

# Étude De Faisabilité Et Dimensionnement Du Réseau CPL Outdoor Pour La Téléphonie Fixe En Environnement Urbain Africain « Modélisation IEEE 1901 Et Validation Qos »

Igor Mata-Tombo M'bokila<sup>1</sup>, Faustin Bimuala Bamueni<sup>2</sup>,  
Blaise Lema Nkwalu<sup>3</sup>, Maxime Kialanda Madiengele<sup>4</sup>, Remy Nsimba Nkula<sup>5</sup>,  
Joachim Mbengi Ngoma<sup>6</sup> Eric Mata-Tombo Kamisa<sup>7</sup>.

Département De Physique Et Sciences Appliquées, Université Pédagogique Nationale (UPN), Kinshasa, RD.  
Congo,

Faculté Des Polytechniques, Université De Kinshasa (UNIKIN), RD. Congo,

Département De Mathématique Et Informatique, Institut Supérieur Pédagogique De Matadi (ISP), Matadi, RD.  
Congo,

---

## Résumé

Cet article étudie la faisabilité technique, mathématique et économique du déploiement de la téléphonie fixe sur la boucle locale électrique via la technologie Courant Porteur en Ligne (CPL) Outdoor. Le système proposé exploite le réseau électrique basse tension comme support d'accès dernier kilomètre, interconnecté à une dorsale en fibre optique de type GPON. Une modélisation multi-niveau est proposée intégrant l'accès MAC basé sur IEEE 1901 avec **backoff** + **deferral** + **priorités**, et la théorie de file **M/G/1 à priorité stricte**. Une expression fermée du délai total voix est dérivée, mettant en évidence l'indépendance entre accès MAC et la dynamique de la file d'attente. La qualité vocale est évaluée via le modèle E (MOS).

Les matériels utilisés dans cette étude comprennent un environnement informatique : l'ordinateur et les logiciels (Ms Excel, Matlab, Python) qui permettent de réaliser des simulations, des modélisations analytiques, les analyses de performance réseau.

La recherche repose sur une approche méthodologique mixte intégrant l'analyse théorique et documentaire de l'architecture du système hybride, la modélisation analytique du délai et de la stabilité par la théorie des files d'attente, l'évaluation de la qualité vocale (MOS), ainsi qu'une simulation numérique paramétrique et une analyse économique pour le dimensionnement optimal du système.

Les résultats analytiques et de simulation montrent que la limite de performance de notre système hybride est dictée par la croissance du temps d'attente dans la file quand la charge se rapproche de l'unité. Un critère de dimensionnement optimal est proposé sous contraintes de délai, de stabilité et de coût, situant la zone de fonctionnement entre 80 et 120 abonnés actifs par poste MT/BT. Ces résultats montrent que la limitation principale du CPL ne réside pas dans la capacité physique du canal, mis dans la saturation des mécanismes d'accès et de mise en file. Enfin, une architecture hybride CPL-GPON est décrite, qui permet de réduire d'environ 40% le CAPEX par rapport à un déploiement FTTH intégral. Ainsi, le CPL s'impose comme une solution complémentaire stratégique pour le dernier kilomètre dans le contexte africain.

Pour une exploitation optimale et un bon rendement du système hybride (FO&CPL), Il est donc recommandé, par prudence, de limiter le nombre d'abonnés actifs à une fourchette de 80 à 120 utilisateurs par poste, en veillant à une stricte priorisation du trafic voix.

**Mots clés** : Standard IEEE 1901, CSMA/CA, Deferral, Priorité MAC, Modèle M/G/1, Réseau hybride.

---

Date of Submission: 26-06-2026

Date of Acceptance: 06-07-2026

---

## I. Introduction

Le coût d'accès en fibre optique jusqu'à l'abonné limite encore beaucoup le déploiement de la téléphonie fixe dans les milieux urbains africains. La boucle locale électrique peut alors constituer une infrastructure alternative prometteuse pour le dernier kilomètre.

D'après Dostert (2001), à la différence des réseaux filaires dédiés, les réseaux CPL fonctionnent sur un accès partagé reposant sur des mécanismes de contention de type CSMA/CA dont la dynamique peut fortement impacter la qualité de service des applications temps réel.

Dans ce contexte, la BLE peut constituer un support alternatif potentiel pour l'accès à la téléphonie fixe, à condition de maîtriser les contraintes techniques inhérentes aux applications vocales.

Les travaux de Giuseppe Bianchi (2000), ont démontré l'importance de la modélisation analytique du MAC dans les réseaux sans fil. Cependant, leur extension au standard IEEE 1901 reste limitée, notamment en présence de mécanismes spécifiques tels que le deferral et la priorisation multi-classe.

L'objectif de cet article est de pallier ce manque, en proposant une modélisation intégrée du délai d'accès et de la dynamique de file, afin d'évaluer la faisabilité du CPL Outdoor, à travers un dimensionnement optimal, comme infrastructure d'accès pour la téléphonie fixe, dans un contexte urbain, dans la ville de Kinshasa.

Il s'agit de savoir si, et dans quelles conditions d'usage réelles, cette technologie peut apporter une solution d'accès téléphonique techniquement viable.

Cette étude propose comme contributions scientifiques, de montrer l'effectivité des points suivants sur l'exploitabilité du CPL Outdoor comme système d'accès dernier kilomètre pour la téléphonie fixe :

1. un modèle MAC IEEE 1901 (backoff + deferral + priorité) ;
2. une analyse par théorie de file d'attente M/G/1 à priorité stricte non préemptive ;
3. une mesure MOS (E-model) de la qualité vocale ;
4. un modèle de dimensionnement optimal ;
5. une analyse de CAPEX ;
6. des recommandations pratiques.

## II. Matériels Et Méthodes

### Matériels et Données

#### 1. Matériels

##### a. Ordinateur

Selon Golub (2013), l'ordinateur constitue la plateforme principale de traitement et d'exécution des différentes tâches de l'étude. Il a été utilisé pour la simulation numérique, la modélisation analytique, le traitement des données ainsi que l'analyse des performances du système hybride étudié. Sa capacité de calcul permet d'exécuter simultanément les logiciels de simulation et d'analyse nécessaires à l'évaluation du réseau.

##### b. Microsoft Excel

Microsoft Excel a été utilisé pour l'organisation des données, les calculs statistiques, la représentation graphique des résultats et l'analyse comparative des performances du système. Ce logiciel facilite également le traitement des paramètres de dimensionnement et l'interprétation des résultats obtenus lors des simulations.

##### c. Matlab

Matlab a servi à la modélisation mathématique et aux simulations analytiques du système hybride. Grâce à ses puissantes bibliothèques de calcul scientifique, il a permis d'évaluer les performances réseau, notamment les délais de transmission, la stabilité du système et les indicateurs de qualité de service.

##### d. Python

Python a été utilisé pour le développement des scripts de simulation, l'automatisation des calculs et l'analyse des données expérimentales. Son écosystème scientifique, notamment les bibliothèques dédiées au calcul numérique et à la visualisation, a permis de réaliser des analyses avancées des performances du réseau et de la qualité vocale (MOS).

#### 2. Données

Le tableau suivant présente les paramètres numériques utilisés pour la simulation.

**Tableau I.** Paramètres numériques de simulation

N°	Paramètre	Symbole / Valeur	Description
1	Proportion du trafic voix	10 % du trafic total	Part du trafic réservée aux communications vocales
2	Taille de la fenêtre de contention totale	( c = 40 ) abonnés	Nombre total d'abonnés considérés dans la contention
3	Fenêtre de contention voix	( W <sub>v</sub> = 8 )	Taille de la fenêtre dédiée au trafic voix
4	Fenêtre de contention données	( W <sub>d</sub> = 32 )	Taille de la fenêtre dédiée au trafic données
5	Paramètre moyen de deferral voix	( M <sub>v</sub> = 1 )	Valeur moyenne de report pour le trafic voix
6	Paramètre moyen de deferral données	( M <sub>d</sub> = 4 )	Valeur moyenne de report pour le trafic données
7	Taille du paquet voix	( L <sub>v</sub> = 200 ) octets	Taille des paquets de transmission vocale
8	Taille du paquet données	( L <sub>d</sub> = 1200 ) octets	Taille des paquets de données



## Nœuds centraux et services

Comme décrits dans les paragraphes plus haut, ces nœuds représentent des Services numériques fournis aux clients via le réseau FO-CPL : voix sur IP, accès Internet, téléphonie traditionnelle par différents opérateurs (Téléphonie IP / Internet / Téléphonie fixe).

### Réseau de collecte à fibre optique

Autrement appelé réseau dorsal à FO, ce réseau comprends 02 segments :

- **le réseau de collecte à fibre optique** : segment principal du réseau FO reliant les centres de données entre-deux. C'est aussi le point d'entrée de la fibre depuis le backbone national ou régional /international ;
- **le réseau de transport et de distribution** : segment à FO reliant un central (autocommutateur) aux différents postes MT/BT de sa juridiction en passant par différents NRO.

### Réseau de distribution locale FO

C'est un réseau de distribution à fibre optique déployée en amont du poste MT/BT, c'est-à-dire qui relie les différents sous-répartiteur optique (SRO). Un SRO est le Point de branchement local de la fibre optique et peut desservir des clients en FO directe avec la technologie FTTH ou alimenter le CPL.

### Postes de transformation et distribution : Cabine MT/BT

Comme le montre la figure II, ce poste joue deux rôles essentiels à savoir :

- **Point de liaison entre le réseau de distribution et celui d'accès** : Ce local contiendra les éléments de liaison entre le réseau de distribution et celui d'accès, à savoir : le SRO et le Modem CPL maître d'une part et de l'autre part, le transformateur MT/BT. C'est ici que la fibre est injectée dans le réseau CPL.
- **Point de départ de la FO vers un autre Poste MT/BT** : Extension du réseau de distribution FO vers d'autres zones via les postes MT/BT, c'est-à-dire une liaison SRO/SRO.

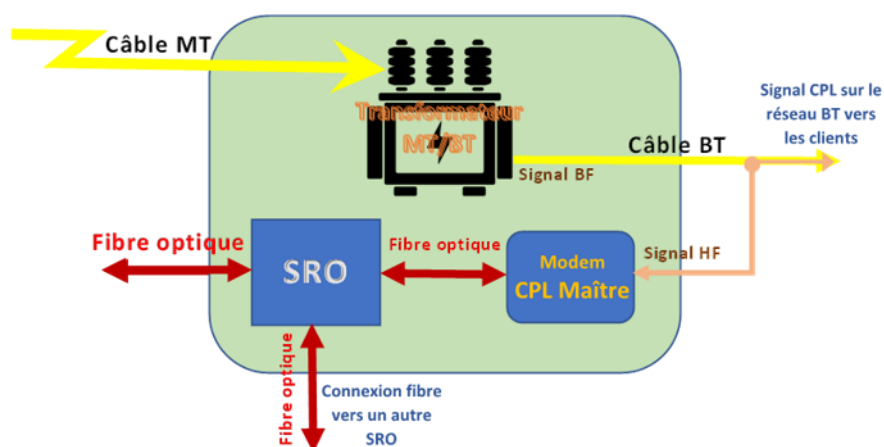


Figure II : Configuration des équipements dans la cabine MT/BT

### Réseau d'accès CPL

- **Modem CPL maître** : Modem CPL de desserte situé en amont (souvent dans la cabine MT/BT) qui injecte le signal CPL dans le réseau électrique.
- **Réseau d'accès CPL** : Utilise les câbles électriques BT pour transmettre les données numériques jusqu'aux clients.
- **Répéteur (Tous les 300 m environ)** : Dispositif amplifiant le signal CPL pour compenser l'atténuation sur les longues distances.

### Accès client

- **CLIENT / Chez le CLIENT** : Point terminal du réseau. Le client reçoit les services via CPL.
- **Modem CPL CLIENT** : Modem installé chez le client pour décoder le signal CPL et fournir Internet/téléphonie.

Ce système hybride s'avère particulièrement pertinent pour les zones urbaines comme rurales où le déploiement exclusif de la fibre s'avère onéreux. Il permet une mutualisation des infrastructures électriques pour une extension à moindre coût des services numériques, avec une qualité de service maintenue grâce aux répéteurs CPL et à la fibre en amont.

### Modélisation Du Délai Total

La modélisation de délai total de la chaîne de transmission de notre système de télécommunications hybride par la formule (F-01) représente la somme des délais des systèmes GPON et CPL incluant l'accès MAC, la file d'attente, le délai de la transmission et de la propagation. L'analyse se concentre sur le segment CPL, identifié comme facteur limitant.

$$D_{tot} = D_{GPON} + D_{CPL} \quad (F-01)$$

Avec :

$$D_{CPL} = D_{cod} + D_q + D_{acc} + D_{tx} + D_{prog} \quad (F-02)$$

Où :

- $D_{cod}$  : le délai de codage et paquets ;
- $D_q$  : le délai de la file d'attente ;
- $D_{acc}$  : le délai au support MAC ;
- $D_{tx}$  : le délai de transmission des services sur le CPL ;
- $D_{prog}$  : le délai de la propagation sur le canal CPL.

### Modélisation Du Délai D'accès : MAC IEEE 1901 Réaliste

Le modèle du **délai d'accès au support** que nous avons choisi pour cette étude, intègre le backoff, le gel/deferral et des collisions & retransmissions impliquant un certain niveau de priorisation en classes (CA0-CA3), afin de refléter de manière réaliste les recommandations de l'IUT en matière de téléphonie (IEEE 1901, 2020). Le délai d'accès dépend donc de la contention de la fenêtre et des collisions. Nous aurons donc :

$$D_{acc,c} = D_{bo,c} + D_{fr,c} + D_{col,c} \quad (F-03)$$

avec :  $c \in \{v, d\}$ , les deux (02) classes (voix : v et données : d)

Pour la priorisation, selon le protocole IEEE 1901 (2020), on affectera **les classes hautes CA2 et CA3 pour la voix (v) et les classes basses CA0 et CA1 pour les données (d)**, ainsi la voix est réellement prioritaire (Vlachou et al., 2016).

La formule F-04 peut être décomposée comme suit, pour trouver le modèle du délai d'accès pour la voix uniquement :

$$D_{acc,v} = \frac{W_c - 1}{2} \cdot \sigma + M_c \cdot q_b \cdot T_b + \frac{p_c}{1 - p_c} \cdot T_c \quad (F-04)$$

Où :

- $W_c$  : la taille de la fenêtre de contention de la classe c ;
- $\sigma$  : la durée d'un slot ;
- $M_c$  : le paramètre moyen de deferral de la classe c ;
- $q_b$  : la probabilité de trouver le canal occupé ;
- $T_b$  : la durée moyenne d'un épisode de canal occupé ;
- $p_c$  : la probabilité de collision ;
- $T_c$  : la durée moyenne d'une collision suivie d'une reprise.

Pour les deux (02) classes (voix et données), nous proposons, pour modéliser la collision multi-utilisateur, les formules mathématiques suivantes, tirées de Bianchi (2000) :

$$p_v = 1 - (1 - \tau_v)^{n_v - 1} (1 - \tau_d)^{n_d} \quad (F-05)$$

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

Alors que l'occupation du canal est donnée par la relation :

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

Où :

a)  $\tau_v$  et  $\tau_d$  représente respectivement la probabilité de transmission (tentative avec deferral) de la voix et celle des données, lesquelles peuvent être modélisée par la formule suivante :

$$\tau_c = \frac{2(1 - p_c)}{W_c + 1 + M_c \cdot q_b \cdot W_c} \quad (F-08)$$

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  $M_d$ . Bref, nous aurons :  $W_v < W_d$ ,  $M_v < M_d$ .

### **Théorie De La File D'attente : M/G/1 A Priorité Stricte**

Le délai d'accès au médium comme évoqué ci-haut, n'épuise pas à lui seul le problème de la qualité de service. D'une manière générale, la dégradation sensible de la téléphonie apparaît surtout lorsque la file d'attente croît sous l'effet combiné de la contention MAC et du trafic agrégé, (UIT, 2003). Afin de prendre en compte cet aspect, selon Takagi (1991), le système est modélisé par une file M/G/1 à priorité stricte non préemptive, dans laquelle la voix constitue la classe haute priorité et les autres services la classe basse priorité, comme mentionné dans le précédent paragraphe.

### **Temps de service d'un paquet**

Le temps de service moyen d'un paquet voix est défini par la formule suivante :

$$E[S_v] = D_{acc,v} + \frac{L_v}{R_{PHY}} \quad (F-09)$$

et celui des données :

$$E[S_d] = D_{acc,d} + \frac{L_d}{R_{PHY}} \quad (F-10)$$

Où  $L_v$  et  $L_d$  désignent respectivement les tailles des paquets voix et données,  $R_{PHY}$  et le débit utile effectif du lien CPL, (Mata-Tombo, 2026).

### **Charges**

En notant  $\lambda_v$  et  $\lambda_d$  les taux d'arrivée voix et données, les charges offertes s'écrivent :

$$\rho_v = \lambda_v E[S_v], \quad \rho_d = \lambda_d E[S_d], \quad \rho = \rho_v + \rho_d \quad (F-11)$$

La condition de stabilité du système est alors :  $\rho < 1$

### **Délai de file (voix)**

Le délai moyen de la file pour la voix est approché par l'algorithme suivant, dérivé des travaux de Takagi (1991) :

$$W_{q,v} = \frac{\lambda_v E[S_v^2] + \lambda_d E[S_d^2]}{2(1-\rho_v)(1-\rho)} \quad (F-12)$$

Cette relation montre explicitement que la voix, bien que prioritaire, reste pénalisée lorsque la charge globale du système se rapproche de l'unité.

### **Délai total voix**

Partant de la formule (F-02), le délai total de la voix au niveau du tronçon CPL devient :

$$D_{CPL,voix} = D_{cod} + W_{q,v} + E[S_v] + D_{prog} + D_{gigue} \quad (F-13)$$

Cette dernière formule montre clairement que la contrainte principale de ce système hybride n'est pas le débit brut du canal CPL, mais la croissance du délai de la file lorsque la charge MAC s'approche du régime critique.

### **Évaluation De La Qualité Vocale (M.O.S)**

Selon l'ITU-T (2015), le modèle E, qui est largement utilisé pour l'analyse des performances des systèmes téléphoniques IP, sert de base à l'évaluation de la qualité perçue de la voix. Le modèle permet d'estimer le facteur de qualité R à partir duquel se déduit le score MOS (Mean opinion score).

Le facteur R étant ainsi défini :

$$R = 94.2 - I_d - I_e \quad (F-14)$$

où :

- $I_d$  représente la dégradation liée au délai de transmission
- $I_e$  traduit l'effet de pertes et de distorsions du signal.

La note MOS correspondante est :

$$MOS = 1 + 0.035R + 7 \times 10^{-6}R(R - 60)(100 - R) \quad (F-15)$$

**Dimension Optimal Du Réseau**

D’après Bianchi (2000), le dimensionnement du réseau repose sur la prise en compte simultanée de trois (03) contraintes essentielles :

1. la contrainte de qualité de service ( $N_{QoS}$ ) ;
2. la contrainte de stabilité ( $N_{stabilité}$ ), due à la condition  $\rho < 1$  ;
3. la contrainte de capacité physique ( $N_{capacité}$ ).

Le nombre optimal d’abonnés actifs est donc défini par :

$$N_{opt} = \min(N_{QoS}, N_{stabilité}, N_{capacité})$$

**Analyse Economique**

L’évaluation économique du CPL s’appuie sur les travaux de Dostert (2001) et de Galli et al. (2011), qui soulignent la pertinence de cette technologie pour réduire les coûts de déploiement du dernier kilomètre au niveau de la boucle locale électrique.

Dans un scénario typique de desserte de 120 abonnés, les coûts d’investissement (CAPEX) peuvent être évalués de la manière suivante :

- solution CPL : environ 30 000 \$
- solution FTTH (GPPON) : 50 000 \$

Cette disparité équivaut à une diminution d’environ **40 % des coûts d’investissement** en faveur de la solution CPL.

De surcroît, l’évaluation du retour sur investissement (RSI - ROI) indique une période d’amortissement comprise entre **2,5 et 3 ans**, ce qui consolide l’intérêt de cette solution dans les environnements soumis à des restrictions budgétaires.

**III. Résultats**

Les résultats présentés dans cette section proviennent des simulations numériques réalisées sous MATLAB afin d’évaluer les performances du système hybride FO–CPL en fonction du nombre d’abonnés actifs. L’analyse porte principalement sur l’évolution des délais de transmission, de la stabilité du système, du taux de charge réseau ainsi que de la qualité de service vocale dans différents scénarios de fonctionnement.

**Simulation**

**1. Paramètres numériques de simulation**

Ci-après, les hypothèses posées pour réaliser nos simulations sur Matlab, le logiciel simulateur :

1. Le **trafic voix représente 10% du trafic total**. Au 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** ;
2. 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** ;
3. La taille du paquet voix est  $L_v = \mathbf{200\ octets}$  et celle de données est  $L_d = \mathbf{1200\ octets}$ . Un (01) paquet voix est transmise toutes les 20 ms ;
4. Le débit physique du canal CPL ( $R_{PHY}$ ) est fixé à **20 Mb/s**, tandis que le débit de données est fixé à **8 kbits/s** par utilisateur ;
5. Partant des algorithmes F-01 et F-02, Nous posons comme valeurs fixes, ces différents délais ( $D_{cod} = \mathbf{20\ ms}$  ;  $D_{gigue} = \mathbf{20\ ms}$  ;  $D_{prop} = \mathbf{5\ \mu s}$  et  $D_{GPPON} = \mathbf{5\ ms}$ ).

Considérons quatre (04) exemples numériques de simulations du nombre d’abonnés actifs pour déterminer les différents paramètres de l’étude y afférant, en fonction d’abonnés actifs sur le réseau. Le tableau III restitue les résultats obtenus après simulation numérique.

**Tableau II. Paramètres chiffrés de simulations**

N	$n_v$	$n_d$	$D_{acc.v}$ (ms)	$W_{q.v}$ (ms)	$D_{tot,voix}$ CPL (ms)	$D_{tot,voix}$ Hybride (ms)	$\rho_v$	$\rho$
40	4	36	0.570	0.226	40.881	45.881	0.130	0.185
80	8	72	0.839	1.627	42.550	47.550	0.367	0.497
100	10	90	0.952	5.088	46.125	51.125	0.516	0.746
120	12	108	1.057	33.511	74.653	79.653	0.682	0.900
130	13	117	1.107	Instable	Instable	Instable	0.772	1.052
140	14	126	1.156	Instable	Instable	Instable	0.865	1.165
150	15	135	1.204	Instable	Instable	Instable	0.963	1.253
160	16	144	1.250	Instable	Instable	Instable	1.064	1.394

La première interprétation de la grille III relative au réseau d'accès CPL de notre système hybride est la suivante :

1. si  $N = 40$ , le régime est confortable et le délai est très faible ;
2. si  $N = 80$ , la contention est visible mais le QoS est intact ;
3. si  $N = 120$ , la file devient dominante et la charge  $\rho$  atteint la zone limite. Cependant, le QoS reste encore acceptable ;
4. si  $N > 130$ , la charge  $\rho$  dépasse l'unité et le système devient instable. Même si le délai d'accès est borné, les autres deviennent instables.

De facto, nous confirmons que **le facteur limitant** de notre système d'accès n'est pas le débit physique du canal CPL, mais **la file d'attente (MAC)**.

## 2. Simulations graphiques en fonction du nombre d'abonnés

Les différentes simulations numériques ci-haut, permettent de tracer des différents graphiques en fonction du nombre d'abonnés actifs ( $N$ ).

### a) Délai d'accès voix

La figure VIII illustre l'évolution du délai d'accès au médium, pour les paquets voix dans notre réseau CPL. L'augmentation du nombre d'abonnés actifs entraîne une hausse progressive du délai d'accès, en raison de l'intensification de la contention et de l'effet du mécanisme de deferral. Toutefois, cette croissance reste modérée, indiquant que le délai d'accès n'est pas le facteur limitant principal des performances globales du système.

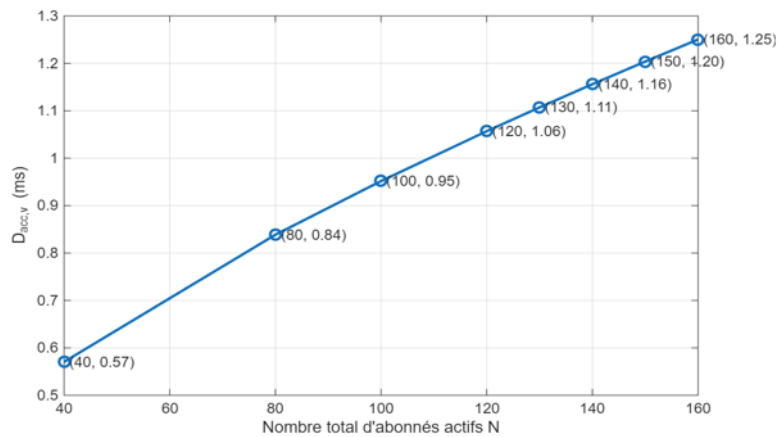


Figure III : Simulation graphique du délai d'accès voix en fonction de  $N$

### b) Délai de la file d'attente voix

La figure IV met en évidence l'impact de la charge réseau sur le délai de file dans un modèle M/G/1 à priorité stricte. Contrairement au délai d'accès, le délai de file présente une croissance non linéaire, particulièrement marquée à partir d'un certain seuil de charge. Cette augmentation résulte de l'accroissement du second moment du temps de service et de l'approche du régime critique de stabilité ( $\rho \rightarrow 1$ ), comme l'indique la **figure IV** ; ce qui confirme que la file d'attente constitue le principal facteur de dégradation de performances temporelles.

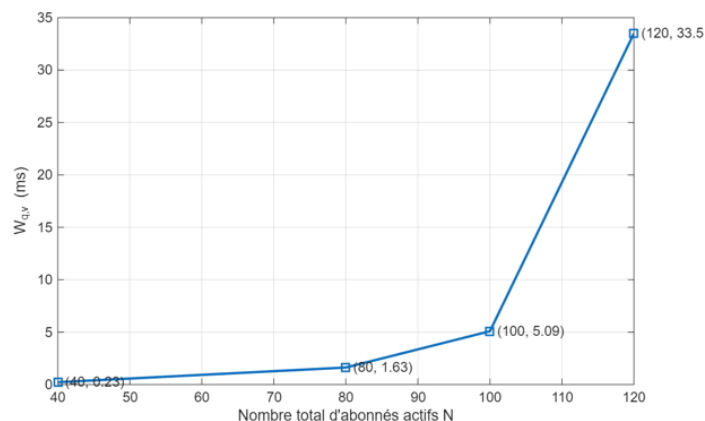


Figure IV : Délai de file d'attente voix en fonction de  $N$

**c) Délai total voix sur le segment CPL**

La figure V montre l'évolution du délai total de communication voix dans le réseau CPL Outdoor en fonction de la charge. Le seuil de 150 ms, recommandé par l'ITU-T G.114 est, représenté afin d'identifier la limite de fonctionnement acceptable du système. Les résultats montrent que le système reste conforme aux exigences de téléphonie jusqu'à environ 120 abonnés actifs, au-delà desquels le délai augmente rapidement en raison de la saturation progressive de la file.

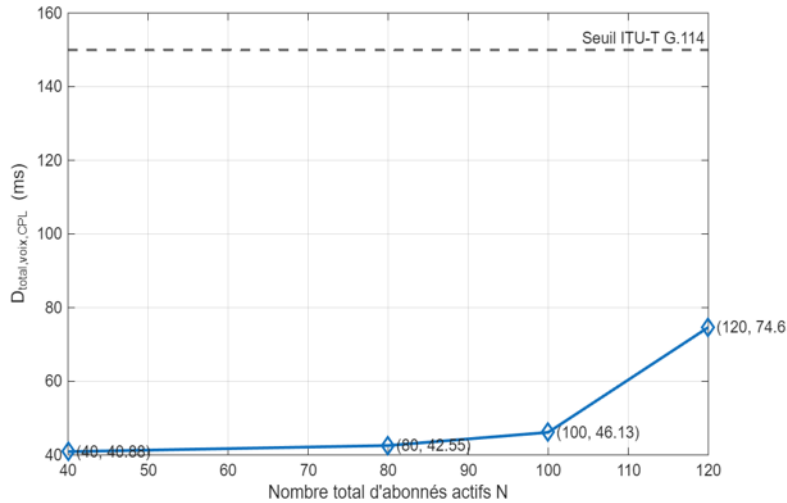


Figure V : Simulation graphique du délai total voix sur le segment CPL seul en fonction de N

**d) Comparaison entre le CPL seul et le système global hybride**

Cette figure permet de comparer le délai total voix sur le segment CPL seul avec le délai bout en bout du système hybride. L'écart entre les deux (02) courbes correspond à la contribution constante de la dorsale optique ( $D_{GPON} = 5 \text{ ms}$ , pour notre cas de simulation). Les deux (02) courbes présentent des tendances similaires, indiquant que la dégradation des performances est principalement imputable au segment CPL. Cette observation souligne l'importance du dimensionnement et de la gestion de la qualité de service QoS au niveau de la boucle locale électrique.

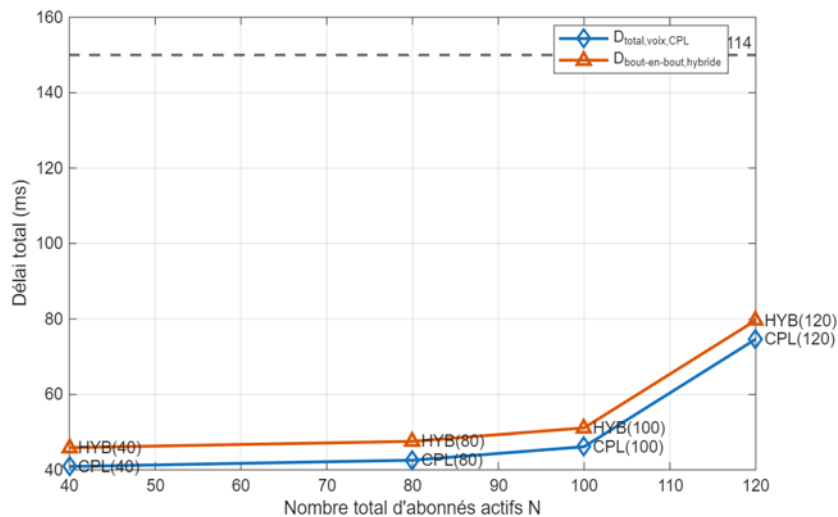


Figure VI : Comparaison du délai total : segment CPL seul vs système hybride

**e) Taux de charge de la voix**

La figure VII présente la variation du taux de charge ( $\rho_v$ ) associé au trafic voix. L'approche du seuil critique ( $\rho_v = 1$ ) indique une saturation imminente du système. Ladite métrique constitue un indicateur fondamental de stabilité, confirmant que la dégradation des performances, observée dans les figures précédentes, est directement liée à l'augmentation de la charge offerte au système.

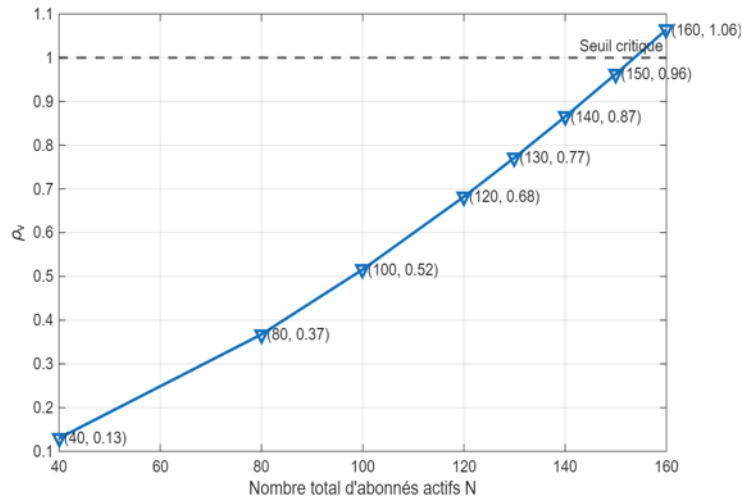


Figure VII : Taux de charge voix en fonction de N

Cette dernière figure VIII permet de comparer les deux (02) charges du système ( $\rho$ ) et ( $\rho_v$ ) en montrant que les deux (02) courbes croissent avec le nombre d'abonnés actifs, mais que la charge totale atteint plus rapidement le seuil critique ( $\rho_v=1$ ).

Ce résultat montre que la dégradation des performances du réseau n'est pas uniquement liée au trafic voix, mais à l'effet combiné de flux voix et données sur les mécanismes d'accès au médium et de mise en file, comme mentionné ci-haut.

En pratique, lorsque le seuil critique ( $\rho_v=1$ ) est dépassé, le système entre dans une zone d'instabilité, où aucun délai moyen borné ne peut plus être garanti.

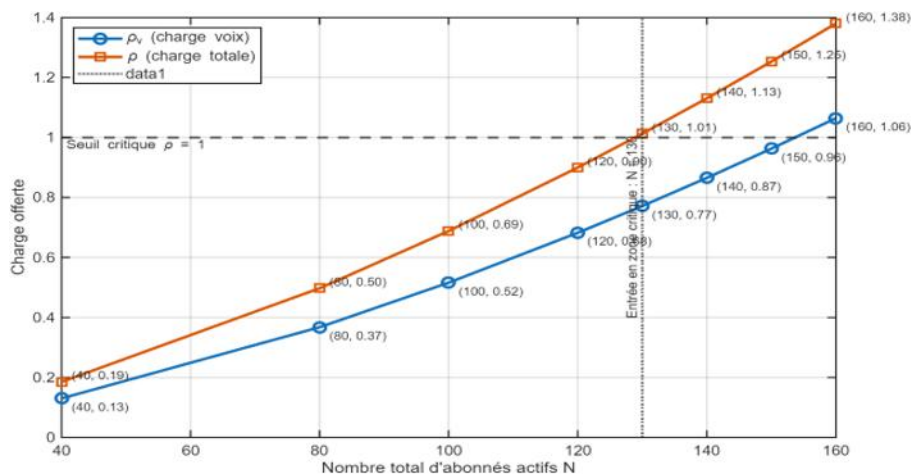


Figure VIII : Évolution comparative de la charge voix et de la charge totale

### Évaluation de la qualité vocale (MOS)

Les résultats sur l'évaluation de la qualité vocale montrent que la qualité de service reste **acceptable** ( $MOS > 3,5$ ) jusqu'à environ 120 abonnés actifs. Au-delà de ce seuil, on observe une dégradation rapide, principalement due à l'augmentation du délai de la file d'attente  $W_{q,v}$ , qui impacte directement le terme  $I_d$ .

Le constat est que, dans un réseau CPL, la qualité perçue de la voix dépend fortement des performances temporelles du système, particulièrement en régime de forte charge.

### Dimension optimale du réseau

Les résultats sur le dimensionnement optimal du réseau en fonction des simulations indiquent que la limite de fonctionnement de notre système hybride se situe dans l'intervalle :

$$80 \leq N_{opt} \leq 120$$

Cet intervalle correspond à un compromis optimal entre la qualité de service attendue, stabilité du système et une exploitation efficace des ressources du réseau. Et donc, au-delà de cette plage, la saturation des mécanismes d'accès et des files d'attente entraîne une dégradation rapide des performances.

## Analyse économique

Ces résultats sur l'analyse économique attestent que le courant porteur en ligne représente une option économiquement viable pour le développement des réseaux de télécommunications, notamment dans les régions où l'installation de la fibre optique jusqu'à l'abonné présente une rentabilité limitée.

## IV. Discussion

Plusieurs éléments déterminants ressortent des résultats obtenus.

Le protocole d'accès au médium défini par la norme **IEEE 1901**, et notamment les mécanismes de report et de priorisation des flux de la voix, joue un rôle central dans la performance globale du système, mais il reste insuffisant en situation de forte charge.

L'analyse montre que le facteur dominant de dégradation des performances est la dynamique de la file d'attente. En effet, contrairement au délai d'accès, le délai de file croît de manière non linéaire à mesure que la charge augmente. Ce comportement est directement lié au second moment du temps de service  $E[S^2]$  dans le modèle **M/G/1**. Ainsi la congestion du système se manifeste principalement par l'accumulation des paquets en file.

Par ailleurs, le système est fortement sensible à la charge globale, caractérisé par le paramètre  $\rho$ . Lorsque ce dernier se rapproche de 1, c'est-à-dire que l'on tend vers la saturation, on a une explosion des délais et une instabilité progressive. Cette dégradation résulte de l'effet combiné des flux voix et données. Il apparaît donc que la performance globale ne dépend pas uniquement du trafic voix. En conséquence, le dimensionnement du réseau doit intégrer simultanément la gestion du MAC, le contrôle de la charge et la stabilité des files.

Dans ce contexte, le dimensionnement du réseau doit impérativement intégrer une approche conjointe prenant en compte la gestion du protocole MAC, le contrôle de la charge globale et la stabilité des files d'attente. Cette approche est cohérente avec les principes de modélisation des systèmes de files d'attente classiques tels que décrits dans les travaux fondamentaux de Takagi, H. (1991).

Enfin, il ressort de l'étude que l'architecture hybride CPL-GPON constitue une solution particulièrement pertinente pour les réseaux d'accès modernes. En combinant la capacité élevée et la faible latence de la fibre optique dans le backbone (GPON) avec la flexibilité et la faible coût de déploiement du courant porteur en ligne (CPL), ce modèle permet d'optimiser simultanément les performances techniques et les coûts d'infrastructure. Cette approche hybride s'inscrit dans les architectures de réseaux d'accès recommandées par les standards de la fibre optique passive, notamment ITU-T G.984.

## V. Conclusion

Cette étude montre que le Courant Porteur en Ligne (CPL) Outdoor, intégré à une infrastructure dorsale GPON, est une solution viable pour la fourniture de services de téléphonie fixe.

Les résultats analytiques et numériques indiquent que la limite opérationnelle du système n'est pas due à la capacité physique du canal, mais à la saturation de mécanismes d'accès au médium et de files d'attente au niveau MAC.

Il est donc recommandé, par prudence, de limiter le nombre d'abonnés actifs à une fourchette de 80 à 120 utilisateurs par poste, en veillant à une stricte priorisation du trafic voix.

Ainsi, le CPL se présente comme une solution complémentaire efficace pour le dernier kilomètre dans les contextes marqués par un déficit d'infrastructures de télécommunications, notamment en Afrique subsaharienne, permettant d'améliorer l'accessibilité aux services, tout en maîtrisant les coûts de déploiement.

## 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]. 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>
- [4]. Golub, G. H., & Van Loan, C. F. (2013). Matrix Computations (4th Ed.). Johns Hopkins University Press.
- [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]. UIT-T (2003). Recommendation G.114 : « Temps De Transmission Unidirectionnel ».
- [7]. UIT-T (2015). Recommendation G.107: The E-Model : A Computational Model For Use In Transmission Planning.
- [8]. Takagi, H. (1991). Queueing Analysis: A Foundation Of Performance Evaluation (Vol. 1: Vacation And Priority Systems). Amsterdam : Elsevier Sciences Publishers.
- [9]. Vlachou, C., Banchs, A., Salvador, P., Herzen, J., & Thiran, P. (2016). Analysis And Enhancement Of CSMA/CA With Deferral In Power-Line Communications. IEEE Journal On Selected Areas In Communications, 34(7), 1978–1991.
- [10]. Shongwe, T., Vinck, A. J. H., & Ferreira, H. C. (2007). A Study On Impulse Noise And Its Models. In Proceedings Of The IEEE International Symposium On Power Line Communications And Its Applications (ISPLC).