020 : IEEE Standard for Broadband over Power Line Networks : Medium Access Control and Physical Layer Specifications**. New York, New York : IEEE
- [6]. International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector (ITU-T). (2003). **Recommendation G.114: One-way transmission time**. Geneva, Switzerland: ITU.
- [7]. International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector (ITU-T). (1972). **Recommendation G.711 : Pulse code modulation (PCM) of voice frequencies**. Geneva, Switzerland: ITU.
- [8]. Carcelle, X. *et al.* (2006), **Réseaux CPL par la pratique (avec trois études de cas : réseau domestique, réseau d'entreprise et réseau de desserte de collectivité locale)**. Paris
- [9]. Crussiere M. (2005). **Etude et optimisation de communications à Haut débit sur lignes d'énergie : Exploitation de la combinaison OFDM/CDMA**, Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Rennes, Rennes.
- [10]. Cisco Systems (2015). **Voice over IP – QoS Design Guide**. San Jose, CA : Cisco Systems, Inc. USA
- [11]. Galli, S., Scaglione, A., & Wang, Z. (2011). “Grid communications and networking : Part I – Power line communications.” *Proceedings of the IEEE*, 99(6), 998–1027. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2011.2109670>
- [12]. Mata-Tombo M'B. I. (2022). **Etude de faisabilité du réseau électrique pour l'exploitation des télécommunications par courant porteur en ligne**. Mémoire de DEA, Université Pédagogique Nationale (UPN), Faculté des Sciences et Technologies, pp. 100-113. Kinshasa.
- [13]. Zimmermann, M. et Dostert K. (2002). *A multipath model for the powerline channel*. In **IEEE Transaction on Communications**, vol. 50, n°4, pages 553-559.