



Haute école d'ingénierie et d'architecture Fribourg
Hochschule für Technik und Architektur Freiburg

Pôle TIC - Filière Télécommunication

Projet de Bachelor

2017-2018

La Fibre à la maison bon marché: rendre l'impossible possible !

Rapport du projet

Étudiant : Dufresne Loïc

Mandant : 

Superviseurs : Jacques Robadey
Jean-Frédéric Wagen

Expert : Pierre Morard

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce projet de Bachelor.

Messieurs Jacques Robadey et Jean-Frédéric Wagen, professeurs en télécommunications à la haute école d'ingénierie et d'architecture de Fribourg, pour leur suivi et leur supervision durant l'entier du projet, ainsi que pour leurs précieuses remarques et informations qui m'ont permis d'améliorer le travail.

Monsieur Frédéric Mauron, directeur de la société FTTH-FR et également mandant du projet, pour sa disponibilité, son expérience dans les réseaux d'accès, et ces précieuses informations dont j'ai pu bénéficier pour ce projet.

Monsieur Pierre Morard, qui m'a suivi et supervisé durant le travail en tant qu'expert.

Messieurs Grégory Marthe et Christophe Schaer, pour le prêt du matériel et leur constante disponibilité.

Monsieur Patrick Gaillet, pour avoir répondu à mes questions, pour ces précieux conseils et sa disponibilité.

Pour finir, je tiens tout particulièrement à remercier mes parents, mon frère et mon amie, pour m'avoir soutenu et encouragé tout au long de ces trois années d'études, merci infiniment !

Résumé

FTTH-FR est une société du canton de Fribourg qui a pour mission d'implémenter la fibre optique dans toutes les communes du territoire fribourgeois, autant en ville qu'en campagne. Elle est le fruit d'un partenariat entre l'État de Fribourg et les distributeurs d'électricité du canton. Avec le but, à long terme, d'amener la fibre optique dans toutes les maisons habitées du canton de Fribourg jusqu'au sommet du Moléson, FTTH-FR travaille intensément à cette réalisation de haut niveau, indispensable au développement économique et social de notre région.

Ce projet a des coûts non négligeables, c'est pourquoi FTTH-FR a proposé ce projet de Bachelor à la haute école d'ingénierie et d'architecture de Fribourg afin que nous trouvions des solutions et des alternatives afin de réduire ces coûts.

Mots clés: Réseaux d'accès, FTTH, FTTx, G.Fast, Powerline, Wireless-LAN directionnel, stratégie de déploiement, coût des différentes technologies, potentiel à long terme

Historique du rapport

Version	Étudiant	Tâches	Date
0.1	Loïc Dufresne	Création du document L ^A T _E X	28.05.2018
0.2	Loïc Dufresne	Rendu de la partie introduction	30.05.2018
0.3	Loïc Dufresne	Rendu de la partie analyse technique	12.06.2018
0.4	Loïc Dufresne	Rendu de la partie conception	02.07.2018
0.5	Loïc Dufresne	Rendu de la partie réalisation	04.07.2018
0.6	Loïc Dufresne	Rendu de la partie tests et validations	09.07.2018
0.7	Loïc Dufresne	Rendu de la partie analyse économique	11.07.2018
1.0	Loïc Dufresne	Rendu final du document	13.07.2018

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Contexte	1
1.2	Objectifs	2
2	Analyse technique	3
2.1	État de l'art - FTTH-FR	3
2.1.1	Mission & partenariat	3
2.1.2	Historique	4
2.1.3	Fournisseurs de services	4
2.1.4	État du déploiement	5
2.2	Le canton de Fribourg en chiffres	8
2.3	La fibre optique dans le monde et en Suisse	9
2.4	Réseaux, technologies & méthodes d'accès	12
2.4.1	FTTH (Fiber To The Home)	16
2.4.2	FTTx (Fiber To The x)	21
2.4.3	HFC (Hybrid Fiber Coaxial)	24
2.4.4	PLC (Powerline Communication)	26
2.4.5	WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access)	32
2.4.6	FSO (Free Space Optic)	35
2.4.7	Wireless Point-to-Point	39
2.4.8	Utilisation des terminologies FTTx	39
2.4.9	Comparaison fibre optique & câble cuivre	40
2.4.10	Synthèse	41
2.5	Solutions alternatives pour le réseau de FTTH-FR	43
2.5.1	FTTH PON (Fiber To The Home Passiv Optical Network)	43
2.5.2	PLC (Powerline Communication)	44
2.5.3	FSO (Free Space Optic)	45
2.6	Conclusion de l'analyse technique	47
3	Conception	49
3.1	PLC (Powerline Communication)	50
3.1.1	Équipements	50
3.1.2	Spirent C1	51
3.1.3	Test 1: SpeedTest	55
3.1.4	Test 2: Spirent C1	60
3.2	Conclusion de la conception	64
4	Réalisation	65
4.1	PLC (Powerline Communication)	65
4.1.1	Test 1: SpeedTest	65
4.1.2	Test 2: Spirent C1	71
4.2	Conclusion de la réalisation	78
5	Tests et validations	79
5.1	PLC (Powerline Communication)	79
5.1.1	Test 1: SpeedTest	80
5.1.2	Test 2: Spirent C1	90
5.2	Conclusion des tests et validation	107
6	Analyse économique	109
6.1	Spécifications des zones et des segments d'accès	110
6.1.1	Tableaux et chiffres	111
6.2	Coût des équipements d'un réseau d'accès	112
6.2.1	Fibre optique	114
6.3	Coûts d'un réseau d'accès FTTH P2P	116

6.3.1	Schéma du réseau d'accès en zones urbaines selon les hypothèses fixées	117
6.3.2	Schéma du réseau d'accès en zones rurales selon les hypothèses fixées	118
6.3.3	CAPEX, OPEX et Business Case pour un réseau d'accès FTTH P2P	119
6.3.4	Segments d'accès Inhouse et technologie d'accès PLC	123
6.3.5	Synthèse	125
6.4	Coûts d'un réseau d'accès G.Fast	126
6.4.1	CAPEX, OPEX et Business Case pour un réseau d'accès FTTB + G.Fast	127
6.4.2	Synthèse	131
6.5	Cas concret: liaison FSO entre Charmey et Cerniat	132
6.5.1	Liaison FTTH P2P	133
6.5.2	Liaison FTTH (FSO)	134
6.5.3	Coûts de la liaison pour les deux solutions	138
6.5.4	Coûts du réseau d'accès total pour les deux solutions	140
6.6	Cas concret: Smartmetering en ville de Zurich	143
6.6.1	Volume de données	145
6.6.2	Réseau FTTH P2P	146
6.6.3	Réseau FTTH PON	148
6.6.4	Coûts du réseau Smartmetering	150
6.6.5	Réseau Smartmetering avec location des lignes	152
6.7	Conclusion de la l'analyse économique	153
7	Problèmes	155
7.1	FSO (Free Space Optic)	155
7.2	Équipements, coûts et hypothèses	155
8	Conclusion	157
8.1	Atteinte des objectifs	158
8.2	Perspectives futures	159
8.3	Conclusion personnelle	159
9	Figures	163
9.1	Liste des figures	163
10	Lexique	167
11	Contacts	169
12	Bibliographie	173
13	Annexes	177
13.1	Versions des logiciels	177
13.2	Contenu du CD/DVD	178
13.3	Planning	179

1 Introduction

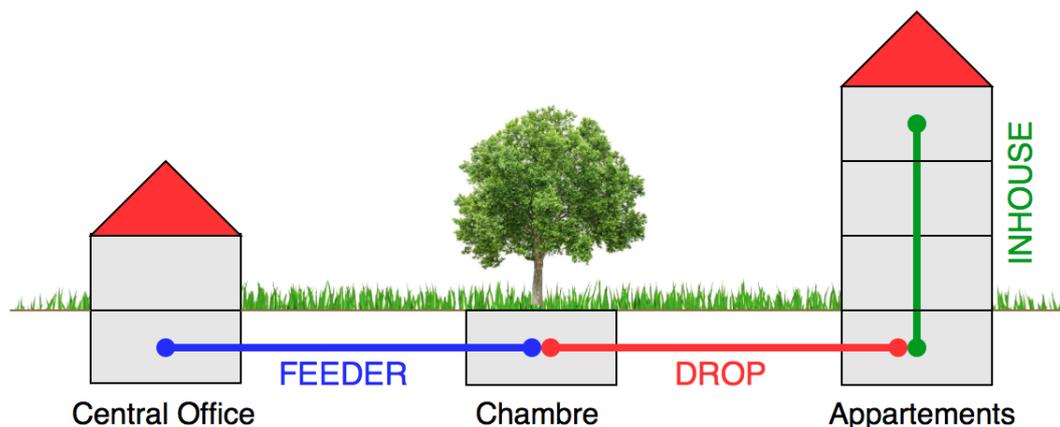
1.1 Contexte

Nous assistons actuellement à une bataille technologique et économique pour l'accès rapide à l'appartement. Si nous ne pouvons pas directement parler de "guerre des tranchées", mais certains aspects n'en sont pas si éloignés. Dans le canton de Fribourg, deux acteurs sont actifs, Swisscom et FTTH-FR. Les deux se sont lancés dans la construction d'un réseau FTTH, mais Swisscom s'est retiré, il y a un peu. Si Swisscom mise sur la technologie G.Fast, FTTH-FR conserve son but original: fibrer tout le canton de Fribourg. Cette stratégie n'est pas évidente, car depuis la fin de la collaboration avec Swisscom, FTTH-FR doit supporter à lui seul tous les coûts d'implémentation.

Il faut donc trouver des solutions limitant ces coûts et elles existent. Ce travail de Bachelor consiste à les chercher, les juger et les proposer. FTTH-FR a manifesté un grand intérêt pour le projet et a donné son accord pour l'accompagner en donnant des inputs et en proposant certaines solutions. Le FTTH peut être remplacé par du FTTx : amener la fibre jusqu'à un endroit proche et continuer avec une technologie meilleur marché. Le "x" peut être une rue proche, un point visible pour des maisons isolées ou le local technique du bâtiment. Les technologies meilleur marché peuvent être câblées comme Powerline, ou non câblées comme Wireless-LAN directionnel ou autres. Des entreprises de la région proposent déjà des solutions et peuvent être contactées durant le travail de Bachelor. Le besoin en capacité actuel et futur, les facteurs stratégiques, politiques et commerciaux (ouverture à la concurrence, possibilités d'évolution et capacité d'innovation pour les services du futur) doivent naturellement être estimés pour juger le potentiel réel des technologies alternatives.

La fibre elle-même peut être amenée jusqu'à l'appartement en réduisant les coûts d'installation. La technologie G-PON le permet en partant avec une seule fibre depuis le central et en installant des splitters permettant de multiplier les fibres jusqu'aux appartements. Les coûts sont ainsi réduits. La stratégie de construction peut aussi être optimisée en choisissant les quartiers, villages optimaux et en déployant la fibre à la demande, c'est-à-dire à la commande d'un service. Le but du projet est ainsi maintenu: connecter tous les utilisateurs le désirant tout en réduisant les coûts de manière importante. Des solutions FSO (Free Space Optic) et WiFi vont aussi être étudiées.

Le réseau d'accès se divise en trois parties, le Feeder, le Drop et le Inhouse. Nous nous concentrerons sur ces trois segments. Le Feeder sera abordé et nous proposerons des solutions innovantes afin d'en réduire les coûts. Le Drop sera plus légèrement abordé, nous parlerons principalement de tirage de câbles optimisés. Le segment Inhouse sera aussi analysé afin de trouver des solutions alternatives pour en réduire les coûts.



Ce projet de Bachelor permet de travailler avec des acteurs clefs de la région, de faire un reviewing actualisé des technologies et d'analyser avec eux les avantages et inconvénients de chaque solution. Elle permet aussi de planifier à long terme le déploiement d'une ou de plusieurs technologies.

1.2 Objectifs

L'objectif principal du projet de Bachelor « La Fibre à la maison bon marché: rendre l'impossible possible ! » est d'analyser et décrire les technologies et méthodes d'accès à Internet, des comparaisons de coûts seront fournies. Des solutions afin de réduire les coûts de la mise en place d'un réseau d'accès FTTH (Fiber To The Home) sur l'ensemble du territoire du canton de Fribourg seront proposées avec une analyse économique détaillée de ces dernières.

L'objectif secondaire est de fournir des comparaisons de coûts entre différentes technologies alternatives à un réseau d'accès FTTH (Fiber To The Home) en étudiant des cas de conception de réseaux réels.

2 Analyse technique

La partie analyse technique de ce projet de Bachelor permet, dans un premier temps, de mieux comprendre la stratégie de l'entreprise FTTH-FR grâce à l'état de l'art. Nous analysons l'état de couverture du territoire Fribourgeois par le réseau de fibres optiques mis en place par FTTH-FR.

Comme le veut le cahier des charges, nous nous intéresserons au réseau d'accès. Dans un second temps, nous décrirons les différentes technologies et méthodes d'accès existantes selon les trois segments du réseau d'accès qui sont le Feeder, le Drop et le Inhouse. Cette partie d'analyse technique comprend des schémas afin de bien comprendre ces technologies et méthodes d'accès, nous définissons aussi des comparaisons de ces éléments avec leurs caractéristiques, leurs avantages et désavantages.

Pour terminer cette partie d'analyse, nous décrivons les différentes solutions d'accès pouvant servir d'alternative à une méthode d'accès de type FTTH (Fiber To The Home). Ces différentes solutions peuvent être une technologie ou une méthode d'accès précise ou un mélange de plusieurs technologies ou méthodes d'accès, ce qui nous permet de relever un vrai challenge.

L'analyse technique ne présente pas de coûts des différentes technologies et méthodes d'accès, l'analyse économique au chapitre 6 présente ces coûts de réalisation dans les détails.

2.1 État de l'art - FTTH-FR

L'état de l'art de ce projet traite de la société FTTH-FR afin de mieux comprendre son fonctionnement. Une partie des informations présentées ci-dessous sont tirées de la présentation [1] faite par Monsieur Frédéric Mauron, directeur de FTTH-FR, à la HEIA-FR l'année passée.

2.1.1 Mission & partenariat

Pour rappel, la mission de FTTH-FR est de: *"construire et exploiter un réseau de fibres optiques FTTH dans l'ensemble du canton de Fribourg, villes et campagnes"* [1]. La société fribourgeoise FTTH-FR est le fruit d'un partenariat entre l'État de Fribourg et les distributeurs d'électricité du canton qui sont Groupe E, Gruyère Énergie et IB-Murten.



ETAT DE FRIBOURG
STAAT FREIBURG



Dans ce partenariat, les actions sont détenues à 75.8% par Groupe E, 12.2% par Gruyère Énergie, 10.6% par l'État de Fribourg et 1.3% par IB-Murten.

Pour démontrer l'envergure du projet, 69'000 bâtiments sont concernés, ce qui fait 150'000 logements ou commerces, pour un investissement total de plus de 500 millions de francs suisses.

2.1.2 Historique

L'histoire de FTTH-FR démarre en 2008, lorsque la société Groupe E lance une étude de coopération avec Swisscom pour la mise en place d'un réseau d'accès. Il s'en suit, une signature entre l'État de Fribourg, Swisscom et Groupe E à l'intention de construire un réseau FTTH dans tout le canton de Fribourg jusqu'en 2027.

Début 2009, des projets pilotes sont lancés en ville de Fribourg et à Neyruz. Puis, en 2010 un premier plan d'affaires est élaboré, ce qui marque le début d'une procédure envers la COMCO (Commission de la concurrence). Durant l'année 2011, présentation aux conseils d'administration des partenaires Groupe E, Gruyère Énergie et IB-Murten. Le plan d'affaires présenté à la COMCO est compatible, préavis positif des conseils d'administration des distributeurs d'électricité concernés et lancement de la procédure politique. Le 13 septembre 2012 est marqué par le soutien unanime du Grand Conseil fribourgeois.

L'année 2012, plus précisément, le 15 novembre 2012 est marqué par la fondation de la société FTTH-FR SA et le 29 novembre par la signature du contrat de coopération avec Swisscom. Début 2013, le déploiement à Fribourg, Marly et plusieurs villages du canton démarre.

Fin 2016, en plein déploiement de la fibre optique dans le canton de Fribourg, Swisscom abandonne le projet et FTTH-FR poursuit seul le déploiement du réseau FTTH cantonal.

2.1.3 Fournisseurs de services

FTTH-FR met son réseau à disposition de tous les fournisseurs de services qui souhaitent l'utiliser selon le principe "Open Access" avec un accès illimité aux fibres optiques à des conditions non discriminatoires. À ce jour, les services pouvant être offerts sur les fibres optiques de FTTH-FR, sont les services des fournisseurs officiels suivants:



Chacun des fournisseurs peut proposer des offres attractives Internet, téléphonie, TV numérique et HD.

2.1.4 État du déploiement

À la fin de l'année 2017, le déploiement de la fibre optique sur le territoire Fribourgeois à bien avancé, plus de 55'000 logements ou entreprises sont connectés à la fibre optique, soit plus d'un tiers du canton de Fribourg.

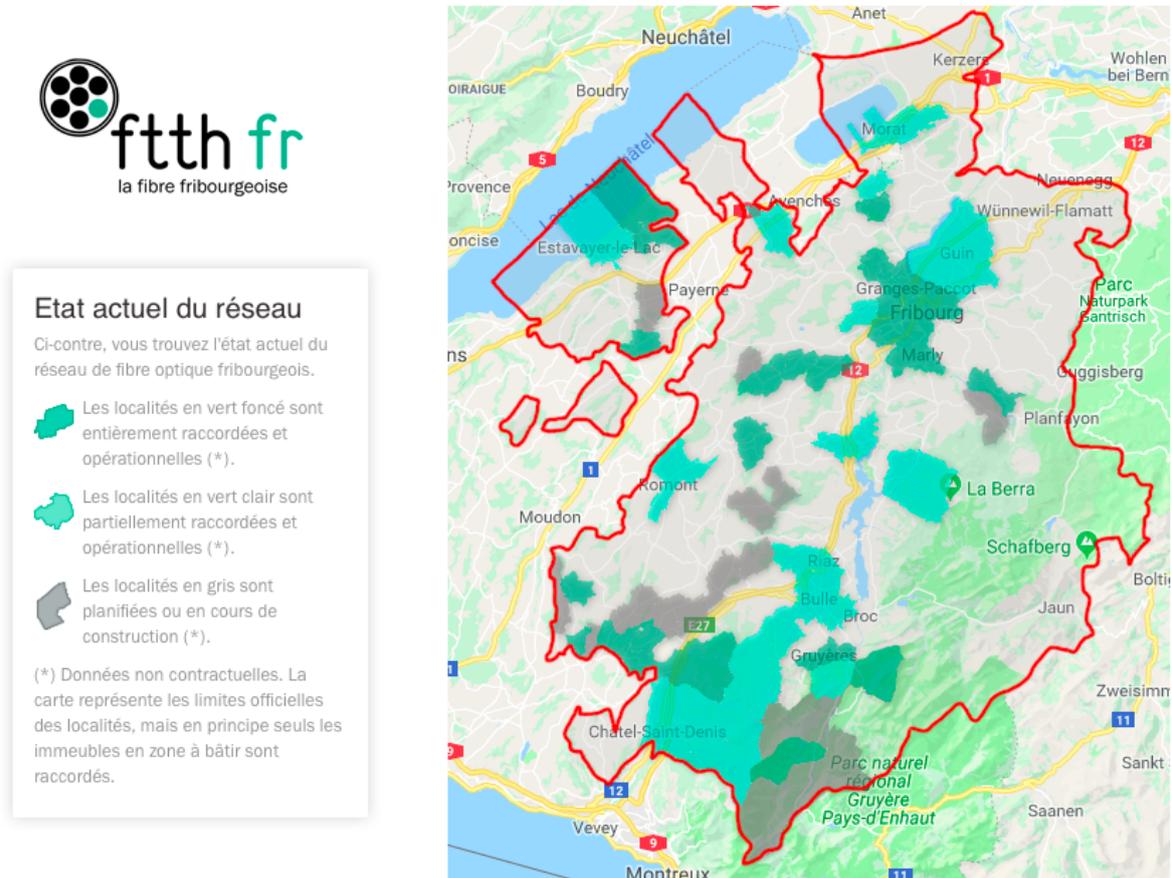


Figure 1 – État du réseau FTTH en juin 2018, source: www.ftth-fr.ch

En juin 2018, le réseau de FTTH-FR comprend 47 CO (Central Office, voir figure 12 pour définition), et 5 CO en construction. Il existe 3 catégories de CO, les grands, les moyens et les cabinets de rue.

Concernant les grands CO, il y en a 10 dans le canton de Fribourg dont 6 pour la ville de Fribourg et agglomération qui desservent environ 50'000 logements ou entreprises.



Figure 2 – Grand CO (Central Office), source: FTTH-FR"

Les clients de FTTH-FR (fournisseurs de services) déposent leurs équipements actifs dans les CO. Dans les CO, au niveau du départ des fibres optiques vers le réseau d'accès, il y a un port pour chaque logement ou commerce afin de garantir une technologie d'accès FTTH (Fiber To The Home) point à point.



Figure 3 – Grand CO (Central Office), source: FTTH-FR

Pour les CO de taille moyenne, il y en a une vingtaine réparti actuellement dans le canton de Fribourg.



Figure 4 – CO (Central Office) de taille moyenne, source: FTTH-FR

Pour finir, il y a les CO de rue (street cabinet), il y en a une vingtaine dans le canton de Fribourg.



Figure 5 – CO (Central Office) de rue (street cabinet), source: FTTH-FR

À noter que dans le réseau de FTTH-FR, les fibres optiques entre les CO et les logements ou commerces (FTTH), ne dépassent pas 10 kilomètres.

2.2 Le canton de Fribourg en chiffres

Le canton de Fribourg c'est 315'000 habitants pour 69'000 bâtiments. Ces bâtiments contiennent 150'000 logements ou entreprises. Le réseau d'accès de FTTH-FR doit donc desservir 150'000 points, ce qui fait 150'000 fibres optiques point à point, plus environ, 69'000 fibres optiques de services point à point pour les bâtiments, afin de créer un réseau d'accès FTTH (Fiber To The Home) ou fibre jusqu'à l'appartement.

Au niveau des superficies du canton, la superficie totale du territoire fribourgeois est de 167'141 kilomètres carrés. Sur cette superficie, 151'612 kilomètres carrés sont inhabités (forêts, lacs, montagnes, zones agricoles). 15'529 kilomètres carrés sont des zones d'habitats et d'infrastructures.

Pour la réalisation de ce projet, nous divisons le canton en deux zones, les zones urbaines qui renferment les villes de plus de 10'000 habitants et les zones rurales. Les zones urbaines contiennent 73'500 habitants (Fribourg avec 38'000 habitants, Bulle avec 23'000 habitants et Villars-sur-Glâne avec 12'000 habitants, et les zones rurales contiennent 241'000 habitants. Pour les zones urbaines, nous obtenons 23% de la population fribourgeoise et pour les zones rurales, 77% de la population.

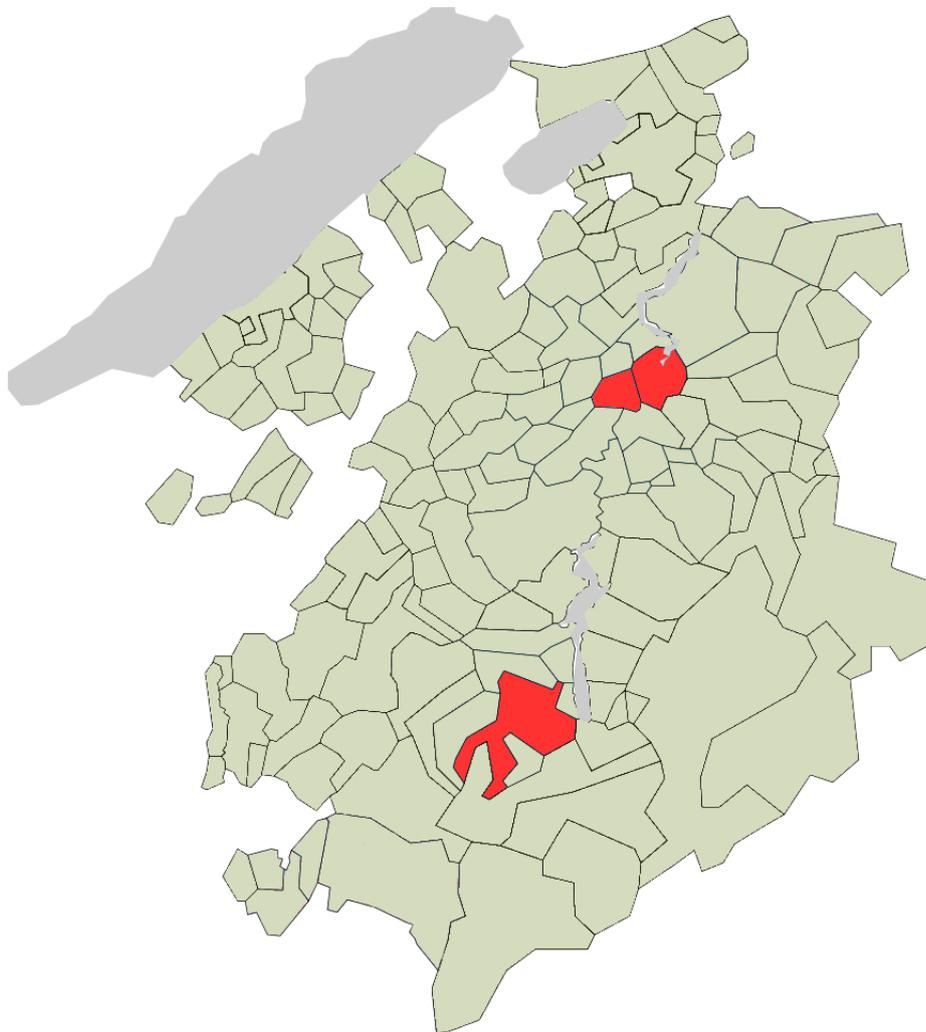


Figure 6 – Zones urbaines et rurales du canton de Fribourg

Les chiffres présentés proviennent du service des statistiques du canton de Fribourg (www.fr.ch) et actualisé en 2018.

2.3 La fibre optique dans le monde et en Suisse

La fibre optique n'a pas pu voir le jour avant l'invention du laser en 1960, mais ce n'est qu'en 1970 que la première fibre optique utilisable par les télécommunications a vu le jour dans les laboratoires de l'entreprise américaine Corning Glass Works.

Une fibre optique est un fil de verre ou de plastique très fin qui permet de conduire de la lumière. Elle est utilisée autant pour des transmissions terrestres que pour des transmissions océaniques. Cette technologie permet des débits symétriques de plusieurs dizaines de Gb/s, ce qui est nettement supérieur que le débit des câbles coaxiaux. Elle permet de transmettre un signal avec des pertes et une dispersion spectrale très faible sur de grandes distances.

Il est intéressant de savoir que le record du débit maximum atteint, en laboratoire avec une fibre optique, est de 10 millions de Gb/s. Ce record a été atteint en 2017 par l'opérateur japonais KDDI, leader des télécommunications en Asie, en collaboration avec la startup française CAILab, qui a fourni les équipements. *"Le record est impressionnant! 10 Pb/s (1 Pétabit = 10'000'000 Gigabit), cela correspond à 30 fois le débit internet mondial ou 500 millions d'Européens qui regardent tous Netflix en 4K en même temps"* [2], explique Jean-François Morizur, PDG de CAILabs. La fibre optique utilisée pour établir ce record est une fibre multimode, combinée d'innovation. En effet, cette fibre possède 19 coeurs et est multimode avec 6 modes.

Il existe deux grands types de fibres optiques, la fibre optique monomode et multimode. La différence entre ces deux types se trouve au niveau de la propagation de la lumière.

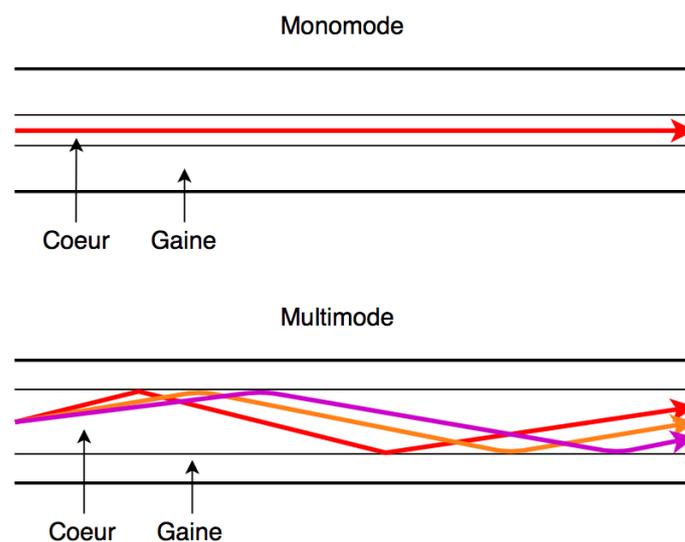


Figure 7 – Fibre optique monomode et multimode

La fibre optique monomode

Les rayons lumineux se propagent en ligne droite dans le cœur très fin de la fibre optique, ils suivent un seul chemin, un seul mode de propagation. Le signal est très peu déformé, car la dispersion du signal est pratiquement nulle. Une fibre monomode offre des performances de 100 Gb/s/km, mais le cœur de la fibre étant très fin, une grande puissance d'émission est requise, ce qui peut engendrer d'importants coûts. Ce type de fibre optique est utilisé pour de grandes distances.

La fibre optique multimode

Les rayons lumineux ne se propagent pas en ligne droite, le cœur de la fibre étant plus large, ils suivent des chemins différents suivant un angle de réfraction, plusieurs modes de propagation selon les longueurs d'onde. Avec ces différents modes de propagation, le signal peut subir une dispersion. Une fibre multimode offre des performances de 1 Gb/s/km. Ce type de fibre optique est moins coûteux que la fibre optique monomode et est utilisé sur de courtes distances.

Depuis les années 1850, des milliers de câbles sont posés au fond des océans afin de connecter les différents pays et continents. De nos jours, des centaines de milliers de kilomètres de fibres optiques sont tirés dans les océans.

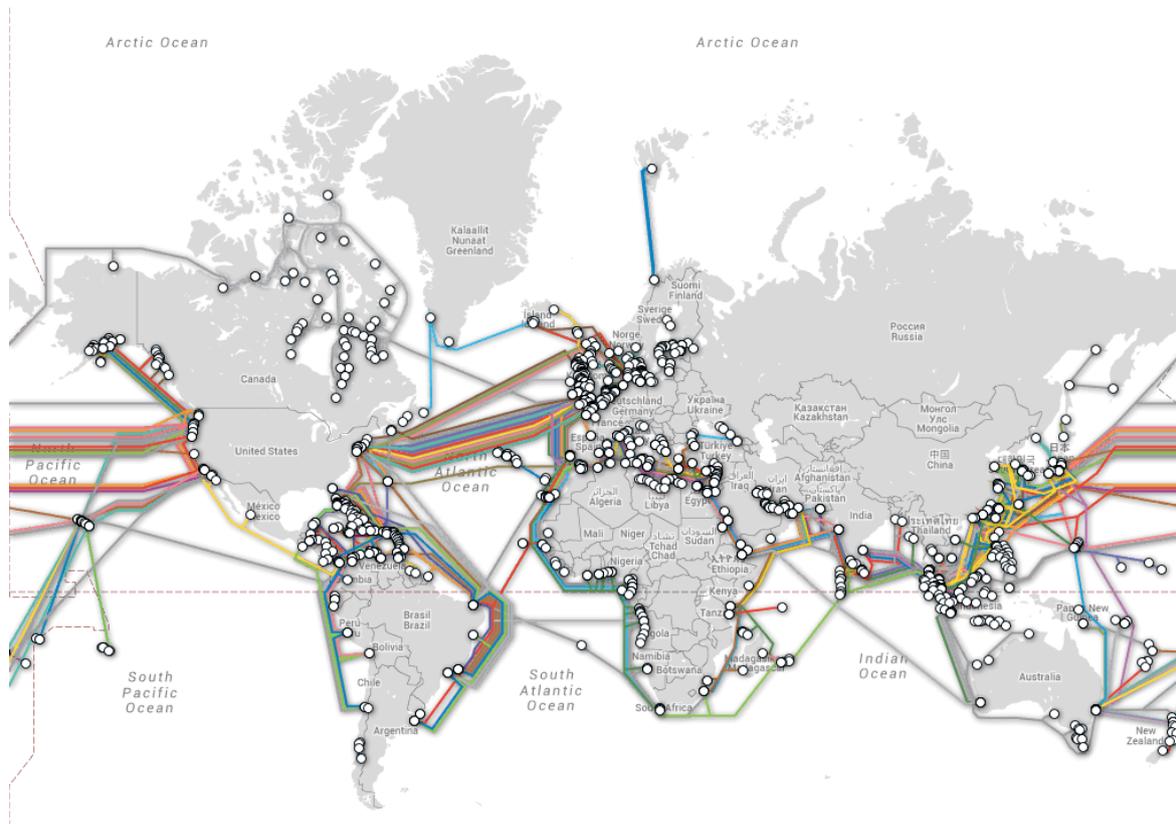


Figure 8 – Réseau de fibres optiques sous les océans, source: www.geek-officiel.com

Plus de 900'000 kilomètres de câbles sont déposés au fond des océans, ce qui représente plus de 22 fois le tour de la Terre, ces câbles transmettent plus de 99% des données internationales. La fibre optique a révolutionné la manière de connecter le monde. Les fibres optiques posées au fond des océans sont typiquement de type monomode.

En Suisse, les réseaux de coeur et métro sont construits en fibres optiques. Pour les réseaux d'accès suisses, la pose de fibres optiques se fait de plus en plus.

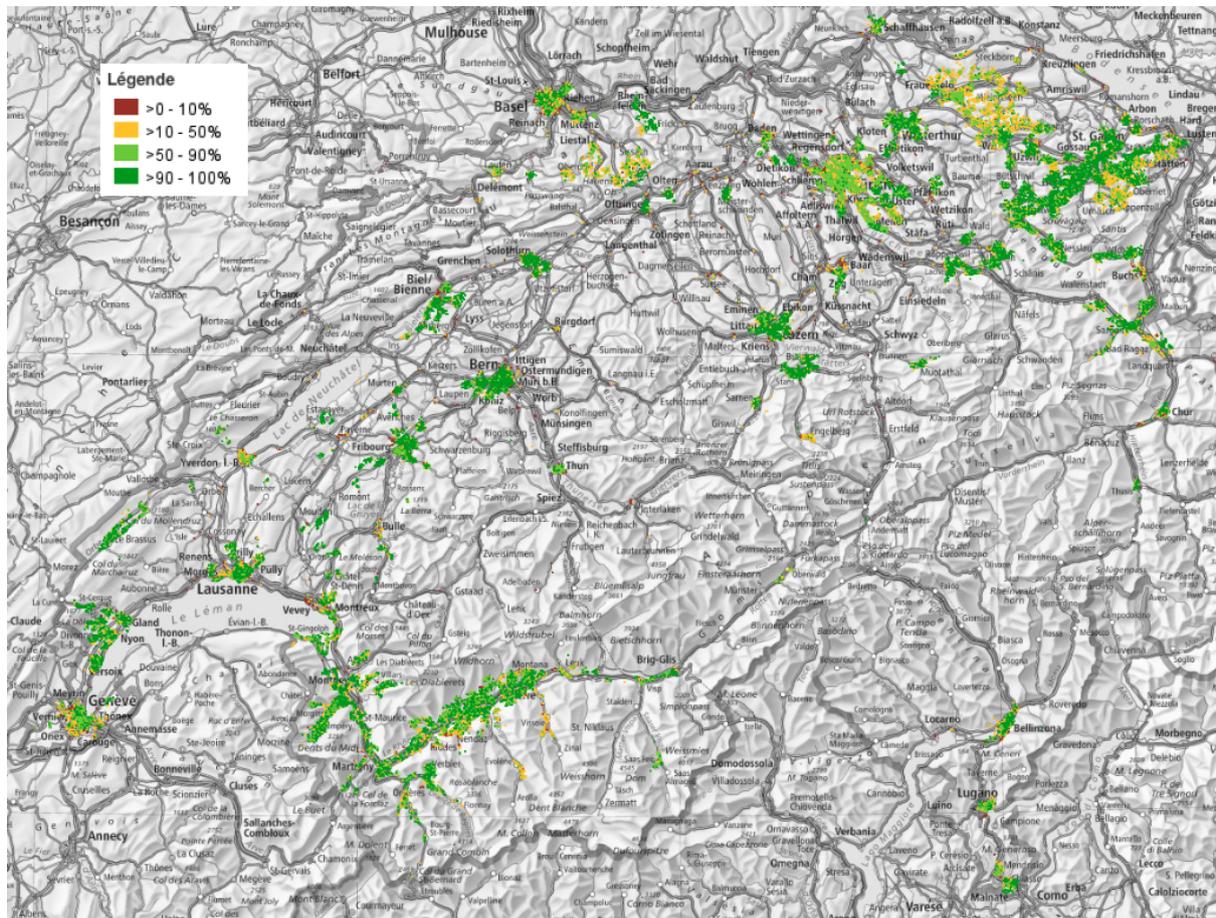


Figure 9 – Réseau d'accès fibrés (FTTH/FTTB) en Suisse, source: www.map.geo.admin.ch

Certains cantons comme le Valais ou Saint-Gall sont beaucoup plus en avance que certains autres cantons concernant les réseaux d'accès FTTH (Fiber To The Home) et FTTB (Fiber To The Building). En Valais, ESR (Énergie Sion Région) développe son réseau FTTH depuis plus de 20 ans, autant en plaine que dans les villages isolés des vallées latérales.

Concernant le canton de Fribourg, nous pouvons voir que les zones desservies par la fibre optique correspondent au réseau de la société FTTH-FR (figure 1). Ce qui est intéressant sur le territoire fribourgeois en comparaison à d'autres cantons, comme le canton de Thurgovie, c'est que pratiquement 90 à 100% des bâtiments sont couverts par une connexion fibrée dans les zones désignées. La fibre optique est donc en grand déploiement sur l'ensemble du territoire Suisse, cette technologie à un bel avenir devant elle.

2.4 Réseaux, technologies & méthodes d'accès

Le réseau d'accès permet aux utilisateurs d'accéder au coeur de réseau, il définit les moyens par lesquels les utilisateurs sont connectés au réseau, il est le lien avec le client. En comparaison avec les réseaux de coeur ou métró, le réseau d'accès est le plus coûteux. Le plus généralement, ce réseau, a une topologie physique en étoile, ou dans certains cas en arbre. Actuellement, le réseau d'accès est en déploiement ou en migration grâce notamment aux grandes évolutions des technologies. Il est basé sur de multiples technologies et méthodes liées, historiquement, à différents services comme les paires torsadées en lien avec la téléphonie, les câbles coaxiaux en lien avec la télévision ou encore les fibres optiques dernièrement.

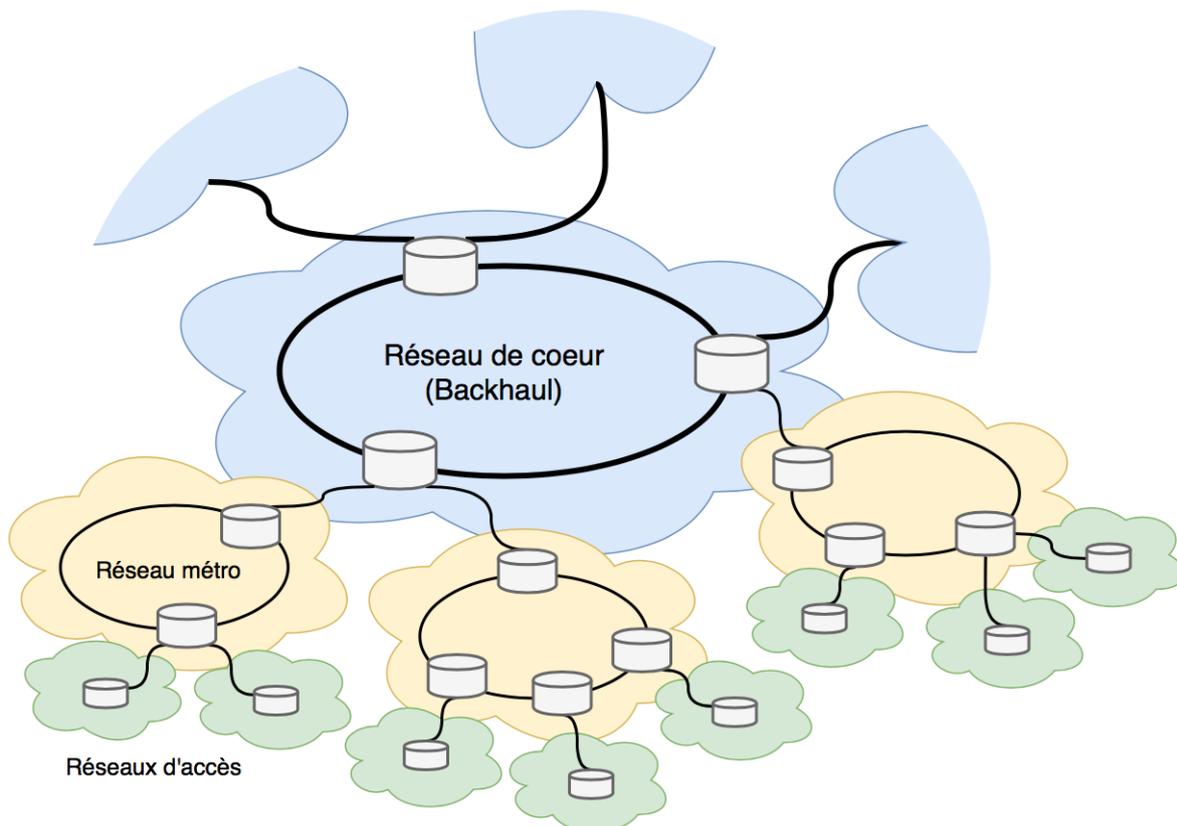


Figure 10 – Segmentation du réseau informatique

Le réseau de coeur (Backhaul) permet les interconnexions avec les réseaux métró nationaux, étrangers et les grands Datacenters. Dans un petit pays comme la Suisse, un réseau de coeur peut couvrir l'ensemble du territoire national.

Le réseau métró permet la liaison entre les nœuds du réseau de coeur et les CO (Central Office) à cheval entre le réseau métró et d'accès. Ce réseau peut représenter, dans le cas de la Suisse, une agglomération ou un canton sur environ 50 kilomètres.

De son côté, le segment réseau qui nous intéresse le plus, le réseau d'accès, est segmenté en trois parties:

1. Feeder
2. Drop
3. Inhouse

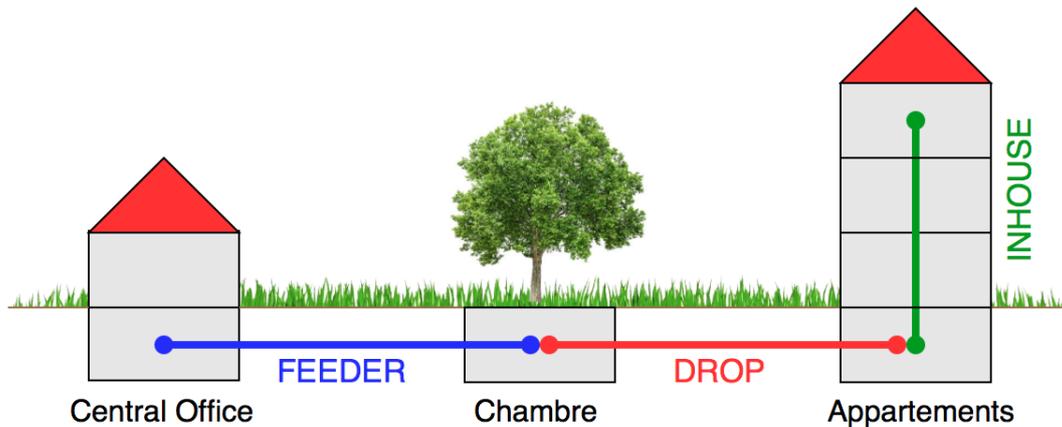


Figure 11 – Segmentation du réseau d'accès

Le Feeder désigne le segment du réseau d'accès entre le CO (Central Office), qui est connecté au réseau métro, et le DP (Distribution Point), qui est le point de distribution connecté au segment "Drop". Ce segment est la propriété de l'exploitant du réseau.

Le Drop désigne le segment du réseau d'accès entre le DP et le point d'entrée du bâtiment ou des clients, il est placé généralement dans la cave de ce bâtiment. Ce segment est la propriété de l'exploitant du réseau.

Le Inhouse désigne le segment du réseau d'accès depuis le point d'entrée du bâtiment jusqu'au coffret multimédia du client comprenant le modem. Ce segment est la propriété du propriétaire du bâtiment et du client.

Différentes technologies peuvent être utilisées pour ces différents segments du réseau d'accès. Les différentes technologies et méthodes pour pouvoir mettre en place le réseau d'accès vont être analysées et présentées dans les prochains sous-chapitres.

Pour une meilleure compréhension des schémas représentant le réseau d'accès présentés dans les prochains sous-chapitres, les équipements des trois segments, en fonction de chaque technologie, sont définis ci-dessous.

CO (Central Office) désigne, historiquement, un centre de commutation d'une compagnie téléphonique dans une zone géographique spécifique, il relie les "boucles locales" du domicile des clients au réseau téléphonique mondial. De nos jours, il est le lien entre les réseaux de métro et d'accès, les fournisseurs de télécommunications viennent s'y connecter afin de pouvoir fournir leurs services et les distribuer sur le réseau d'accès vers les clients.

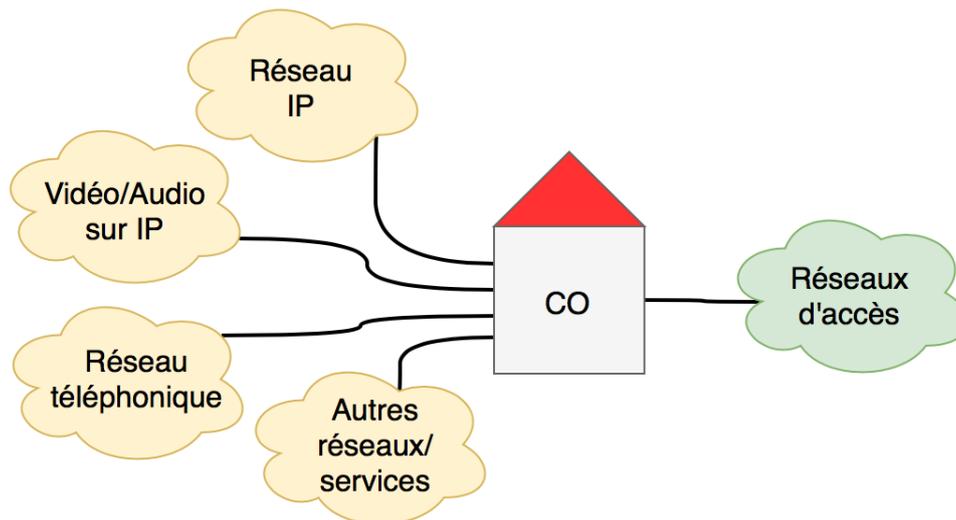


Figure 12 – CO (Central Office)

DP (Distribution Point) désigne une chambre souterraine ou "manhole". Cette chambre peut contenir plusieurs équipements différents, en fonction de la technique utilisée afin de mettre en place le réseau d'accès. Ces équipements sont définis dans les prochains sous-chapitres, en fonction de la technique utilisée. Le DP marque la limite entre les segments Feeder et Drop.

BEP (Building Entry Point) désigne le point d'entrée du bâtiment pour une fibre optique et assure la transmission du câble externe, il est généralement placé dans la cave d'un bâtiment. La connexion est constituée soit d'une épissure par fusion soit d'une autre connexion optique. Le BEP peut contenir plusieurs équipements différents, en fonction de la technique utilisée afin de mettre en place le réseau d'accès. Ces équipements sont définis dans les prochains sous-chapitres, en fonction de la technique utilisée. Le BEP marque la limite entre les segments Drop et Inhouse.

FD (Floor Distribution) désigne la colonne montante dans un bâtiment permettant de distribuer les câbles du BEP aux appartements, dans les différents étages. À l'époque, cette colonne n'était pas vraiment pensée pour ajouter des câbles ou modifier le câblage de manière aisée entre les différents étages. C'est pourquoi la migration vers de nouvelles technologies comme la fibre optique est souvent difficile à mettre en place et coûteuse dans un ancien bâtiment (segment Inhouse). Actuellement, lors de la construction de nouveaux bâtiments, la fibre optique est posée, de base, entre le BEP et les différents appartements en attente d'une connexion fibrée depuis le DP jusqu'au BEP.

OTO (Optical Telecommunications Outlet) désigne une prise optique de raccordement fixe sur lequel aboutit la fibre optique. En général, il y a une seule prise optique par appartement. Elle présente l'interface optique entre l'équipement connecté et le raccordement au réseau internet. Il est placé dans le coffret multimédia de l'opérateur. Cet équipement est utilisé dans un réseau d'accès FTTH.

ONT (Optical Network Termination) désigne une terminaison de réseau optique. Cet équipement est utilisé dans un réseau d'accès FTTH, il assure l'adaptation entre le signal optique et électrique. Il est placé dans le coffret multimédia de l'opérateur.

CPE (Customer Premise Equipment) désigne un équipement de télécommunications situé dans un appartement ou dans l'entreprise d'un client. L'équipement est un terminal connecté au réseau d'accès du fournisseur. CPE désigne, généralement, les appareils comme des modems, boîtiers décodeurs, adaptateurs réseau domestique et passerelles d'accès Internet. Il peut inclure des décodeurs de télévision, une ligne numérique du client, des stations de base VoIP, des combinés téléphoniques ou tout autre matériel personnalisé utilisé par le fournisseur de services particulier.

TO (Telecommunication Outlet) désigne une prise de raccordement fixe sur lequel aboutit le câble de cuivre. Il peut être comparé à un OTO pour la fibre optique.

CTO (Coaxial Telecommunication Outlet) désigne une prise de raccordement fixe sur lequel aboutit le câble coaxial. Il peut être comparé à un OTO pour la fibre optique.

DPU (Distribution Point Unit) désigne un équipement distribution actif permettant de prendre une connexion à fibre optique et à la redistribuer sur des lignes de cuivre existantes, jusqu'à 48 lignes de cuivre peuvent être couplées à une fibre optique.

Tous ces éléments sont vus dans les schémas suivants, c'est pourquoi il faut bien retenir leurs définitions.

2.4.1 FTTH (Fiber To The Home)

Un réseau d'accès FTTH (Fiber To The Home) ou fibre jusqu'à l'appartement désigne un réseau de télécommunication physique où l'exploitant du réseau met à disposition une fibre optique qui se termine à l'appartement du client. L'ensemble du réseau d'accès est câblé en fibres optiques ce qui permet d'assurer un accès à internet à très haut débit pour le client.

Il existe principalement deux techniques pour mettre en place cette méthode d'accès FTTH:

1. P2P (Point 2 Point)
2. PON (Passive Optical Network)

La fibre optique permet un débit bien supérieur aux offres faites par les fournisseurs d'accès, ce qui en fait une technologie très évolutive. Les fournisseurs d'accès segmentent leurs offres et proposent différentes gammes de débit à différents prix. Par exemple, grâce à la fibre optique, certains fournisseurs d'accès proposent des offres avec un débit allant de 50Mb/s (Up/Down), 100Mb/s (Up/Down), 200Mb/s (Up/Down), 500Mb/s (Up/Down), 1Gb/s (Up/Down) ou même 10Gb/s (Up/Down) dernièrement. Bien entendu, ces offres sont valablement pour les clients connectés à la fibre optique, mais l'arrivée de la fibre optique a permis aux fournisseurs d'accès d'étoffer leurs offres en comparaison avec les offres faites aux clients connectés au réseau via un câble en cuivre, par exemple.

Tous ces débits théoriques sont à mettre en regard avec la bande passante disponible pour relier le réseau d'accès au réseau de coeur et les capacités du réseau de coeur lui-même.

Les avantages de la fibre optique sont:

- Latence faible
- Perte de signal faible sur de longues distances
- Débits très élevés et symétriques (mêmes débits en Up/Down)
- Insensibilité aux perturbations radioélectriques
- Entretien moins coûteux que d'autres types de câblages

La fibre optique connaît beaucoup d'avantages en comparaison aux autres types de câblages. En plus de cela, la fibre optique, en elle-même, est bon marché, mais le grand désavantage est le coût très important des travaux de génie civil pour sa mise en place. Les travaux de génie civil et la connectique représentent un investissement conséquent dans le cadre du déploiement d'un réseau en fibres optiques.

Les deux techniques pour mettre en place une connexion FTTH vont maintenant être présentées et schématisées.

P2P (Point 2 Point)

Un réseau d'accès FTTH P2P désigne une connexion point à point, une fibre optique unique et non partagée pour un bâtiment, du CO au BEP.

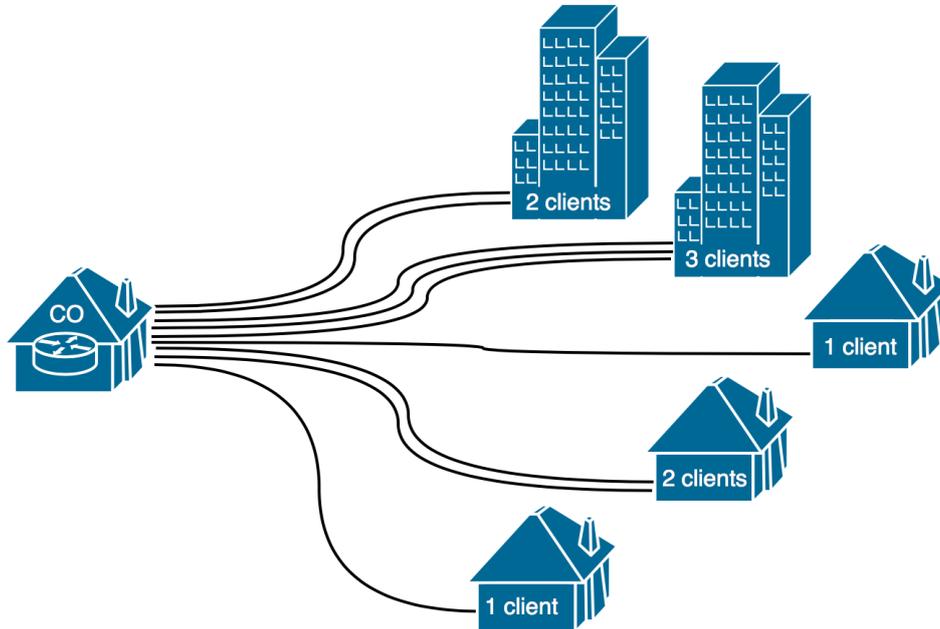


Figure 13 – Schéma d'un accès FTTH - P2P (Fiber To The Home - Point 2 Point)

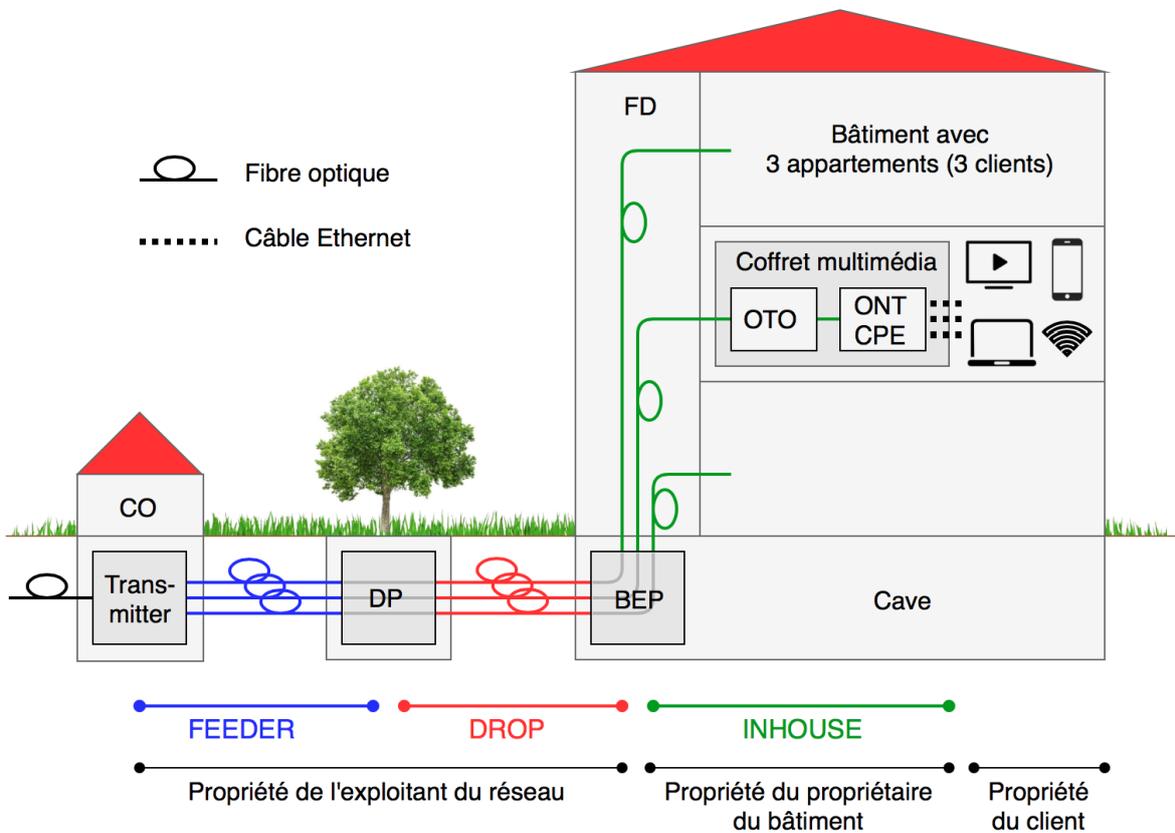


Figure 14 – Schéma d'un accès FTTH - P2P (Fiber To The Home - Point 2 Point) avec équipements

En se référant au précédent schéma, les seuls équipements actifs de cette architecture sont le Transmitter placé dans le CO et le ONT placé dans le coffret multimédia de l'appartement.

Les avantages d'un réseau d'accès FTTH P2P par rapport à un réseau d'accès FTTH PON sont:

- Sécurité plus élevée au niveau de la confidentialité des données, pas besoin de mettre en place un système de cryptage des données (fibre non partagée)
- Évolution plus facile vers des débits plus élevés (fibre non partagée)
- Accès illimité à la couche physique)

Les désavantages d'un réseau d'accès FTTH P2P par rapport à un réseau d'accès FTTH PON sont:

- Coûts au niveau du CO plus élevés (plus de terminaisons de fibres optiques dans le CO)
- Pose de fibres optiques plus contraignante si l'on passe par exemple par les égouts (plus de fibres optiques à poser)

La société FTTH-FR est tournée vers cette manière de faire, proposer une fibre optique unique et non partagée pour tous les clients du canton de Fribourg. Au niveau du débit pour chaque utilisateur, cette technique offre la plus grande capacité. Cette technique d'accès est aussi la plus coûteuse.

En général, dans le canton de Fribourg et en Suisse, avec cette technique d'accès de FTTH P2P, une introduction avec quatre fibres optiques est réalisée chez l'abonné. Par exemple, deux fibres optiques sont destinées au premier fournisseur d'accès et les deux autres fibres optiques sont destinées au second fournisseur d'accès. Les deux fournisseurs d'accès ont leur propre CO et avec l'exemple d'un client, les deux fournisseurs d'accès tirent leurs deux fibres optiques depuis leur CO jusqu'au DP commun, ensuite les quatre fibres sont tirées parallèlement du DP au client.

Pour le segment Inhouse construit sans Swisscom, la société FTTH-FR tire un câble de quatre fibres optiques pour un abonné, une fibre optique est à disposition des clients (fournisseurs de services) de FTTH-FR et les trois autres fibres optiques ne sont pas utilisées.

Pour le segment Inhouse construit en coopération avec Swisscom, par exemple au Schönberg à Fribourg, il y a une introduction à quatre fibres optiques, dont deux pour FTTH-FR (une seule soudée au BEP), ce qui permet d'accéder aux services des fournisseurs de services partenaires à FTTH-FR, et deux autres fibres optiques pour Swisscom.

PON (Passive Optical Network)

Un réseau d'accès FTTH PON désigne une connexion point à multipoint, une fibre optique est partagée entre plusieurs bâtiments. Jusqu'à 128 ou 256 abonnés peuvent être regroupés sur une seule fibre optique.

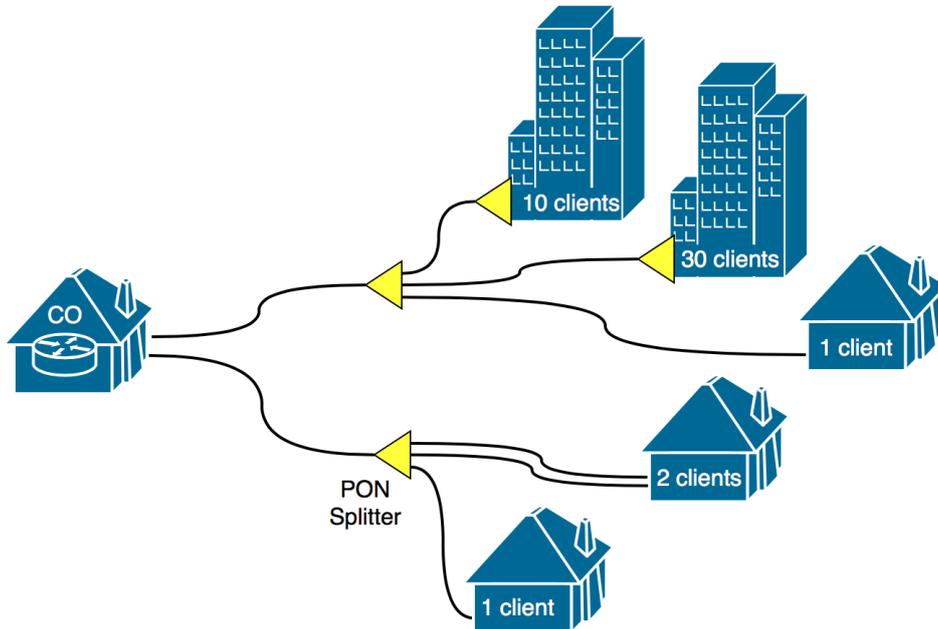


Figure 15 – Schéma d'un accès FTTH - PON (Fiber To The Home - Passive Optical Network)

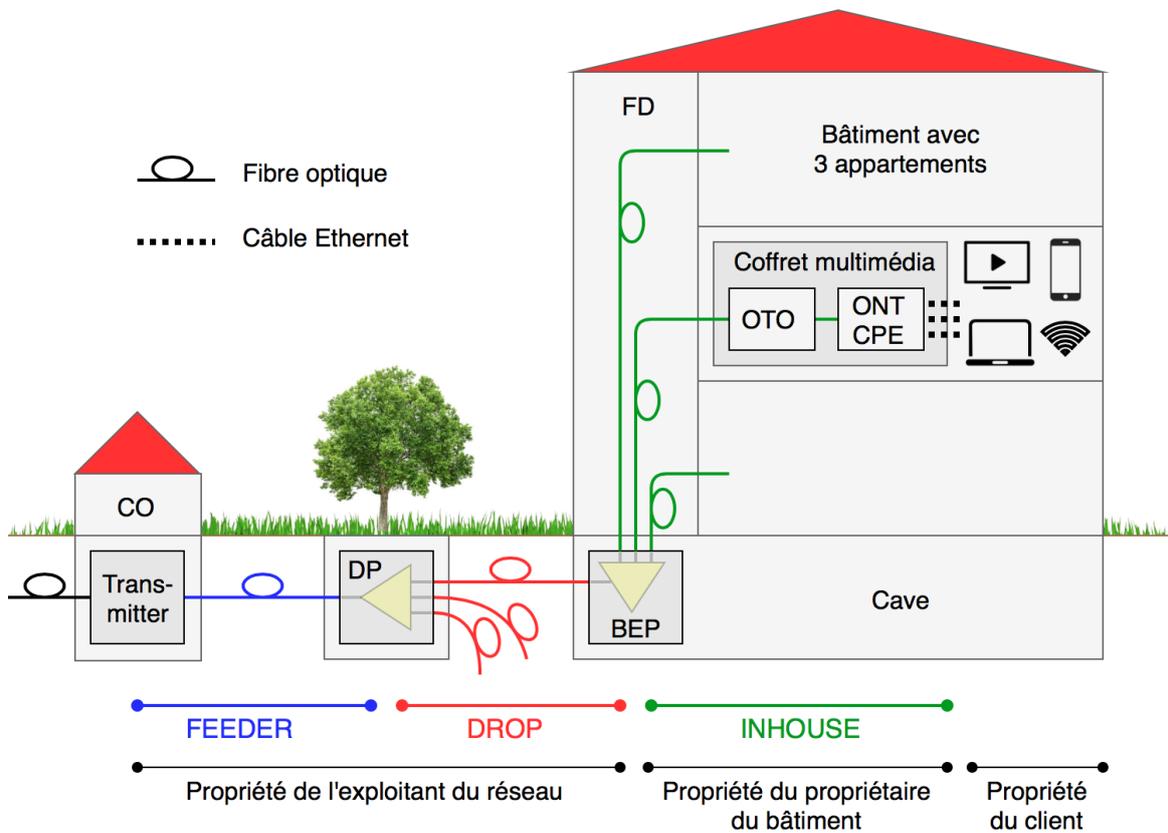


Figure 16 – Schéma d'un accès FTTH - PON (Fiber To The Home - Passive Optical Network) avec équipements

En se référant au précédent schéma, une seule fibre optique est mise en place entre le CO et le DP. Le DP est équipé d'un système de couplage passif, ou PON Splitter, qui permet de dupliquer le signal de la fibre optique connecté au reste du réseau sur les fibres optiques allant aux clients, dans le sens inverse, il associe les deux flux optiques provenant des clients sur la fibre optique reliant le reste du réseau. Ce procédé s'effectue grâce à un substrat en quartz. Bien entendu, il peut y avoir plusieurs PON Splitter à la suite, comme dans le DP et le BEP. Les seuls équipements actifs de cette architecture sont le Transmitter placé dans le CO, et le ONT placé dans le coffret multimédia de l'appartement, les PON Splitter sont des équipements passifs. Deux à trois PON Splitter à la suite est acceptable entre le CO et l'abonné, plus il y a de PON Splitter, plus la puissance est divisée. Les PON Splitter peuvent être placés dans les DP ou les bâtiments.

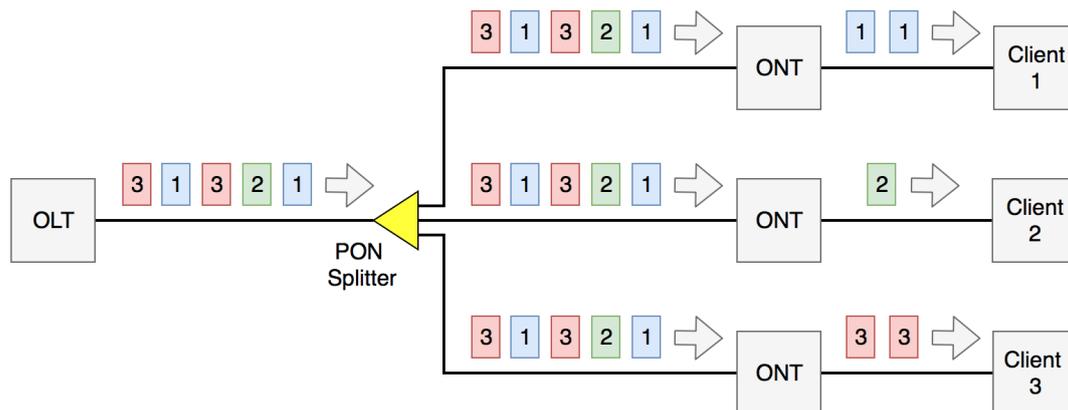


Figure 17 – Schéma d'un accès FTTH - PON (Fiber To The Home - Passive Optical Network) avec un système de couplage passif ou PON Splitter

Le OLT (Optical Line Termination) désigne l'équipement de terminaison de la fibre optique du côté réseau et le ONT (Optical Network Termination) désigne l'équipement de terminaison de la fibre optique du côté client. Le ONT permet de filtrer les flux entrants et sortants destinés au client vu qu'une seule fibre transporte les flux multiplexés de plusieurs client, il assure aussi l'encapsulation des trames du client afin de les émettre sur la fibre optique partagée au moment autorisé.

Les avantages d'un réseau d'accès FTTH PON par rapport à un réseau d'accès FTTH P2P sont:

- 128 à 256 clients peuvent être regroupés sur une seule fibre optique grâce au multiplexage (fibre partagée)
- Coûts au niveau du CO moins élevés (moins de terminaisons de fibres optiques dans le CO)
- Pose de fibres optiques moins contraignante si l'on passe par exemple par les égouts (moins de fibres optiques à poser)
- Couverture géographique plus grande pour le même coût et retour sur investissements plus rapide (moins de fibres optiques à poser)

Les désavantages d'un réseau d'accès FTTH PON par rapport à un réseau d'accès FTTH P2P sont:

- Évolution moins facile vers des débits plus élevés (fibres optiques partagées)
- Chiffrements de données indispensables (fibres optiques partagées)
- Maintenance d'une fibre optique concerne plus de clients (fibres optiques partagées)
- Mise en place de PON Splitter (coûts supplémentaires)
- Plus contraignant pour les fournisseurs de services, pas d'accès illimité à la couche physique, nécessite de se coordonner pour l'allocation de longueurs d'onde ou la co-utilisation des services en couche 2)

Swisscom étudie de près la technique du FTTH PON comme réseau d'avenir.

2.4.2 FTTx (Fiber To The x)

Contrairement à la fibre jusqu'à l'appartement (FTTH) vu précédemment, le FTTx peut avoir un bon nombre d'autres significations, FTTB (Fiber To The Building ou fibre jusqu'au bâtiment), FTTC (Fiber To The Curb ou fibre jusqu'au trottoir), FTTN (Fiber To The Node ou fibre jusqu'au répartiteur), et bien d'autres.

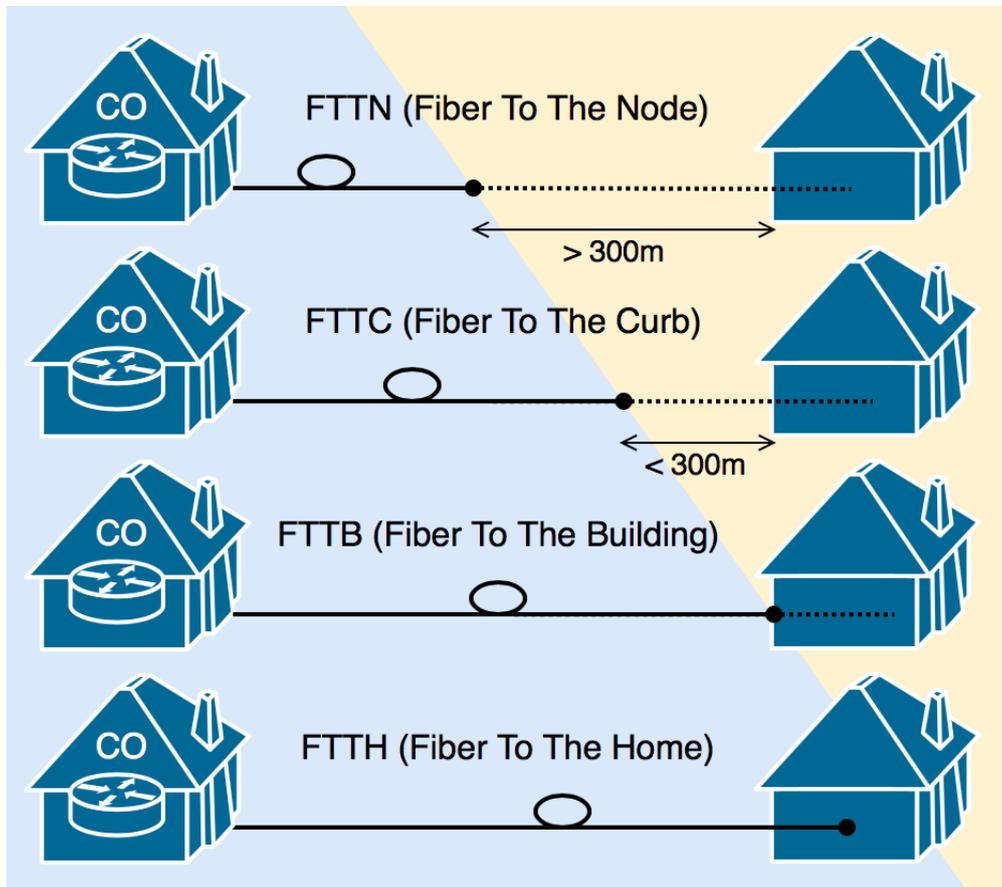


Figure 18 – Schéma d'un accès FTTx

La notion FTTx veut que la fibre optique soit tirée jusqu'à un certain point stratégique, une certaine zone donnée ou un équipement spécifique. Plus la fibre optique est tirée près du client final, plus ce dernier bénéficie d'une bonne qualité de service, surtout en ce qui concerne le débit de sa connexion. Une fois la connexion physique à fibre optique terminée, d'autres types de câbles en cuivre prennent le relais comme des paires torsadées (téléphonie) ou des câbles coaxiaux (télévision). Le débit offert par la fibre optique ne dépend pas de sa distance, en revanche, le débit dépend des derniers mètres de câbles cuivre qui peuvent affaiblir le signal s'ils sont trop longs. C'est pourquoi les opérateurs réseau essaient d'amener la fibre optique le plus près possible des bâtiments, afin de réduire cette distance pour que le débit soit le plus haut possible. L'utilisation des paires torsadées ou des câbles coaxiaux est une bonne astuce, car en général ces derniers sont déjà existants, les coûts sont donc drastiquement réduits..

Mettre en place des techniques d'accès FTTx permet de réduire les coûts et surtout les délais de déploiement contrairement à une technique d'accès FTTH. Bien entendu, il faut trouver le juste milieu entre les différents critères. Avec une technologie d'accès FTTH, les capacités maximums des fibres optiques n'étant jamais atteintes, mettre en place une technologie d'accès FTTx est une bonne alternative.

Plusieurs techniques pour mettre en place une connexion FTTx vont maintenant être présentées et schématisées. À noter que l'utilisation de ces terminologies n'est pas vraiment précise et décrite, chaque opérateur les utilise à leur manière, surtout en ce qui concerne les derniers mètres en câble cuivré.

FTTB (Fiber To The Building)

Un réseau d'accès FTTB (Fiber To The Building) ou fibre jusqu'au bâtiment est une technologie d'accès consistant à tirer une fibre optique jusque dans chaque bâtiment, un bâtiment pouvant contenir plusieurs clients, et de terminer la connexion, soit environ les 50 à 100 derniers mètres en utilisant les câbles coaxiaux de la télévision ou les paires torsadées du réseau téléphonique grâce à la technologie G.Fast.

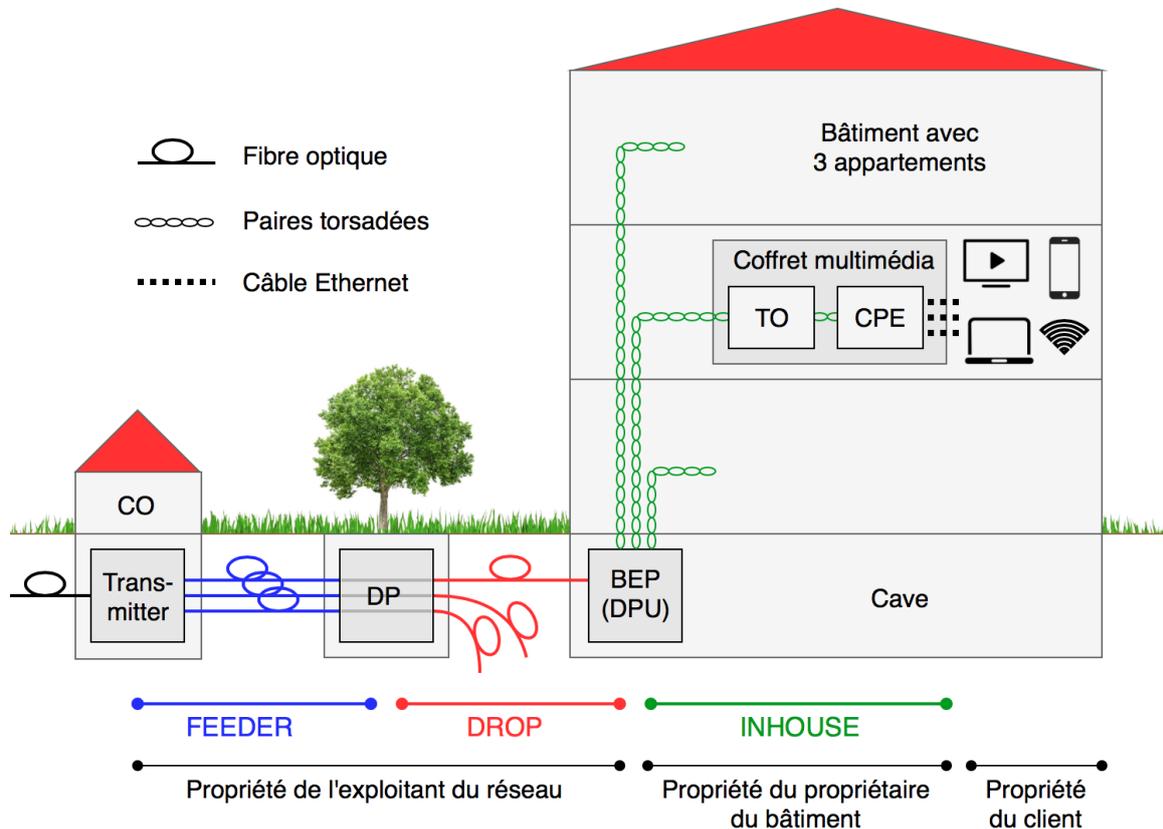


Figure 19 – Schéma d'un accès FTTB & G.Fast sur paires torsadées

En se référant au précédent schéma, une seule fibre optique est tirée jusque dans le bâtiment (BEP). Avec cette architecture, le BEP comprend un équipement actif contrairement aux technologies d'accès FTTH. Cet équipement est le DPU qui permet de coupler la fibre optique avec des câbles en cuivre. Le fait de finir la connexion dans le bâtiment avec les câbles de cuivre du réseau téléphonique depuis le DPU s'appelle la technologie G.fast. Le gros avantage est que les paires torsadées existent déjà ce qui permet de réduire considérablement les coûts dans la partie Inhouse du réseau d'accès. Avec cette technique d'accès, le G.Fast est utilisé pour les clients d'un même bâtiment, ce qui permet de raccourcir au maximum la longueur de connexions sur les paires torsadées. De plus, les paires torsadées appartiennent au client et non à un autre fournisseur d'accès.

Il y a plusieurs inconvénients au fait d'introduire dans le réseau d'accès des éléments actifs. Il faut assurer l'alimentation en électricité de ces équipements, l'accès à ces équipements peut aussi être problématique, des coûts de maintenance plus élevés sont engendrés et il y a aussi la démultiplication des équipements actifs.

Un réseau d'accès FTTB associé à la technologie G.Fast permet de proposer un débit de plusieurs centaines de Mb/s avec des coûts nettement plus bas que la fibre optique jusqu'à l'appartement (FTTH). La clé de cette architecture est d'utiliser les lignes déjà existantes. Dans une architecture FTTB, le DPU est placé dans le BEP du bâtiment, mais le DPU peut être placé avant le bâtiment avec certaines autres architectures comme FTTS ou FTTC. Mais comme déjà cité, plus les lignes de cuivre sont longues, plus le débit est bas.

Approche	Distance [m]	Débit [Mb/s]
FTTB	50	2'000
	100	1'000
FTTS / FTTC	200	200
	300	150
FTTN	500	100

Figure 20 – Débits théoriques proposés avec une technique FTTx & G.Fast sur paires torsadées

Avec une technique G.Fast, FTTB & G.Fast est le meilleur compromis entre le coût de la mise en place du réseau d'accès, le débit offert et la rapidité de déploiement de ce réseau d'accès. Malheureusement, la connexion n'étant plus fibrée de bout en bout, le débit offert n'est plus symétrique et d'autres critères ne sont plus respectés non plus.

Swisscom met en place actuellement G.Fast comme extension à son réseau d'accès FTTS et FTTB sur le territoire Suisse. Il est d'ailleurs le premier opérateur européen à mettre en place la technique G.Fast. Cet opérateur propose même des débits allant jusqu'à 500 Mb/s avec G.Fast sur son réseau d'accès FTTS grâce à une plage de fréquences plus élevée sur les lignes de cuivre.

FTTC (Fiber To The Curb)

Un réseau d'accès FTTC (Fiber To The Curb) ou fibre jusqu'au trottoir est une technologie d'accès consistant à tirer une fibre optique jusqu'au DP. Le DP étant placé sous le trottoir devant le ou les bâtiments concernés, à maximum 300 mètres, et finir la connexion jusqu'aux clients avec des câbles de cuivre (paires torsadées ou câbles coaxiaux). À 300 mètres, le débit des câbles de cuivre est nettement réduit, 150 Mb/s pour des paires torsadées. L'idéal est que le DP se situe à 100 mètres du ou des bâtiments, pour avoir des débits jusqu'à 1 Gb/, mais dans ce cas, peut-on toujours parler de terminologie FTTC ?

FTTS (Fiber To The Street)

Un réseau d'accès FTTS (Fiber To The Street) ou fibre jusqu'à la rue est une technologie d'accès consistant à tirer une fibre optique jusqu'au DP. Le DP étant placé sous la route devant le ou les bâtiments concernés, à maximum 200 mètres, et finir la connexion jusqu'aux clients avec des câbles de cuivre (paires torsadées ou câbles coaxiaux). À 200 mètres, le débit des câbles de cuivre peut atteindre jusqu'à 500 Mb/s.

FTTN (Fiber To The Neighbourhood)

Un réseau d'accès FTTN (Fiber To The Neighbourhood) ou fibre jusqu'au voisinage est une technologie d'accès consistant à tirer une fibre optique jusqu'au quartier et terminer la connexion vers les clients avec ces câbles coaxiaux. La fibre optique se termine à plus de 300 mètres des bâtiments, ce qui fait que le débit n'est pas vraiment adéquat.

Nous reviendrons sur ces terminologies en conclusion de ce chapitre.

2.4.3 HFC (Hybrid Fiber Coaxial)

Un réseau d'accès HFC (Hybrid Fiber Coaxial) ou réseau combinant la fibre optique et les câbles coaxiaux. Cette technologie permet d'utiliser le réseau câblé de télévision existant.

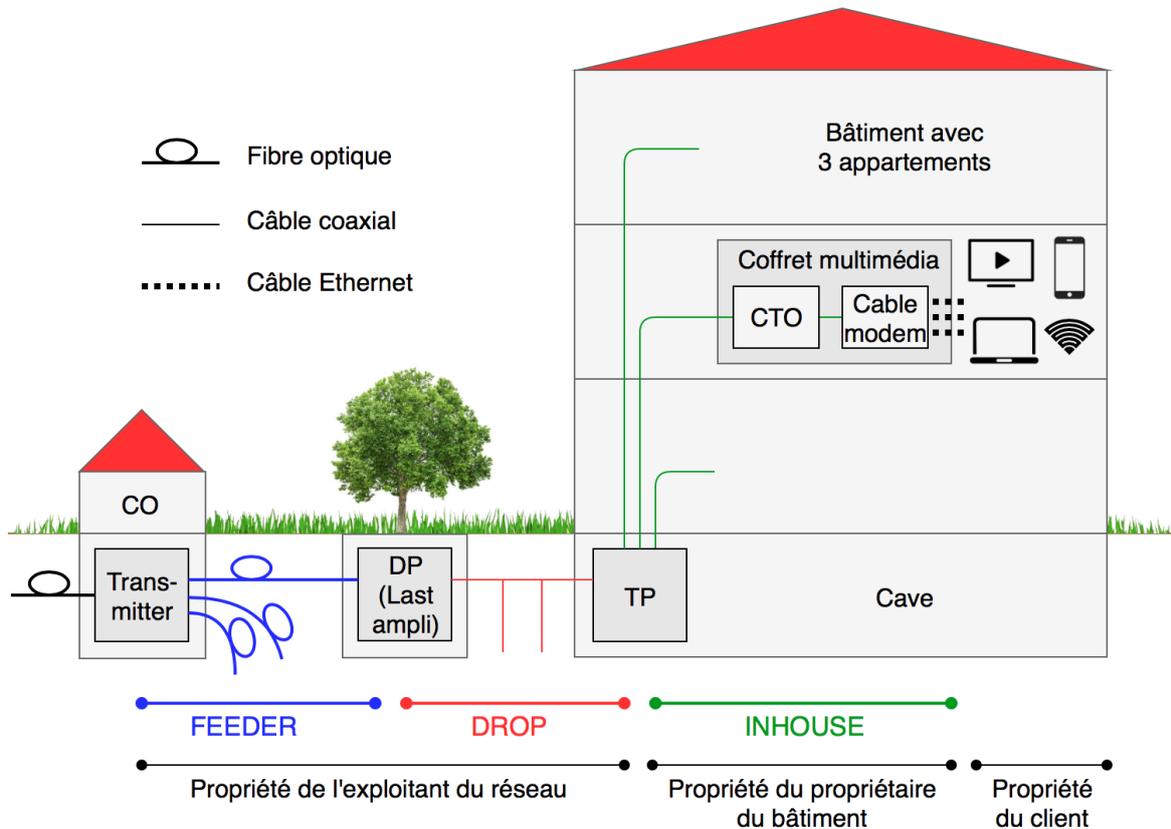


Figure 21 – Schéma d'un accès HFC

En se référant au précédent schéma, une fibre optique est tirée jusqu'au DP où se trouve un équipement actif permettant de convertir le signal optique en signal électrique sur le câble coaxial. La ligne coaxiale déjà existante se divise en sous-branches (arbre) afin d'atteindre les bâtiments. L'introduction déjà existante dans le bâtiment, le câble coaxial arrive au TP, qui ne comprend pas d'équipement actif, et se divise en fonction des clients dans le bâtiment. Bien entendu, plus le DP est proche du bâtiment, plus les débits sont hauts, mais les coûts sont nettement réduits avec cette manière de faire, car comme avec les paires torsadées, les câbles coaxiaux existent déjà.

Un câble coaxial peut contenir des amplificateurs ou non, à noter que les amplificateurs sont des équipements en plus et ils peuvent perturber le signal.

HFC peut aussi être combiné aux terminologies FTTx.

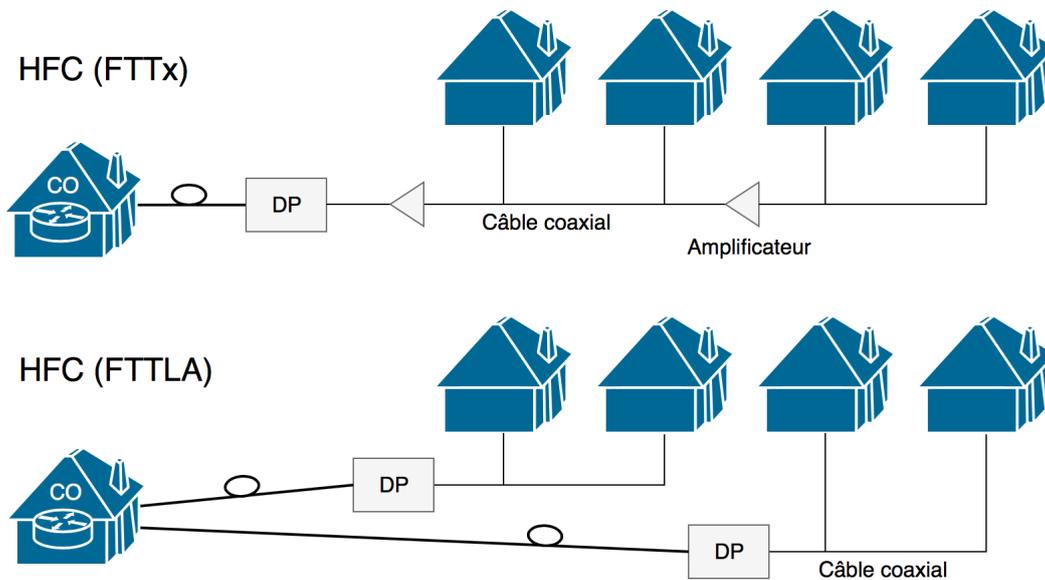


Figure 22 – Schéma d'un accès HFC en mode FTTx et FTTLA (depuis le dernier amplificateur)

Le réseau d'accès HFC (FTTS, FTTC, FTTN, ou autres) peut contenir des amplificateurs sur les lignes coaxiales.

Le réseau d'accès FTTLA (Fiber To The Last Amplifier) ou fibre jusqu'au dernier amplificateur est une technologie d'accès consistant à tirer une fibre optique jusqu'au dernier amplificateur des câbles coaxiaux, et terminer la connexion vers les clients avec ces câbles coaxiaux. Dans ce cas, nous ne pouvons pas vraiment parler de distance, tout dépend de l'emplacement du dernier amplificateur des câbles coaxiaux. Cette manière de faire est plus adéquate, car la terminaison de la fibre optique est plus proche des bâtiments, ce qui permet des débits plus élevés.

UPC et d'autres câblo-opérateurs déploient la technologie d'accès HFC.

2.4.4 PLC (Powerline Communication)

Un réseau d'accès PLC (Powerline Communication) ou communication par ligne électrique désigne le transport des données sur un conducteur qui est utilisé simultanément pour le transport de l'énergie électrique ou la distribution d'énergie électrique dans les bâtiments.

Le principe consiste à superposer, au courant alternatif des lignes électriques, un signal à plus haute fréquence. Ce second signal se propage sur le réseau électrique et peut être reçu et décodé à distance. Ainsi le signal PLC est reçu par tout récepteur PLC de même catégorie se trouvant sur le même réseau électrique.

Deux approches de cette technologie sont envisageables au niveau d'un réseau d'accès de télécommunication. Dans ce projet, elles sont définies premièrement comme une approche longue/moyenne distance (Feeder et Drop) et deuxièmement comme une approche courte distance (Inhouse).

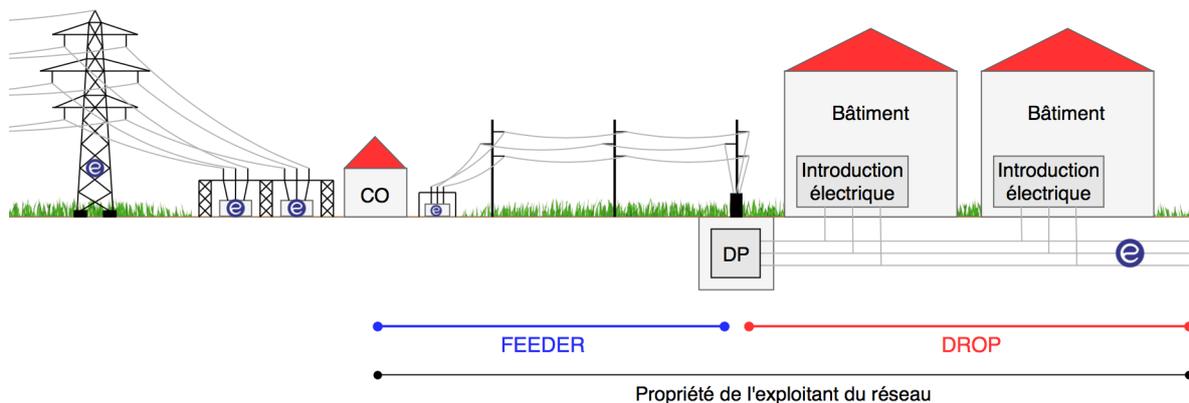


Figure 23 – Schéma d'un accès réseau PLC à longue/moyenne distance (Feeder et Drop)

En se référant au précédent schéma, une approche longue/moyenne distance est présentée (Feeder et Drop). Cette approche PLC utilise les lignes électriques à moyenne/basse tension. Le CO est placé dans une station de transformation, le signal provenant du CO est superposé sur les lignes électriques sortant dans cette station de transformation, ces lignes électriques se rendent dans les différents quartiers. Dans le schéma, la ligne électrique à moyenne/basse tension entre dans un DP, ou chambre diverse, et le signal provenant du CO continue sur les lignes électriques souterraines afin d'être introduit dans les bâtiments. Une variante non souterraine peut aussi être envisagée, tout dépend de la zone en question, dans une zone urbaine les lignes électriques à moyenne/basse tension sont la plupart du temps enterrées alors que dans une zone rurale les lignes électriques à moyenne/basse tension sont encore souvent aériennes.

Cette approche PLC sur longue distance est intéressante au niveau des infrastructures, car les lignes électriques du canton de Fribourg appartiennent à Groupe E, Gruyère Énergie, IB-Murten ou encore EW-Jaun, et au niveau des segments Feeder et Drop, aucun coût supplémentaire n'est à prendre en compte vu que les lignes électriques sont déjà existantes.

À noter que dans les bâtiments, le signal en provenance du CO est séparé des lignes électriques avant le compteur du bâtiment, car ce dernier perturbe fortement le signal.

Cependant, sur une longue distance (Feeder et Drop) le signal et le débit du réseau d'accès peuvent être perturbés. C'est pourquoi des variantes sont envisageables, comme effectuer du FTTDP et continuer avec du PLC, c'est-à-dire tirer une fibre jusqu'au DP et terminer la connexion jusqu'aux bâtiments avec les lignes électriques basse tension. La distance en PLC est plus courte et seulement le Drop est concerné. Encore une fois, tout dépend des zones et des distances entre les points importants du réseau d'accès et les longueurs du réseau d'accès.

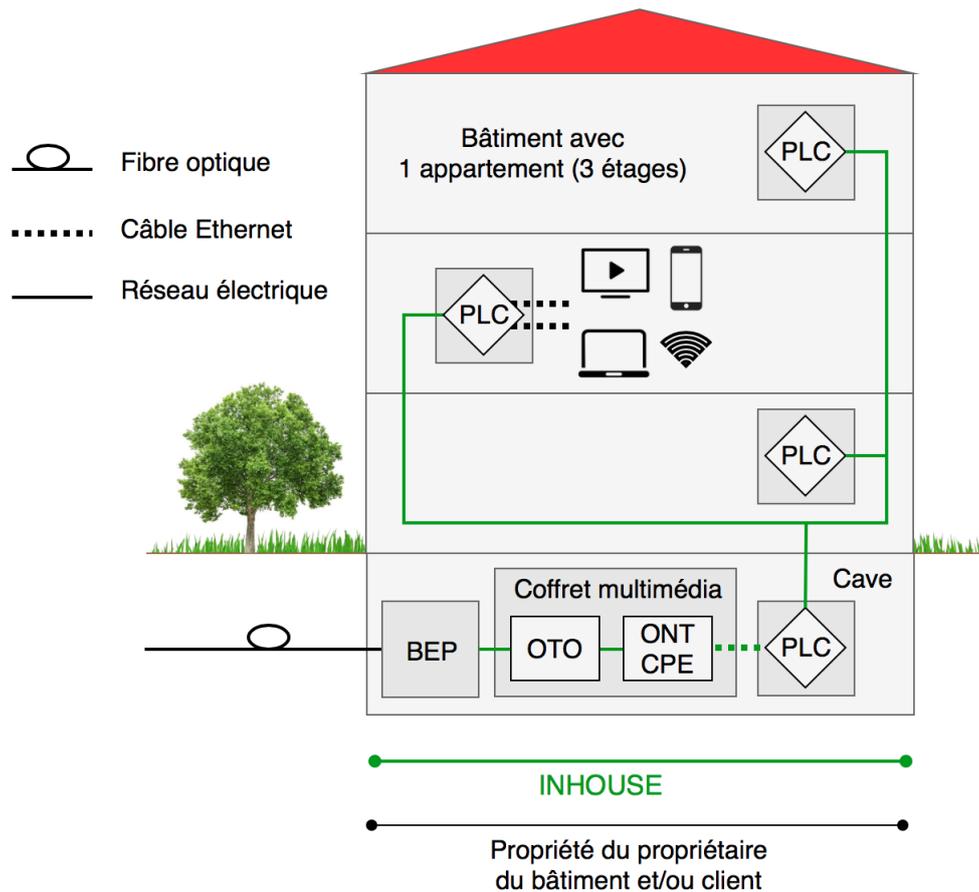


Figure 24 – Schéma d'un accès réseau PLC à courte distance (Inhouse) pour 1 client

En se référant au précédent schéma, une approche courte distance est présentée (Inhouse). Cette approche PLC est destinée à un bâtiment et pour un seul client. L'introduction dans le bâtiment est faite avec une fibre optique et tous les équipements actifs se trouvent à l'introduction de la connexion dans le bâtiment. Le réseau dans le bâtiment est construit grâce aux câbles électriques, un PLC est placé après le CPE ou modem. Le CPE est connecté au modem et branché à une prise électrique, puis des équipements PLC sont placés dans le bâtiment, ce qui permet de couvrir tout le bâtiment du client. Cette technique permet d'éviter des coûts de pose de fibres optiques dans le bâtiment.

Il existe un grand nombre d'équipements PLC sur le marché, nous nous sommes penchés sur un produit en particulier, un produit de dernière génération de la marque Devolo.



Figure 25 – Équipements PLC Devolo "dLAN® 1200+ WiFi ac", source: www.devolo.ch

Ce produit a retenu toute notre attention, car les performances sont très élevées. En effet, le "dLAN® 1200+ WiFi ac" permet de couvrir tout un bâtiment sans devoir réaliser de travaux ou de pose de câbles.

Deux types de boîtiers "dLAN® 1200+ WiFi ac" sont à mettre en place. Le premier (élément de gauche sur la figure 25) se place à côté du modem et permet de faire le lien entre le modem et le réseau électrique grâce à son unique port GigabitEthernet. Ce premier équipement ne crée pas de WiFi, car le modem, en général, le crée.



Figure 26 – Connexion entre la fibre optique et le réseau électrique

Le second boîtier (élément de droite sur la figure 25) se place n'importe où dans le bâtiment du client. Il peut y avoir plusieurs de ces boîtiers placés dans le bâtiment et ils permettent de créer un réseau WiFi, grâce à la création de groupe entre ces équipements avec le software fourni. Ils sont aussi équipés de deux ports GigabitEthernet afin de connecter par câble certains terminaux comme un serveur, un ordinateur fixe ou une télévision.



Figure 27 – Connexion entre le réseau électrique et les terminaux

Comme cité précédemment, le réseau PLC de Devolo transmet le signal du modem dans toutes les pièces du bâtiment via le réseau électrique 220 V, les performances de cet équipement Devolo sont très hautes et intéressantes. En effet, ces équipements assurent un débit maximum de 1.2 Gb/s sur le réseau PLC (Ethernet: 10/100/1000 Mb/s et PLC 200/500/600/1200 Mb/s), grâce à la technologie MIMO (Multiple-Input Multiple-Output). Cette technologie est une technique de multiplexage utilisée dans les réseaux sans fil. Le WiFi créé par les équipements Devolo est disponible sur 2,4 et 5 GHz. Bien entendu, pour le client, son débit maximum est en relation avec le service qu'il a souscrit, s'il a une connexion à 500 Mb/s, le débit de son réseau PLC sera de 500 Mb/s maximum.

La technologie range+ permet de transmettre le signal sur la phase, la terre et le neutre d'un même segment, ce qui assure un signal haut débit constant sur des segments de câble jusqu'à 300 mètres. Un cryptage automatique (128 Bit AES) est aussi assuré pour la sécurité et le protocole utilisé est CSMA/CA (via le réseau électrique). Le mécanisme WiFi Move Technology permet de connecter automatiquement plusieurs équipements Devolo pour créer un réseau WiFi dans tout le bâtiment.

La question que nous nous posons sur ces équipements Devolo, est le fait que dans un bâtiment, plusieurs phases découpent le réseau électrique, devons-nous donc respecter les phases et brancher les équipements Devolo sur la même phase ? Nous avons contacté la société Devolo et ces derniers nous assurent que grâce au saut de phase à haute fréquence, les signaux sont répartis sur toutes les phases du réseau électrique. En revanche, le saut à haute fréquence peut engendrer une atténuation et entraîne des pertes de performance du signal. Le client n'a donc pas besoin de modifier son réseau électrique.

Le courant circulant sur le réseau électrique utilise une fréquence de 50 Hz et le signal entre les équipements PLC sur le réseau électrique utilise une fréquence de 2 à 68 MHz. La technologie PLC superpose au signal du courant électrique un autre signal à plus haute fréquence de 2 à 68 MHz.

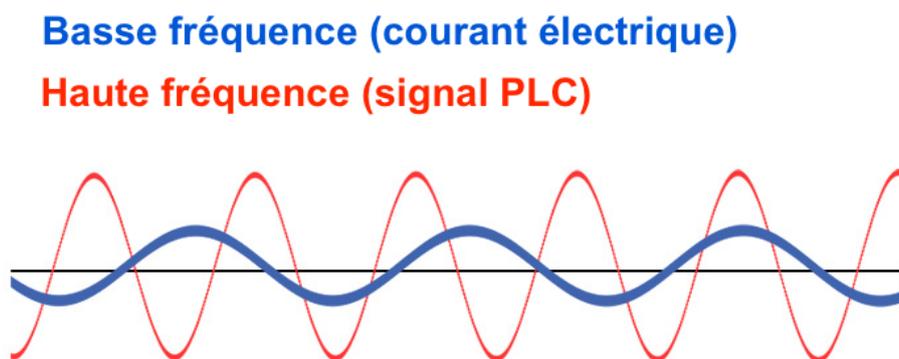


Figure 28 – Superposition du signal basse fréquence du courant électrique et du signal haute haute fréquence des équipements PLC

La fréquence de 50 Hz est filtrée et éliminée sur les équipements PLC lors de la réception des signaux depuis le réseau électrique 220 V. En revanche, la tension de 50 Hz est utilisée pour alimenter les équipements PLC.

Le débit maximum de la technologie PLC étant de 1.2 Gb/s, nous nous sommes aussi renseignés sur le débit descendant (Download) et ascendant (Upload). La société Devolo nous informe que les débits peuvent varier. En effet, le courant électrique allant dans un sens peut influencer les débits descendants et ascendants. Sur de courtes distances, de quelques mètres, le débit est symétrique, mais sur de plus longues distances, de quelques centaines de mètres, le débit n'est plus symétrique et est influencé par le sens du courant électrique.

La dernière approche présentée pour la technologie PLC, à courte distance, démontre une infrastructure PLC pour un bâtiment à trois étages, mais appartenant à un seul client.

La même approche, mais pour un bâtiment avec plusieurs client a été pensé dans le schéma suivant.

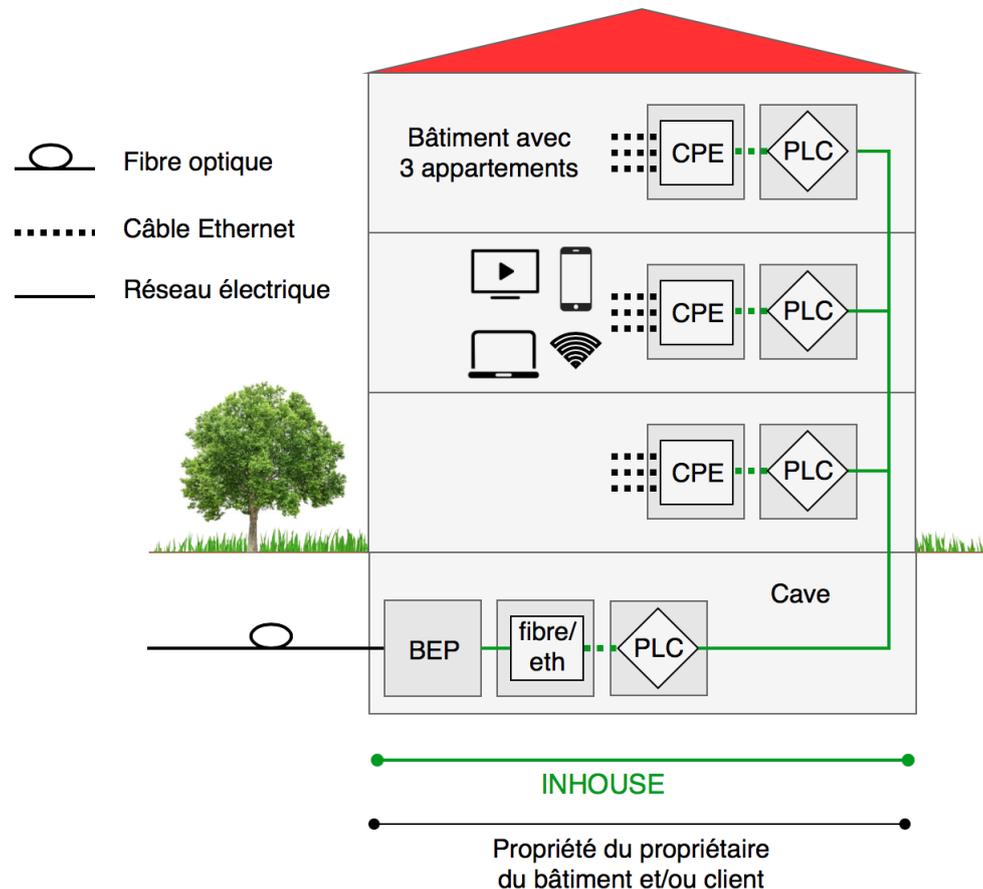


Figure 29 – Schéma d'un accès réseau PLC à courte distance (Inhouse) pour 3 client

En se référant au précédent schéma, l'approche PLC sur courte distance a été adaptée au fait qu'il y ait plusieurs clients par bâtiments. À l'introduction de la fibre optique, il n'y a plus le CPE, mais un convertisseur fibre optique/câble Ethernet, le câble Ethernet étant directement branché à l'équipement PLC. Le réseau électrique est utilisé pour transmettre le signal vers les appartements où sont placés d'autres équipements PLC, permettant de transmettre le signal à leurs CPE respectifs.

Bien entendu avec cette technique, le débit est divisé entre tous les clients. Cette approche peut être délicate, car il faut bien connaître le réseau électrique et éviter les compteurs électriques s'il y en a pour chaque appartement, car ces derniers peuvent fortement perturber le signal. Dans ce cas, les équipements PLC ne doivent pas fournir de WiFi vu que le CPE se trouve après le PLC.

Cette approche est intéressante et théoriquement réalisable, mais il faudrait pouvoir tester une telle installation afin d'avoir des résultats, pour en faire une conclusion.

Une infrastructure PLC peut, bien sûr, être intégrée à toutes autres sortes de technologies ou méthodes d'accès.

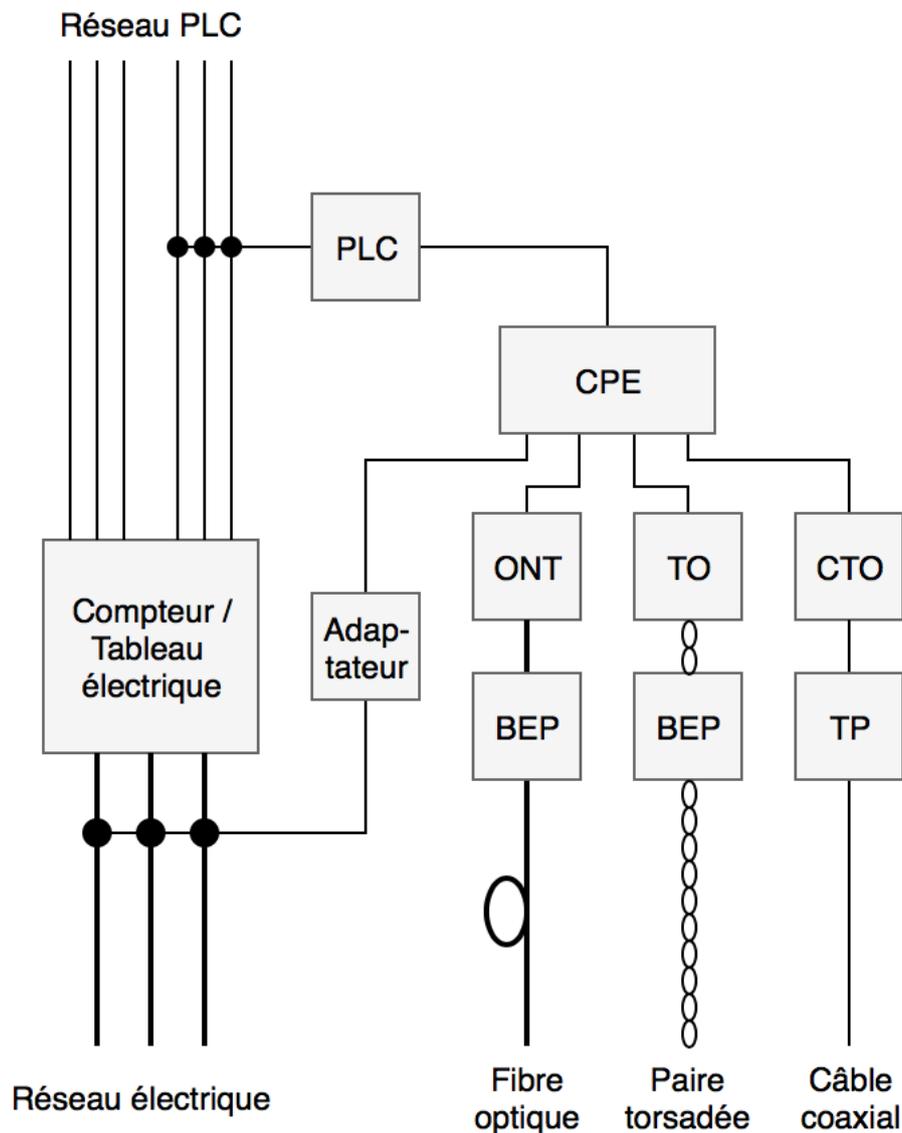


Figure 30 – Schéma l'intégration d'un réseau PLC à d'autres technologies ou méthodes d'accès

En se référant au précédent schéma, toutes les technologies et méthodes d'accès présentées sont intégrées à un réseau PLC. Certaines manières de faire ne sont pas forcément optimal au niveau des performances. Le débit du réseau PLC, dans le bâtiment, sera plus performant avec une introduction en fibre optique, contrairement à une introduction du signal par le réseau électrique, des paires torsadées ou encore des câbles coaxiaux, ce qui est logique.

Une documentation en annexe disponible sur les produits Devolo: "Fournisseurs & produits Powerline (Devolo)".

Afin de tester cet équipement Devolo de dernière génération, nous en avons commandé trois boîtiers afin de concevoir, réaliser et tester un réseau de tests PLC.

2.4.5 WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access)

WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) ou interopérabilité mondiale pour l'accès par hyperfréquences désigne un standard (IEEE 802.16) de communication sans fil. Il est utilisé pour couvrir une zone géographique étendue. WiMAX utilise plusieurs technologies de diffusion hertziennes pour une architecture P2M (point à multipoint).

Cette technologie offre des débits relativement faibles de quelques dizaines de Mb/s pour une zone de couverture au maximum de quelques dizaines de kilomètres. Il est adéquat pour couvrir des zones rurales qui ne sont pas desservies par une connexion câblée.

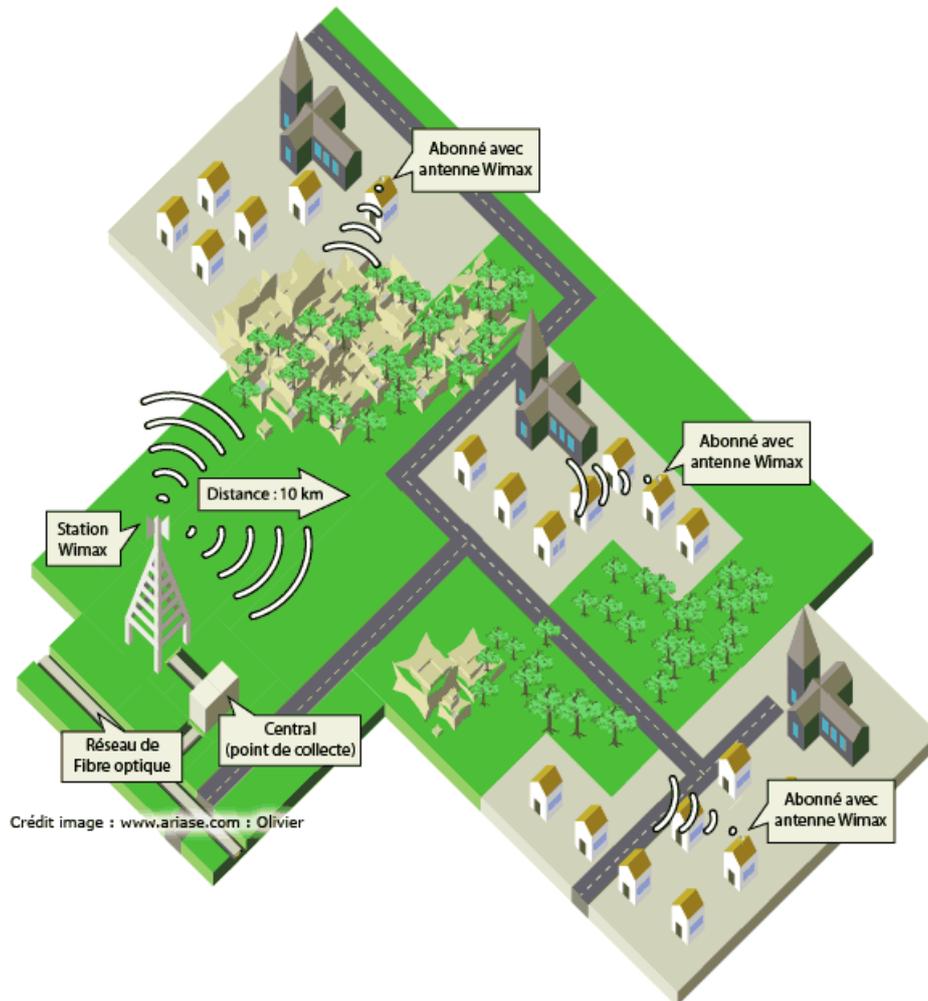


Figure 31 – Schéma d'un réseau WiMAX, source: www.ariase.com

WiMAX est une solution alternative au déploiement de réseaux à haut débit dans des zones non couvertes par des technologies d'accès fibrées. Cette technologie peut être mise en place en attendant la pose de fibre optique dans certaines régions comme des zones où des fermes sont escarpées.

Des débits symétriques peuvent être proposés par les fournisseurs d'accès à Internet. En revanche, après plusieurs recherches, nous avons pu voir que les débits réels, avec la technologie WiMAX, s'approchent plus de 15 à 25 Mb/s, les ondes étant souvent perturbées par des obstacles naturels comme les arbres ou artificiels comme des bâtiments.

Cette technologie est beaucoup utilisée par les zones escarpées en France. Par exemple, deux départements ont déployé, dans les Pyrénées, un réseau WiMAX, afin de couvrir les zones escarpées. Dans le Finistère, en 2010, 24% des habitants ont accès au réseau grâce à 13 antennes WiMAX, et en 2011, 100% des habitants ont accès au réseau grâce à technologie d'accès WiMAX. Le déploiement de cette technologie est très rapide, ce qui donne en bon point positif. En 2018, en France, le WiMAX est encore une technologie d'accès fortement utilisée.

Concernant la Suisse: *"Biel-Bienne, 30.05.2005 - L'Office fédéral de la communication (OFCOM) a ouvert une consultation publique pour l'éventuel octroi de concessions pour des raccordements sans fil à large bande (par exemple au moyen de WiMAX). Cette consultation, qui durera jusqu'au 30 avril 2005, permettra aux milieux intéressés de s'exprimer sur le sujet et aux autorités de récolter les informations concernant les besoins et intentions des acteurs concernés."* [3]. En 2007, Swisscom a démarré des tests WiMAX dans une commune, mais a abandonné cette technologie en 2008. Depuis, plus aucune nouvelle de cette technologie en Suisse.

Les débits proposés par un réseau WiMAX sont dans tous les cas relativement faibles, mais cette technologie est adéquate pour offrir une connexion à des fermes ou des hameaux isolés. Des antennes déjà existantes ou des monuments en hauteur, comme des églises, pourraient accueillir une antenne WiMAX, afin de couvrir un point isolé à 10 kilomètres sans obstacle majeur entre-deux. Cette technologie pourrait être mise en place en attendant la pose de fibres optiques.

Nous avons réalisé une simulation de couverture WiMAX de 5 kilomètres de rayon dans la figure suivante.

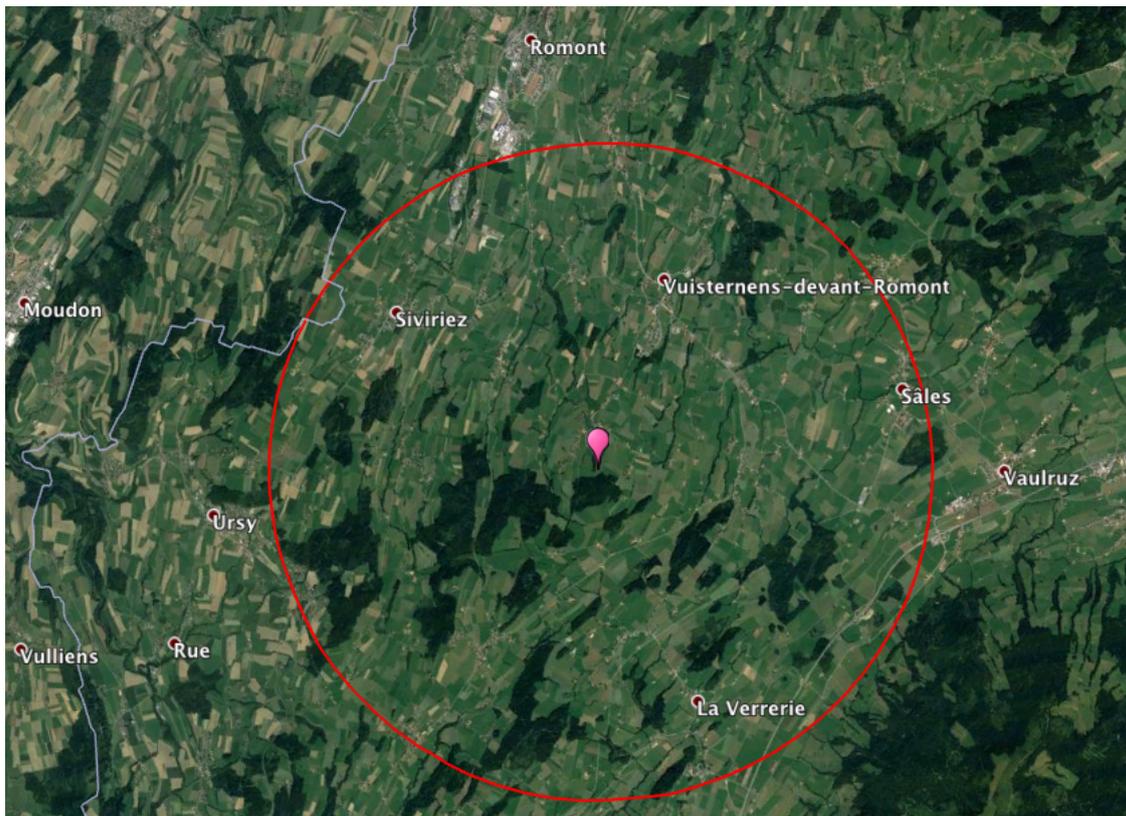


Figure 32 – Zone couverte WiMAX de kilomètres de rayon

En se référant à la figure précédente, nous avons pris une zone avec de petites collines dans le canton de Fribourg. Nous avons placé une antenne WiMAX sur le point le plus élevé de la zone couverte. Le cercle tracé correspond à une zone couverte de 5 kilomètres de rayon. Cette zone comprend pratiquement que des fermes ou des hameaux isolés. Bien entendu pour couvrir une zone de 360°, il faudrait placer en tout cas 3 antennes WiMAX dans les différentes directions (120° chacune). En théorie, les clients dans cette zone, ce qui correspond à 150-200 habitations, devraient pouvoir réceptionner le signal avec un débit de quelques dizaines de Mb/s. La couverture est théoriquement bonne, mais dans une zone montagneuse et vallonnée, il faudrait placer beaucoup plus d'antennes, car ces dernières ne peuvent pas être placées sur le sommet des montagnes.

Cette technologie peut être une bonne alternative à une connexion FTTH au niveau de la vitesse de déploiement et des coûts. En revanche, le débit est nettement insuffisant.

2.4.6 FSO (Free Space Optic)

FSO (Free Space Optic) pour communications optiques en espace libre désigne une technologie permettant une communication optique grâce à la propagation de la lumière dans un espace libre. Cette technologie permet la transmission des données à haut débit entre deux points distants de plusieurs centaines de mètres sans connexion physique.

Cette connexion optique présente un intérêt lorsqu'une connexion physique câblée ou fibrée n'est pas adaptée à l'environnement ou pour des raisons de coûts.

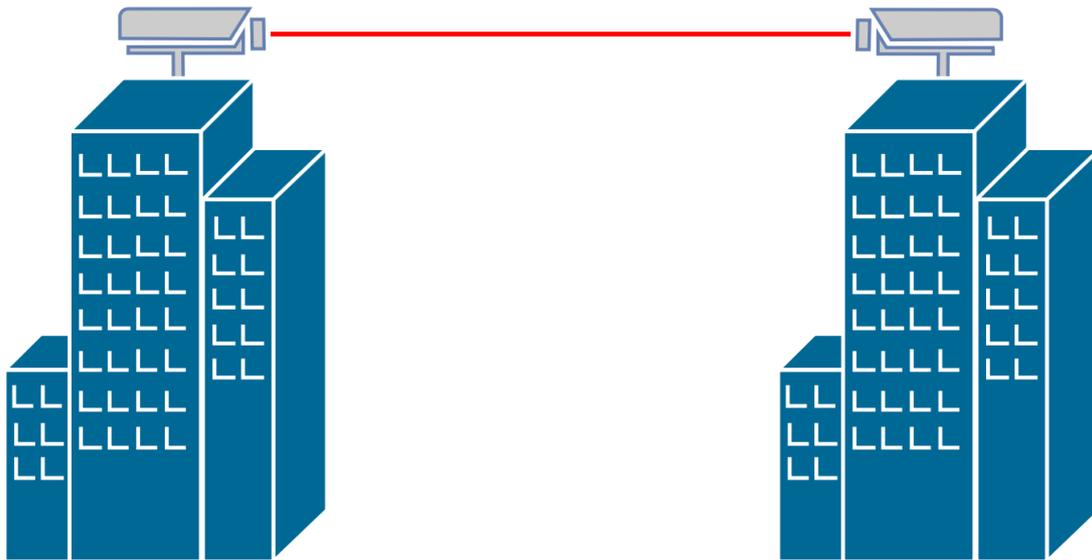


Figure 33 – Liaison FSO (Free Space Optic) haut débit entre deux points

Un peu d'histoire, la communication optique ne date pas d'hier. En effet, les Grecs Anciens utilisaient leurs boucliers afin de faire refléter la lumière du soleil, dans le but d'envoyer des messages. En 1880, les inventeurs Alexander Graham Bell et Charles Sumner Tainter mettent au point le premier photophone qui est un dispositif permettant de transmettre, grâce à un faisceau de lumière, des conversations. Ils inventèrent la première transmission téléphonique sans fil d'une distance de 213 mètres.

De nos jours, les communications optiques, grâce notamment à la technologie FSO, peuvent atteindre plusieurs kilomètres avec des débits de plusieurs Gb/s.



Figure 34 – Équipement FSO (Free Space Optic) de Black Box (Suisse), source: www.black-box.ch

L'équipement FSO (LaserLink II) présenté ci-dessus est un produit de la société suisse Black Box (www.black-box.ch), il permet une transmission de 1.6 Gb/s sur une distance de 1.6 kilomètre. Bien évidemment, ces équipements ont un certain coût, de plusieurs milliers de francs suisses. Mais dans certains cas, ce coût est peut-être plus attractif que la pose d'une fibre optique sur un terrain difficile. Ces équipements, dans le cas des produits Black Box, offrent aussi une redondance WiFi si le lien optique tombe, le WiFi prend le relais afin que la connexion ne se perde pas.



Il est intéressant de noter que le record du débit le plus haut transmis avec la technologie FSO est de 1.72 Tb/s sur une distance de 10.45 kilomètres. Ce record a été effectué, en 2016, par les chercheurs du Centre aérospatial allemand.

Comme toutes technologies, la technologie FSO a ces avantages et inconvénients. Ces avantages:

- Déploiement rapide
- Transmission à haut débit
- Transmission sur de longues distances
- Faible taux d'erreurs dans de bonnes conditions
- Transmissions en mode full-duplex et symétriques
- Pas besoin de licence pour cette transmission optique contrairement aux transmissions hertziennes
- Confidentialité élevée de la transmission due à l'étroit faisceau optique

Ces désavantages qui apportent un certain taux d'erreurs:

- Dispersion des faisceaux
- Absorption atmosphérique
- Perturbations naturelles (pluie, brouillard, neige, chaleur modifiant l'indice de réfraction, scintillation, pollution lumineuse, instabilité du pointage en raison du vent)
- Perturbations humaines (Pollution, fumée)

Bien entendu, aucun élément artificiel (bâtiments) ou naturel (arbres ou montagnes) ne doit se trouver entre les deux équipements FSO, car le laser sera coupé.

Les désavantages présentés ci-dessus peuvent être évités ou réduits avec de bons équipements FSO, ce qui réduit le taux d'erreurs. L'atténuation due à la pollution atmosphérique et au brouillard est exponentielle en fonction de la distance. Plus les équipements seront proches, plus le taux d'erreurs sera bas lors de mauvaises conditions. La puissance du laser entre aussi en compte, après quelques recherches, nous avons découvert des équipements FSO russes offrant des débits de 30Gb/s sur plusieurs kilomètres, mais avec de telles performances, ces lasers ne sont peut-être pas autorisés en Suisse pour des raisons de sécurité. En effet, afin d'éviter les risques oculaires, les densités de puissance des bons lasers sont limitées.

Nous nous sommes renseignés sur des produits FSO de qualité, nous avons découvert une société suisse nommée Black Box. Cette société propose des produits offrant des débits symétriques allant de 250 Mb/s à 1 Gb/s sur des distances de 250 mètres à 1.6 kilomètre, et proposant des redondances WiFi (5 GHz) avec un débit symétrique de 150 Mb/s en cas de perte du signal optique.

Les produits proposés par Black Box offrent beaucoup d'avantages, ce sont des produits de qualité. En effet, le laser (classe 1M) ne présente pas de risques oculaires. En cas de pluie ou de neige, le signal optique n'est pas perturbé, en revanche il le sera avec du brouillard. L'équipement FSO fonctionne avec des températures entre -30° et $+60^{\circ}$, ce qui n'a pas d'influence pour un pays comme la Suisse. Le boîtier est équipé de boucliers thermiques contre les hautes températures et d'un chauffage afin de pallier au problème du givre sur la lentille en cas de basses températures.

En cas de très mauvaises conditions météorologiques, comme un jour de brouillard, le WiFi à 5 GHz offrant un débit symétrique de 150 Mb/s, prend le relais. Le système surveille en temps réel les transmissions de données et la disponibilité, et bascule automatiquement vers la meilleure solution, FSO ou WiFi. La technologie FSO ne nécessite pas de licence d'exploitation, elle est donc installée très rapidement et est à 100% immunisée contre les interférences radios et les problèmes de saturation du spectre. Black Box combine le meilleur du monde sans fil, le système offre une disponibilité de plus de 99,99% avec un temps d'arrêt annuel inférieur à 5 minutes.



Figure 35 – Réseau FSO permettant d'atteindre les zones isolées

Une documentation en annexe disponible sur les produits FSO: "Fournisseurs & produits FSO (Free Space Optic)".

Contact avec la société suisse Black Box

Nous avons pris contact avec la société suisse Black Box proposant des équipements FSO, afin de pouvoir en commander.

Après discussion avec la société Black Box, ces derniers ont accepté de nous prêter le produit FSO "LaserLink II Short/Medium Range" offrant un débit de 1 Gb/s sur une distance maximum de 750 mètres et d'une redondance WiFi, en cas d'arrêt de la liaison optique. La société Black Box nous prête l'équipement 3 mois afin de le tester. Si les résultats s'avèrent satisfaisants, cette dernière nous ferait un prix sur l'équipement qui coûte environ 10'000 CHF, nous garderions l'équipement et équiperions la HEIA-FR d'une redondance vers l'UNIFR.

Actuellement, une seule ligne fibrée nous raccorde au réseau Internet via l'UNIFR, ce serait l'occasion de créer une redondance afin de sécuriser la connexion Internet de l'école.

Leurs produits sont disponibles sur le site Web suivant: www.black-box.ch.

Contact avec les sociétés russe Artolink et tchèque Eurocontract

Nous avons pris contact, le 8 juin 2018, avec la société russe Artolink proposant des équipements FSO offrant des débits de 30 Gb/s sur plusieurs kilomètres afin de connaître les prix de leurs produits, la puissance des lasers et si leur technologie est autorisée en Suisse. Après plusieurs semaines, le 20 juin 2018, nous avons enfin eu une réponse.

La société russe Artolink, a transmis le message à leur fournisseur qui est la société tchèque Eurocontract. Notre contacté de la société Eurocontract, Monsieur David Pehr (david@eurosro.cz), nous informe que la société tchèque Eurocontract est le fournisseur officiel des équipements FSO vendu par la société Artolink. La marque de ces équipements FSO est EC System.



Monsieur David Pehr, nous informe que leurs produits offrent des débits allant de 100 Mb/s à 30 Gb/s et couvrant des distances entre 1.8 et 7 kilomètres. Au niveau des prix, nous avons été informés que les produits FSO offrant des débits de 10 Gb/s sont disponibles à 23'850 \$, 34'875 \$ pour les produits FSO offrant des débits de 20 Gb/s, 45'900 \$ pour ceux à 30 Gb/s et ils proposent même des débits à 40 Gb/s. De plus, nous sommes informés que tous les lasers utilisés pour les produits FSO proposés par la société tchèque Eurocontract sont conformes aux normes européennes (classe 1M).

Monsieur David Pehr (david@eurosro.cz), nous informe qu'il est disponible pour toutes autres informations.

Leurs produits sont disponibles sur les sites Web suivants: www.eurosro.cz et www.ecsystem.cz.

2.4.7 Wireless Point-to-Point

Après contact avec la société tchèque Eurocontract, nous avons découvert sur leur site Web (www.ecsystem.cz), que des produits Wireless Point-to-Point sont proposés.

Ces produits, à liaison sans fil, nommé "EC LINK" sont des solutions point à point utilisables en extérieur, à des fréquences de 2 GHz (2,3-2,9 GHz), 3 GHz (3,1-4,0 GHz), 5 GHz (4,9-6,0 GHz) et 6 GHz (6,0-6,425 GHz). Ces équipements combinent des performances haut débit avec un ensemble de fonctionnalités et d'avantages. Ils offrent une efficacité spectrale élevée et des transmissions sans fil sur de longues distances dépassant les 100 kilomètres. Ces produits Wireless Point-to-Point offrent des fonctionnalités de QoS étendues, des technologies radio avancées, MIMO (Multiple-Input Multiple-Output), OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing).



Les produits Wireless Point-to-Point les plus performants proposés par la société tchèque Eurocontract sont les suivants:

- **Point-to-Point EC-Link 5GHz:**
 - Débits de 1000 Mb/s allant à une distance de 35 à 60 kilomètres
 - Débits de 480 Mb/s allant à une distance de 30 à 100 kilomètres
- **Point-to-Point EC Link 6.0GHz:**
 - Débits de 480 Mb/s allant à une distance de 30 à 100 kilomètres

Leurs produits sont disponibles sur le site Web suivant: www.ecsystem.cz.

2.4.8 Utilisation des terminologies FTTx

Il n'existe pas de standards définissant clairement les terminologies FTTx, sauf pour FTTH et FTTB qui sont des termes clairement définis et explicites. Les termes FTTH et FTTB font l'objet d'un accord international entre les FTTH Councils (Europe, North America, and Asia-Pacific). Concernant FTTC, FTTS, FTTN, FTTLA ou autres terminologies, des distances moyennes ont été présentées, mais tout dépend dans la zone desservie, les distances peuvent varier en fonction des zones urbaines, suburbaines ou encore rurales. Ce sont des concepts ouverts, utilisés par les concepteurs réseau à leurs manières selon leurs besoins.

Pour ce projet, lors du choix et de la présentation des solutions, nous utiliserons et définirons nos propres terminologies afin de ne pas tout mélanger. Les technologies d'accès FTTH et FTTB seront naturellement mentionnées. Nous mentionnerons aussi la terminologie FTTLA pour définir une connexion fibrée jusqu'au dernier amplificateur, puis une terminaison de connexion en câble coaxial (HFC) vers le bâtiment. Une nouvelle terminologie sera aussi mentionnée, il s'agit de FTTDP (Fiber To The Distribution Point), cette terminologie permet de définir un réseau d'accès fibré jusqu'au DP, qui est un élément en relation avec les schémas présentés, et de terminer la connexion vers le bâtiment avec des paires torsadées et une technologie G.Fast.

2.4.9 Comparaison fibre optique & câble cuivre

La fibre optique offre deux gros avantages par rapport aux câbles en cuivre:

- Large bande passante
- Faible atténuation sur de grandes distances

	Fibre optique	Câble cuivre
Techniques	Débit élevé de plusieurs Gb/s sur de longues distances Avec un débit de 10 Gb/s, une seule fibre permet de transmettre plus de 600'000 communications téléphoniques analogiques Section de la fibre 0.125 millimètre	Débit plus faible , bande passante faibli avec la distance Un seul câble cuivre permet de transmettre une seule communication téléphonique analogique Section de la fibre 0.4 à 1 millimètre
	Pas d'atténuation de la vitesse sur de longues distances	Atténuation de la vitesse, après 20 mètres la vitesse est divisée par 2
	Insensibles aux perturbations électromagnétiques	Sensible aux perturbations électromagnétiques, le câble fonctionne comme une antenne
	Matériaux ne s'altèrent pas	Matériaux vieillissants
Économiques	Peu coûteux Câble de 12 fibres = CHF 0,8/m Câble de 144 fibres = CHF 6/m Câble de 288 fibres = CHF 12/m	Coûteux Câble 10 x 2 conducteurs = CHF 2/m Câble 150 x 2 conducteurs = CHF 12/m Câble 300 x 2 conducteurs = CHF 22/m
	La pose des câbles est moins coûteuse , section des câbles plus petites	La pose des câbles est plus coûteuse , section des câbles plus larges
	Câble de fibres optiques plus utilisé 288 fibres Section de câble de 18,8 millimètres Poids de 0,3 kg/m Longueur de câble de 6 kilomètres maximum	Câbles de cuivre le plus volumineux 2400X2/0,4mm Section de câble de 90 millimètres Poids de 9,2 kg/m Longueur de câble de 400 mètres maximum

Figure 36 – Comparaisons techniques et économiques entre fibres optiques et câbles en cuivre

Ces comparaisons montrent que la fibre optique est plus avantageuse que le câble de cuivre. La fibre optique est donc plus intéressante sur les débits qu'elle offre, les grandes distances sans perturbation, la bande passante disponible, sa durée de vie, et ses coûts baissent sans cesse, au niveau des matériaux utilisés pour la fabriquer. Mais ça ne s'arrête pas là, au niveau de la sécurité, il est très difficile de s'y brancher et de détourner les données comparées au câble cuivre.

La fibre optique peut s'avérer plus coûteuse que les câbles en cuivre à court terme (fabrication et installation), mais elle s'avère moins coûteuse à long terme, car il est moins coûteux de la maintenir, elle améliore la disponibilité et nécessite moins d'équipements réseau. Particulièrement la technologie d'accès FTTH qui ne comporte pas d'équipements actifs entre le CO et le terminal, ce qui limite les dépenses d'exploitation contrairement aux autres technologies d'accès.

2.4.10 Synthèse

Cette synthèse permet de définir les technologies et méthodes d'accès décrites précédemment, en fonction de certains critères imposés par la société fribourgeoise FTTH-FR. Elle permet de faire un premier tri afin de pouvoir connaître les technologies et méthodes d'accès que nous ne continuerons pas d'analyser, afin de réduire les coûts d'une mise en place du réseau FTTH-FR.

Nous nous sommes entretenus avec le directeur de la société FTTH-FR, afin de connaître ces attentes et ces critères. Les critères sur les technologies et méthodes d'accès sont les suivants:

- **Réseau FTTH:** rester dans une optique d'un réseau FTTH, donc fibre jusqu'à l'appartement.
- **Éléments actifs:** actuellement, le réseau de FTTH-FR ne comprend pas d'éléments actifs entre le CO et la terminaison optique, il faut continuer dans cette optique.
- **Débits symétriques:** le fait d'offrir des débits symétriques aux abonnés est important, cela ne doit pas changer.

Le fait de rester dans une optique d'un réseau fibré jusqu'à l'appartement (FTTH) est important pour la société FTTH-FR et pour leurs clients, les fournisseurs de services. Bien évidemment, en attendant la mise en place de ce réseau FTTH, des solutions peuvent être proposées en attendant ce réseau FTTH. Des concessions sur certains points sont envisageables, comme le fait de proposer une connexion fibrée à chaque ferme isolée.

Éviter la mise en place d'éléments actifs sur le réseau de la société FTTH-FR est un point important. En effet, les éléments actifs doivent être entretenus, et cela à un certain prix. En comparaison avec un réseau en cuivre, le réseau en cuivre (FTTx, HFC) a un coût d'investissement moins élevé, mais avec les éléments actifs les dépenses d'exploitation sont plus élevées. Le réseau fibré (FTTH) a un coût d'investissement plus élevé, mais les dépenses d'exploitation sont beaucoup moins élevées, car il n'y a pas d'éléments actifs. En général, plus dépenses d'investissement (CAPEX) sont élevées, plus les dépenses d'exploitation (OPEX) sont faibles, inversement plus dépenses d'investissement (CAPEX) sont faibles, plus les dépenses d'exploitation (OPEX) sont élevées. Ces points économiques seront analysés dans le chapitre d'analyse économique.

La fibre optique propose un débit symétrique et pour la société FTTH-FR cet atout est un critère à prendre en compte. En effet, un débit symétrique permet d'obtenir une connexion optimale et performante et c'est un atout pour le développement d'une entreprise. Cela permet de mettre en place des usages exigeants en termes de ressources réseau (réseau de téléphonie VoIP ou visioconférence). Un débit symétrique sera de plus en plus utile dans le futur, le réseau de la société FTTH-FR se veut performant et réseau d'avenir, c'est pourquoi la notion de symétrie pour le débit est un point important.

Un tel réseau FTTH permettra aux fournisseurs de services de créer des produits innovants, sans limitation liée à un choix de technologies.

La grille suivante présente les technologies et méthodes d'accès analysées précédemment en fonction des critères techniques essentiels communiqués par la société FTTH-FR.

	Haut débit	Débit symétrique	Éléments actifs	Fibre jusqu'à l'appartement	Accès complet et illimité à la couche physique
FTTH P2P	Plusieurs Gb/s	Oui	Aucun	Oui	Oui
FTTH PON	Plusieurs Gb/s	Oui	Aucun	Oui	Non
FTTB + G.Fast	Plusieurs Mb/s à Gb/s	Non	Dans bâtiment	Non	Non
FTTDP + G.Fast	Plusieurs Mb/s	Non	Sur réseau d'accès	Non	Non
FTTC/FTTS/FTTN	Plusieurs Mb/s	Non	Sur réseau d'accès	Non	Non
HFC (FTTx + Coax)	Plusieurs Mb/s	Non	Sur réseau d'accès	Non	Non
HFC (FTTLA + Coax)	Plusieurs Mb/s	Non	Sur réseau d'accès	Non	Non
FTTB + PLC	Plusieurs Mb/s à Gb/s	Dépend distance entre équipements PLC	Dans bâtiment	Non	Non
PLC (longue distance)	Plusieurs Mb/s	Non	Sur réseau d'accès	Non	Non
WiMAX	Plusieurs Mb/s	Non	Sur réseau d'accès	Non	Non
FSO (FTTH)	Plusieurs Gb/s	Oui	Sur réseau d'accès	Oui	Non

Figure 37 – Comparaisons des technologies et méthodes d'accès en fonction de critères techniques

La politique de la société FTTH-FR est d'amener la fibre optique jusqu'à l'appartement de l'abonné, afin de garantir un réseau d'accès performant, haut débit et débit symétrique. Les technologies et méthodes d'accès FTTx associées à HFC ou G.Fast, ou les technologies WiMAX et PLC sur longue distance, ne respectent pas cette politique et n'entrent donc plus en compte. FTTH est la seule méthode d'accès respectant ces critères. Les technologies FSO et PLC dans le bâtiment peuvent encore jouer un rôle à court terme dans le réseau FTTH en attendant un réseau 100% fibré jusqu'à l'appartement de l'abonné.

Le gros avantage d'une technologie FTTH P2P face à une technologie FTTH PON est le fait que le fournisseur de services à un accès complet et illimité à la couche physique.

2.5 Solutions alternatives pour le réseau de FTTH-FR

Dans tous les cas, l'objectif de la société FTTH-FR est de fibrer tous les logements et commerces du canton de Fribourg. À long terme, aucune autre technologie d'accès que FTTH ne pourra être mise en place pour ce réseau. Mais à court terme, des solutions ou techniques alternatives moins coûteuses peuvent être pensées et mises en place.

Les technologies et méthodes d'accès validées par les critères présentés au point précédent vont être analysées ci-dessous afin de définir dans quels contextes elles peuvent être intéressantes à mettre en place. Ensuite, des cas concrets seront définis et analysés économiquement parlant dans le chapitre d'analyse économique.

2.5.1 FTTH PON (Fiber To The Home Passiv Optical Network)

Le fait de passer d'une fibre optique unique par abonnés (P2P) à une fibre optique partagée entre les abonnés (PON) permet théoriquement de réduire les coûts surtout au niveau des segmentations du réseau d'accès Feeder et Drop. En effet, le câble contenant les fibres optiques sera moins volumineux ce qui donne des coûts de génie civil moins élevés, ce point sera à vérifier dans la partie d'analyse commerciale. FTTH PON ne fait pas intervenir d'équipements actifs dans le réseau d'accès, mais des équipements passifs bon marché.

Avec la technologie d'accès PON, nous parlons de technique GPON (Gigabit Passive Optical Network). Selon les normes de l'ITU (International Telecommunication Union), les combinaisons de débits suivantes sont définies pour la technique GPON:

- Débit descendant de 2.4 Gb/s (Download) et ascendant de 1.2 Gb/s (Upload): asymétrique
- Débit descendant de 2.4 Gb/s (Download) et ascendant de 2.4 Gb/s (Upload): symétrique

Toujours selon l'ITU, le taux de division pour une fibre optique peut atteindre une valeur de 1/64, en couche physique, ce qui est raisonnable. Mais ce taux de division peut aussi atteindre une valeur de 1/128 ou 1/256 au maximum. Bien entendu, le débit par abonnés est partagé en fonction de ce taux de division sur la fibre optique.

La société FTTH-FR pose à 99% les câbles de fibres optiques dans les canalisations contenant les câbles électriques qui appartiennent aux fournisseurs d'électricité, partenaires de FTTH-FR, ce qui réduit déjà considérablement les coûts de génie civil.

La technologie d'accès FTTH PON peut être intéressante lorsque les canalisations contenant les câbles électriques ne sont pas assez grandes pour accueillir un câble contenant les fibres optiques uniques pour chacun des abonnés (FTTH P2P). FTTH PON permet théoriquement de réduire le volume du câble, le câble étant moins volumineux, il est donc plus simple à poser dans les canalisations. Avec la technologie d'accès FTTH PON, il faut donc trouver le bon compromis entre le débit pour chacun des abonnés et le partage de la fibre optique entre un certain nombre d'abonnés.

Et pour finir, d'après FTTH-FR, 1% des câbles de fibres optiques sont posés dans des tranchées préalablement creusées, dans ce cas le coût du travail de génie civil explose. Plus le câble est volumineux, plus le prix sera conséquent. La technologie d'accès FTTH PON réduisant le volume du câble, les coûts seront moins élevés.

Avec FTTH PON, on économise aussi sur le nombre de terminaisons optiques dans le CO, ce qui peut être avantageux.

À noter qu'actuellement la société FTTH-FR loue ces fibres optiques à ces clients, avec la technologie FTTH PON la location d'une fibre optique ne sera plus possible, mais FTTH-FR devra louer des connexions.

2.5.2 PLC (Powerline Communication)

Comme cité précédemment, mettre en place un réseau d'accès PLC dans la partie Inhouse de ce réseau est une technique très intéressante. Les derniers équipements PLC de Devolo offrent de hautes performances pour des coûts très raisonnables. Ces coûts étant raisonnables, car le signal transite via le réseau électrique qui est déjà existant dans une maison.

Pour une habitation, avec un seul abonné, le fait de placer le CPE de l'abonné à l'introduction de la fibre optique dans la maison et d'y brancher le CPE à une prise électrique via l'équipement PLC évite de mettre en place un réseau de fibres optiques dans les murs de la maison.

Nous parlons ici de technologie d'accès FTTB, mais le fait d'utiliser le réseau électrique pour terminer la connexion vers les différentes pièces de la maison réduit énormément les coûts. En effet, il n'y a plus de travaux à réaliser dans la maison. Le fait que les équipements PLC de Devolo offrent un débit câblé et WiFi de 1.2 Gb/s et ce jusqu'à plus de 300 mètres de câbles électriques, les associer avec une fibre optique garde tout son sens. Des deux côtés, fibre optique et équipements PLC, les débits sont très hauts. De plus, les débits sont plus ou moins symétriques comme nous l'a confirmé un des contacts de la société Devolo après contact.

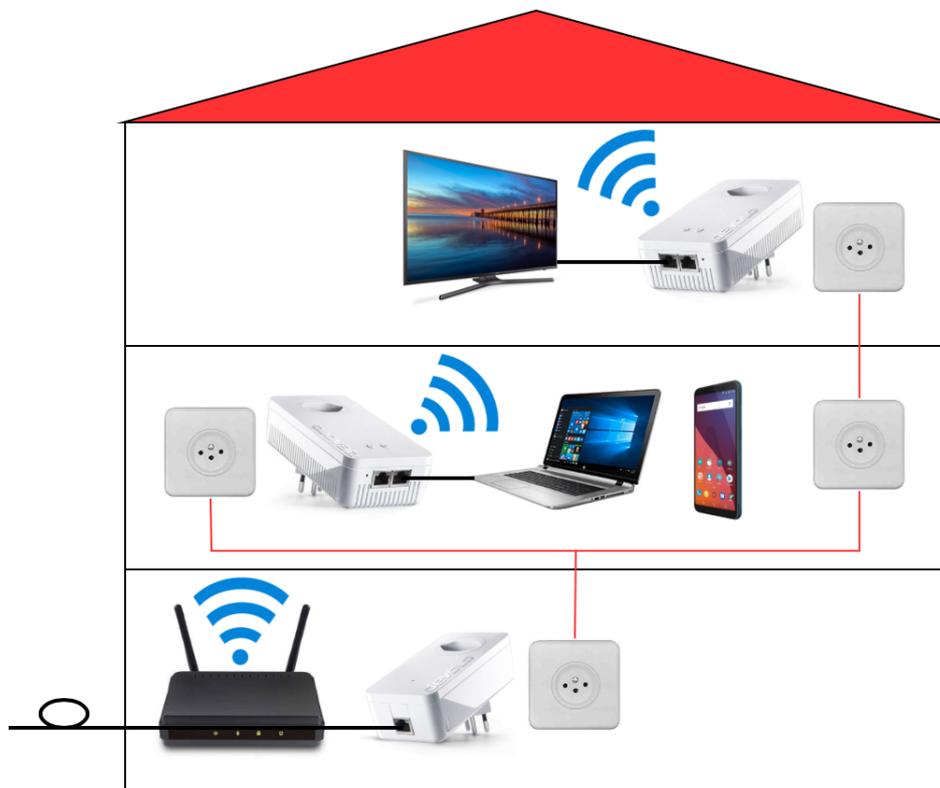


Figure 38 – Schéma d'un accès réseau PLC Inhouse

La mise en place d'une telle technologie est envisageable dans les habitations où les coûts de la pose de la fibre optique seraient trop coûteux. Dans les futurs bâtiments, la pose de la fibre optique doit se faire naturellement lors de leurs constructions.

Des comparaisons économiques seront réalisées entre le fait de poser une fibre optique à travers la maison, et le fait de tirer la fibre optique pas plus loin que l'introduction, afin de partir sur des équipements PLC. Ces équipements PLC de Devolo seront testés, car nous en avons commandé.

2.5.3 FSO (Free Space Optic)

La technologie FSO à un certain prix, mais elle a été retenue pour ces performances au niveau des hauts débits symétriques et sur la portée du signal optique. Un équipement FSO peut faire office de relais entre deux terminaisons fibrées. Cette technologie peut servir de solution dans les cas suivants:

- Fournir une connexion dans une zone isolée où il est difficile de tirer une fibre optique
- Fournir une connexion entre deux bouts de connexions optiques en attendant la pose de fibre optique
- Fournir une connexion entre deux bâtiments afin de garantir une simple connexion ou une connexion redondante, comme dans le cas d'une connexion redondante entre l'HEIA-FR et l'UNIFR
- Fournir une connexion industrielle interne entre deux bâtiments afin de garantir une simple connexion ou une connexion redondante, comme dans le cas des banques à Londres

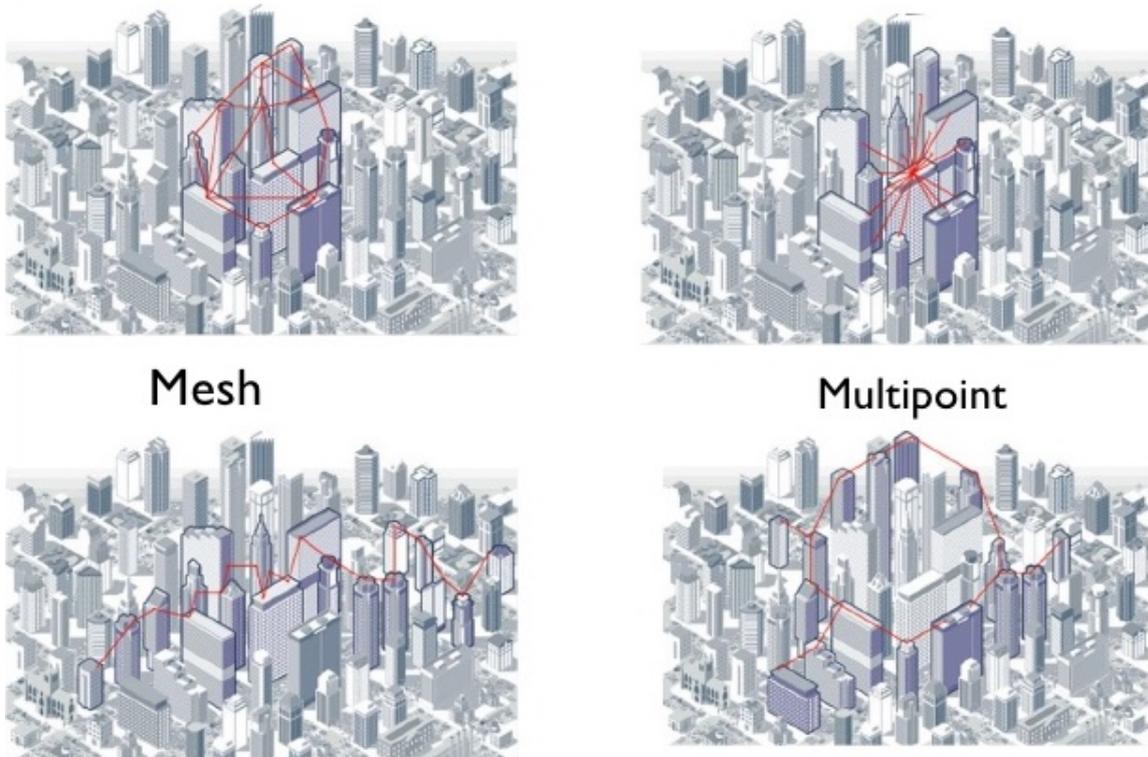


Figure 39 – Réseau FSO entre buildings, source: www.slideshare.net

Un réseau FSO peut être monté entre les toits des buildings afin de créer une connexion redondante entre bâtiments ou pour créer des connexions entre entreprises, comme ce qui se fait entre les banques dans la ville de Londres. Dans l'illustration ci-dessus, plusieurs équipements FSO sont nécessaires à la mise en place d'un tel réseau.

Un équipement FSO permet de faire transiter le signal en espace libre grâce à un laser, mais pour une seule fibre optique. Faire transiter les signaux d'un câble de 200 fibres optiques ne sera pas possible, il faudrait 200 équipements FSO.

La technologie FSO peut être intéressante à mettre en place dans les segments Feeder et Drop du réseau d'accès.

Cette technologie FSO peut être combinée avec une technologie d'accès FTTH PON. En effet, afin d'offrir une connexion à haut débit par exemple à un hameau isolé d'une dizaine d'habitations où la pose de fibres optiques est difficile. La vitesse de déploiement est aussi très rapide en comparaison à la pose de fibre optique.

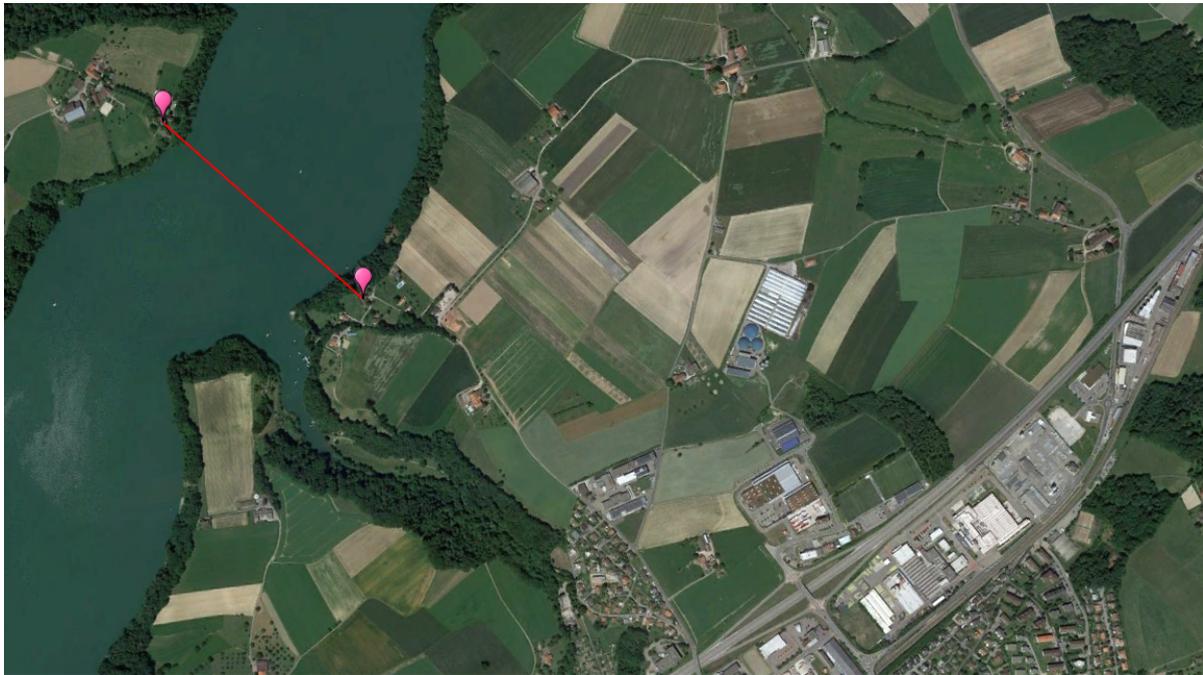


Figure 40 – Connexion FSO travers le lac de Schiffenen

Dans l'illustration ci-dessus, nous avons modélisé la pose d'équipements FSO à travers le lac de Schiffenen entre un hameau de la commune de Guin et un autre hameau du Château de Grand Vivy, distant de 600 mètres à vol d'oiseau, mais de plusieurs kilomètres par la terre. La commune de Guin étant partiellement raccordée, mais les hameaux de l'autre côté du lac n'étant pas fibré, le fait d'y placer des équipements FSO entre ces deux hameaux permet d'éviter de tirer des fibres par le barrage de Schiffenen ou le pont de l'autoroute A12 Berne-Vevey, ce qui engendrerait un détour de plusieurs kilomètres et des coûts de génie civil élevés.

Le terrain étant accidenté avec le lac, la pose de fibres optiques est compliquée et coûteuse. Un équipement FSO placé sur le toit d'une ferme ayant un toit très haut et un autre équipement sur la tour du Château de Grand Vivy, permet une connexion via à un laser. Les équipements FSO étant en hauteur, l'espace entre ces équipements est libre et le laser passe par dessus les arbres. Grâce à la technologie FTTH PON, les quelques habitations présentes dans le hameau, de l'autre côté du lac, sont desservies par une connexion haut débit symétrique.

Dans cet exemple, les coûts de mise en place de cette infrastructure sont moins élevés que la pose de fibres optiques et la vitesse de déploiement est beaucoup plus rapide.

D'autres exemples peuvent être illustrés comme une connexion FSO à travers le lac de Morat, entre Morat, qui est partiellement fibrée, et les villages du Haut Vully. La distance est plus importante, il faut mettre en place des équipements FSO de portée de 4 kilomètres, mais cette méthode permet d'éviter de contourner le lac de Morat par le canton de Vaud ou par Sugiez, la pose de fibre optique est réduite de plusieurs kilomètres.

La technologie FSO est une bonne alternative à court ou moyen terme en attendant la pose de fibres optiques ou même une bonne alternative à long terme. Bien évidemment, desservir un village de plusieurs milliers d'habitants avec une technologie FSO n'est pas possible. Cette technologie est idéale pour une solution industrielle ou pour un petit nombre d'abonnés.

2.6 Conclusion de l'analyse technique

Pour commencer ce projet, un état de l'art sur la société FTTH-FR et de son réseau était nécessaire afin de bien comprendre leurs objectifs et leurs politiques. Une rencontre avec Monsieur Frédéric Mauron, directeur de la société FTTH-FR, a eu lieu afin de bien comprendre ces attentes.

Dans ce chapitre d'analyse technique, un bon nombre de technologies et méthodes d'accès ont été analysées techniquement, afin de trouver des solutions pour réduire les coûts de la mise en place d'un réseau FTTH ou fibre jusqu'à l'appartement. Ensuite, certains critères ont été mentionnés lors de la rencontre avec le directeur de FTTH-FR. Les solutions afin de réduire les coûts du déploiement du réseau doivent garantir un haut débit, un débit symétrique pour les abonnés et éviter les équipements actifs sur le réseau. FTTH-FR veut aussi rester dans une optique de fibre jusqu'à la maison (FTTH).

Ces critères ont permis de faire un large tri sur les technologies et méthodes d'accès analysées. Toutes les technologies et méthodes d'accès FTTx combinées à G.Fast ou HFC, ou PLC à longue distance et WiMAX ne sont pas adaptées aux attentes de la société FTTH-FR. En cause, des débits pas assez performants, non symétriques, l'implémentation d'équipements actifs sur le réseau d'accès, une vision de fibres optiques pas jusqu'à l'appartement, ou encore le fait que ces technologies n'offrent pas un accès complet et illimité à la couche physique pour les fournisseurs de services (concurrence, innovation), ont éliminé ces technologies et méthodes d'accès. Avec l'utilisation des câbles coaxiaux et de paires torsadées, le gros avantage aurait été les coûts, car ces médiums existent déjà dans une maison.

Nous sommes donc restés sur une vision de fibre jusqu'à la maison (P2P ou PON). La technique d'accès PON partage la fibre optique entre plusieurs abonnés, ce qui a pour conséquence de diviser aussi le débit disponible sur la fibre optique par abonnés. Un des inconvénients de la technique FTTH PON est le fait que les clients de la société FTTH-FR, donc les fournisseurs de services, ne loueront plus une fibre optique à FTTH-FR mais une connexion, et l'accès complet et illimité à la couche physique n'est plus garanti.

Nous avons conseillé d'utiliser la technologie d'accès FTTH PON, par exemple quand les canalisations électriques ne sont pas assez grandes pour accueillir un câble de fibre optique dédié P2P, ou quand une tranchée doit être ouverte afin de réduire les coûts de génie civil (moins de fibres optiques = câble moins volumineux). Mais, après quelques renseignements auprès de la société FTTH-FR, dans tous les cas, le câble de fibres optiques est placé dans un tube de protection (p.ex 60 mm) qui peut accueillir n'importe quelle grandeur de câble, dans les deux cas, les coûts de génie civil seront plus ou moins semblables. Et même au niveau des câbles, un câble de 144 fibres optiques mesure 16 millimètres de diamètre et un câble de 1'008 fibres optiques mesure 19 millimètres de diamètre, il n'y a donc pas de grandes différences. Notre principal argument au niveau des coûts de génie civil pour une technologie FTTH PON ne tient donc plus.

La mise en place d'équipements PLC peut réduire drastiquement les coûts du segment Inhouse, d'autant que ces équipements offrent, aujourd'hui, de très bonnes performances. Nous testerons ces équipements pour la suite du projet.

Dans les méthodes d'accès innovantes, comme FSO qui permet de créer une connexion optique en espace libre grâce à un laser offrant un débit de plusieurs Gb/s, sur plusieurs centaines de mètres voir plusieurs kilomètres. Cette solution peut être intéressante lorsque la pose de fibre optique devient trop coûteuse. Bien entendu, un câble de 200 fibres optiques ne peut pas transiter via cette technologie. La technologie FSO est idéale pour desservir une ferme isolée ou pour une solution industrielle de connexion internet entre deux bâtiments ou de redondance. Associée à FTTH PON, la technologie FSO peut assurer une connexion haut débit à un petit hameau isolé comptant quelques habitations.

Pour conclure, trouver des technologies ou méthodes d'accès alternatives à FTTH P2P n'est vraiment pas simple, car elles ne remplissent plus les critères définis par la société FTTH-FR. Nous parlons ici uniquement de conseils techniques, une analyse économique reprenant ces solutions sera présentée plus tard afin de comparer les coûts de mises en place de ces différentes solutions.

Un réseau d'accès FTTH P2P est la seule technologie permettant de remplir les critères et garantir les facteurs suivants:

- Haut débit ✓
- Débit symétrique ✓
- Pas d'éléments actifs ✓
- Accès complet et illimité à la couche physique ✓
- Ouverture à la concurrence ✓
- Possibilité d'évolution ✓
- Capacité d'innovation pour les services futures ✓

Cette analyse technique a permis de bien voir les technologies et méthodes d'accès disponibles et de proposer des techniques afin de réduire les coûts du déploiement du réseau FTTH de la société FTTH-FR dans le canton de Fribourg. En espérant que cette partie apporte déjà quelques idées à la société FTTH-FR.

3 Conception

La partie conception de ce projet de Bachelor permet de penser et de concevoir des réseaux de tests afin d'étudier les performances concernant certaines technologies étudiées préalablement.

Des équipements PLC (Powerline Communication) de la marque Devolo ont été commandés afin de pouvoir tester leurs performances.

Pour cette technologie, nous définirons des scénarios et des réseaux de tests afin de pouvoir tester les performances au niveau des débits, perte de paquets ou encore latence.

Afin de réaliser certains tests, nous utiliserons des équipements de la HEIA-FR comme le Spirent C1 qui est un puissant générateur de trafic offrant une large palette d'outils permettant l'analyse des flux sur le réseau de tests.

Les hôtes virtuels et les flux de trafic générés par le Spirent C1 sont décrits dans cette partie de conception. Leurs définitions et configurations sont basées sur le projet de semestre 6 de Monsieur Loïc Dufresne "Quel est l'effet de la QoS sur des petits réseaux de labo ?" [4].

3.1 PLC (Powerline Communication)

Comme déjà cité, la technologie PLC de Devolo offre, théoriquement, de hautes performances au niveau des débits et peut s'accorder parfaitement à une introduction en fibre optique dans la maison (FTTH ou FTTB). La mise en place de ces équipements permet de réduire les coûts de la pose de fibres optiques à l'intérieur du bâtiment (Inhouse).

Des scénarios et réseaux de tests se rapprochant le plus de la réalité seront conceptualisés, afin de valider ou non la faisabilité de mise en place d'une telle technologie dans les habitations des particuliers.

3.1.1 Équipements

Pour mettre en place un réseau de tests PLC, nous disposons des équipements Devolo suivants:

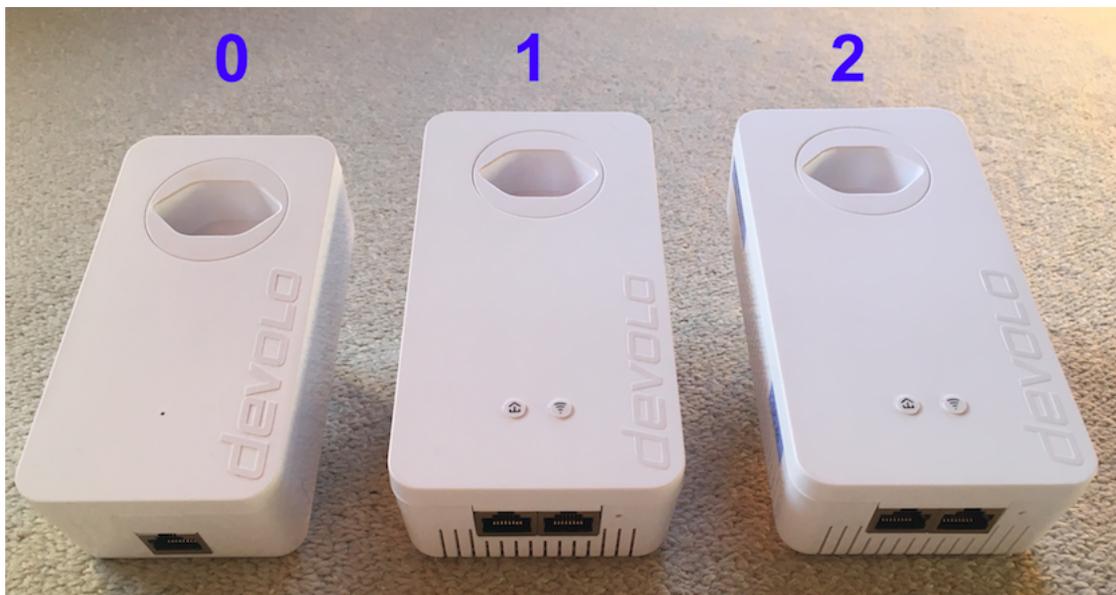


Figure 41 – Équipements Devolo à disposition pour mettre en place un réseau de tests PLC

Afin de mieux s'y retrouver pour les phases de conception, de réalisation et de tests du réseau de tests PLC, les trois équipements sont numérotés comme sur la figure précédente.

- **Équipement 0 (dLAN® 1200+ WiFi ac Starter Kit CPL):** permet de créer le réseau PLC sur le réseau électrique 220 V de la maison, ce premier appareil se branche sur une prise vers le CPE du client et un câble Ethernet est branché entre le CPE et l'appareil Devolo grâce au port RJ45. Cet appareil ne crée pas de réseau WiFi, car le CPE est assez proche et crée lui, en général, déjà un réseau WiFi.
- **Équipements 1 et 2 (dLAN® 1200+ WiFi ac CPL):** sont semblables, permettent de créer les points d'accès WiFi ou câblés dans la maison. Ces équipements Devolo se branchent sur les prises du réseau électrique 220 V de la maison. Deux ports RJ45 sont disponibles sur chaque appareil afin de brancher un ordinateur, une télévision ou autres.

Les équipements Devolo donnent l'accès à la norme WiFi ac avec des débits théoriques jusqu'à 1.2 Gb/s grâce à une communication simultanée sur 2.4 et 5 GHz. La distance entre les équipements Devolo peut atteindre jusqu'à 300 mètres sur les lignes du réseau électrique 220 V, de plus, le placement des appareils sur différentes phases est maintenant possible grâce au saut de phases à haute fréquence.

3.1.2 Spirent C1

Spirent est le premier fournisseur, dans le monde, de solutions de tests, d'analyse et de sécurité pour les réseaux de fournisseurs de services physiques ou virtuels, pour les centres de données d'entreprise et tous autres types de domaines.

Spirent fournit le Spirent TestCenter qui est un software proposant une solution de tests de bout en bout, offrant des performances élevées. Les fournisseurs de services et les entreprises l'utilisent pour tester, mesurer, valider leurs réseaux et déployer des services en toute sécurité. Il permet de réaliser des tests de haute performance, avec des analyses très poussées de la virtualisation, du Cloud Computing, du Backhaul et de l'Ethernet à haut débit. Ce software de tests peut facilement automatiser les tâches répétitives afin d'étendre la couverture des tests correspondant à notre environnement.



Ce software est adéquat pour tester les réseaux et des infrastructures de nouvelle génération, en prenant en charge une multitude de protocoles émulsés en réseau. Il réduit le temps des tests et des coûts, avec des réponses en temps réel et pas seulement des résultats. Il est aussi capable d'émuler des topologies de réseaux complexes et les conditions de trafic réelles.

Le Spirent TestCenter permet de configurer des appareils de tests, comme le Spirent C1, qui est un puissant générateur de trafic, permettant de créer des flux très variés avec une multitude de paramètres, comme la classification des paquets au niveau de la QoS. Spirent propose une large palette d'autres softwares de tests et de générations de trafic, pouvant être associé à plusieurs équipements.



Figure 42 – Générateur de trafic Spirent C1, source: www.spirent.com

Nous avons l'avantage à la HEIA-FR d'être en possession du Spirent TestCenter et du générateur de trafic Spirent C1. Nous en profitons pour tester nos réseaux de tests PLC.

La configuration du Spirent C1 se décompose en deux parties, les hôtes virtuels et la génération des flux de trafic.

Pour plus d'informations: www.spirent.com

Hôtes virtuels

Sur le générateur de trafic Spirent C1, deux hôtes virtuels, A (sur le port 3) et B (sur le port 4), sont configurés avec une adresse IP afin de simuler deux terminaisons. Le trafic est généré sur l'hôte virtuel A à destination de l'hôte virtuel B, via le réseau de tests PLC.

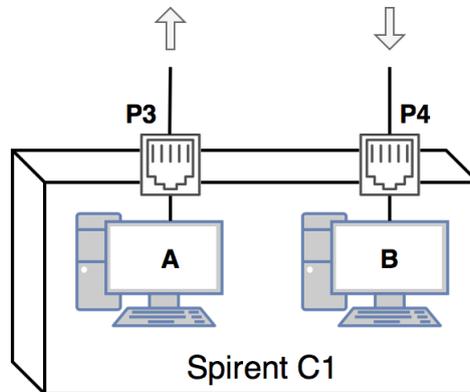


Figure 43 – Hôtes virtuels sur le générateur de trafic Spirent C1

Ces hôtes virtuels seront introduits dans le réseau local créé par le CPE. Ce CPE attribuant automatiquement les adresses IP des équipements se connectant à son réseau. Les adresses IP des hôtes virtuels créés sur le Spirent C1 sont à configurer manuellement. Afin d'attribuer ces adresses IP, il faudra trouver deux adresses IP non attribuées, c'est pourquoi nous ne présentons pas l'adressage IP dans cette partie de conception, mais durant la phase de réalisation, car ces adresses IP disponibles peuvent varier et ne peuvent pas être définies à l'avance.

Génération des flux de trafic

Afin de varier les flux de trafic générés sur le réseau de tests PLC, 5 différents flux de trafic vont être configurés:

1. Téléphonie (VoIP)
2. Télévision multicast
3. Télévision unicast
4. Internet
5. Management

Ces différents flux de trafic vont être définis sur le Spirent C1 avec différents paramètres. Durant ce projet, nous ne nous penchons pas sur l'analyse des flux de trafic, pour des informations plus détaillées sur les flux de trafic, veuillez vous référer au projet de semestre 6 de Monsieur Loïc Dufresne "Quel est l'effet de la QoS sur des petits réseaux de labo ?" [4].

Trafic	Transport	Classification de paquets		DSCP [Hex]	Volume [Mb/s]
		PHB	DSCP		
Téléphone	UDP	EF	46	2E	1
Télévision multicast	UDP	AF41	34	22	1
Télévision unicast	TCP	AF41	34	22	56
Internet	TCP	AF13	14	0E	41
Management	TCP	CS6	48	20	1

Figure 44 – Génération des flux de trafic

Les différents flux de trafic sont transportés avec les protocoles TCP ou UDP. La gestion des priorités est appelée PHB (Per-Hop Behaviour), elle s'effectue selon les différents types de flux de trafic. Le PHB est attribué aux flux de trafic par la valeur des six bits du champ DSCP (Differentiated Services Code Point). Le champ DSCP est un champ dans l'entête d'un paquet IP. Il permet la différenciation de services, il est défini dans la RFC 2474. Ce champ DSCP est configuré lors de la génération des flux de trafic sur le Spirent C1 afin que les paquets soient classifiés à la source. Cette classification de paquets permet de simuler au mieux ces flux de trafic afin d'imiter le trafic sur Internet. La classification de paquets permet une certaine QoS (Quality of Service) au niveau de la priorisation des flux lors de congestion sur le réseau.

Cisco définit la ligne à suivre au niveau de la QoS, nous pouvons voir les différentes applications et leur attribution aux classes PHB et à une valeur DSCP:

Application	L3 Classification PHB	DSCP	Referencing Standard	Recommended Configuration
IP Routing	CS6	48	RFC 2474-4.2.2	Rate-Based Queuing + RED
Voice	EF	46	RFC 3246	RSVP Admission Control + Priority Queuing
Interactive-Video	AF41	34	RFC 2597	RSVP + Rate-Based Queuing + DSCP-WRED
Streaming Video	CS4	32	RFC 2474-4.2.2	RSVP + Rate-Based Queuing + RED
Mission-Critical	AF31	26	RFC 2597	Rate-Based Queuing + DSCP-WRED
Call-Signaling	CS3	24	RFC 2474-4.2.2	Rate-Based Queuing + RED
Transactional Data	AF21	18	RFC 2597	Rate-Based Queuing + DSCP-WRED
Network Mgmt	CS2	16	RFC 2474-4.2.2	Rate-Based Queuing + RED
Bulk Data	AF11	10	RFC 2597	Rate-Based Queuing + DSCP-WRED
Scavenger	CS1	8	Internet 2	No BW Guarantee + RED
Best Effort	0	0	RFC 2474-4.1	BW Guarantee Rate-Based Queuing + RED

Figure 45 – Classes de trafic et classification définies par Cisco, source: www.cisco.com

Dans la plupart des réseaux, les classes suivantes, définies par les PHB, sont le plus souvent utilisées:

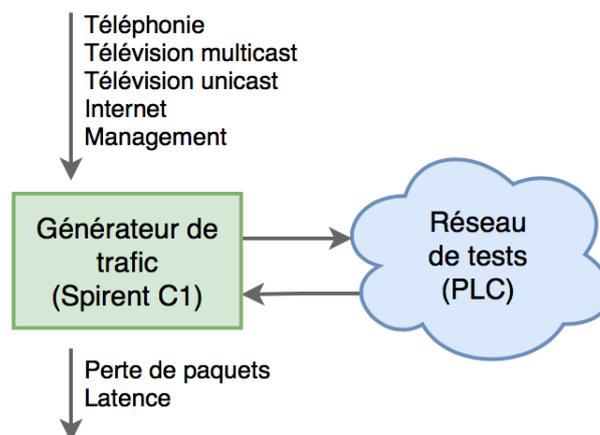
- **BE** (Best Effort): dédié aux flux meilleurs effort, aucun traitement particulier n'est appliqué à ces paquets de la part des noeuds du réseau
- **EF** (Expedited Forwarding): dédié aux flux sensibles aux délais, à faible perte et à faible latence
- **AF** (Assured Forwarding): dédié aux flux sensibles aux variations de la bande passante dans le réseau

Grâce à cette classification des paquets, les flux de voix et de management seront prioritaires sur les autres flux, et les flux du trafic Internet seront les flux les moins prioritaires.

Pour plus d'informations sur la QoS et la classification des paquets, veuillez vous référer au projet de semestre 6 de Monsieur Loïc Dufresne "Quel est l'effet de la QoS sur des petits réseaux de labo ?" [4].

Concernant le volume de trafic généré par flux, ces informations sont basées sur les résultats de l'opérateur Swisscom qui représentent la majeure partie du trafic Internet suisse. Ces volumes représentent au total une génération de trafic à 100% (100% = 100Mb/s). Pour plus d'informations sur ces taux de génération des différents flux de trafic résultant de l'opérateur Swisscom, veuillez vous référer au projet de semestre 5 Monsieur Simon Lièvre "QoS Lab" [5].

Les flux de trafic sont sensibles à plusieurs facteurs comme le délai ou latence qui indique le temps que parcourt un bit entre la source et la destination, et le taux de pertes qui indique le rapport entre le nombre de paquets émis et le nombre de paquets reçus, ce qui donne le nombre de paquets perdus. Les tests réalisés avec le Spirent C1 permettent d'analyser ces facteurs.



À noter que le générateur de trafic Spirent C1 n'est pas utilisé dans la première série de tests, mais dans la seconde série de tests.

3.1.3 Test 1: SpeedTest

Un réseau de tests est conceptualisé dans une grande maison afin de tester les performances de ces équipements Devolo en cas réel. Cet environnement de tests est aussi choisi, car le réseau électrique est connu, ce qui permet de schématiser le réseau avec les différentes phases du réseau électrique du bâtiment. De plus, ce bâtiment comprend une introduction et deux compteurs, pour deux appartements, donc deux paires de phases dans la maison, ce qui permet de pousser encore plus les tests.

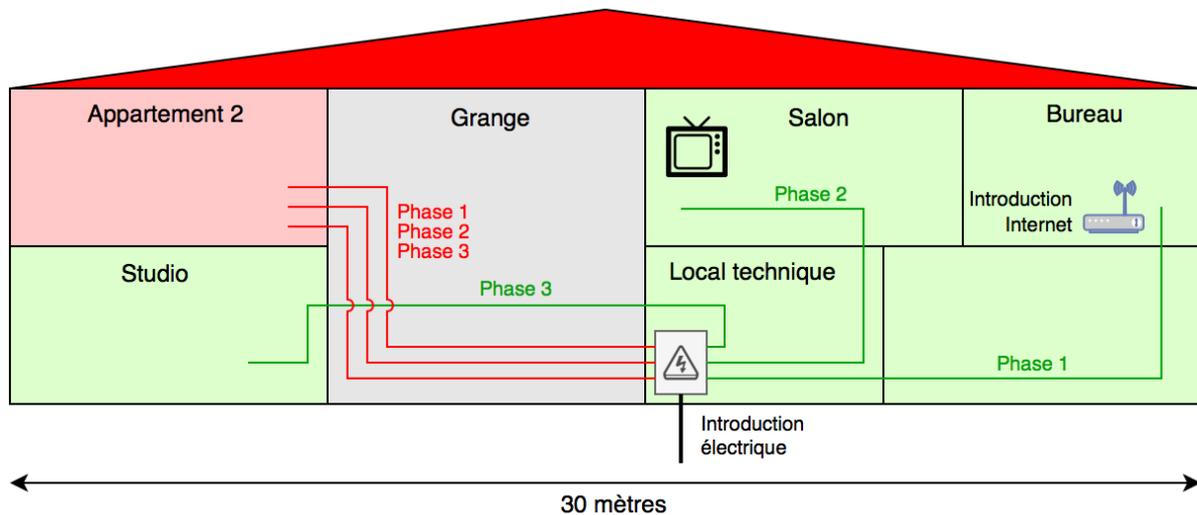


Figure 46 – Schéma du bâtiment avec réseaux électriques 220 V et phases

À noter que les habitants de ce bâtiment ont souscrit un abonnement chez Swisscom de 100 Mb/s, l'introduction Internet étant dans le bureau (voir schéma précédent).

En schématisant grossièrement le tableau électrique de cette habitation, les deux compteurs offrent deux réseaux électriques séparés dans l'habitation:

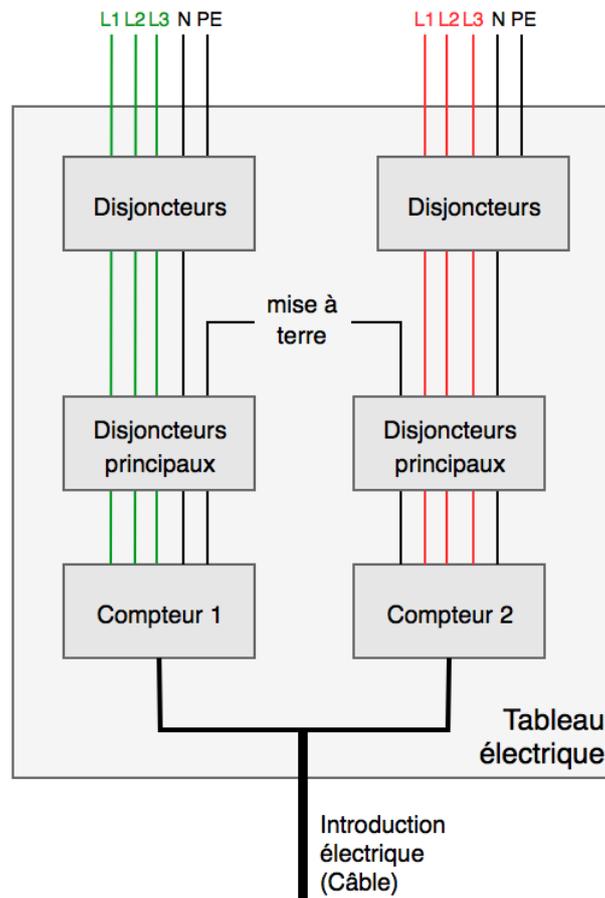


Figure 47 – Schéma du tableau électriques contenant les deux compteurs du bâtiment

À noter que ce schéma du tableau électrique a été réalisé avec l'aide d'un électricien et ne schématise que les éléments principaux du tableau électrique. En vert, le réseau électrique 1 est schématisé, et en rouge, le réseau électrique 2 est schématisé (L1/L2/L3 sont les trois phases, N désigne le neutre et PE désigne la terre).

Cette première série de scénarios de tests permet de tester et comparer les cas suivants:

- Comparaison des débits et de la bande passante offerts depuis le CPE principal et le réseau PLC sur une même phase du réseau électrique
- Comparaison des débits et de la bande passante offerts depuis le CPE principal et le réseau PLC sur les autres phases du réseau électrique
- Comparaison des débits et de la bande passante offerts depuis le CPE principal et le réseau PLC sur un autre réseau électrique (au travers des deux compteurs)

Ces cas permettent d'analyser la puissance du signal lorsque les appareils Devolo se trouvent sur la même phase, sur d'autres phases ou même sur un autre réseau ce qui signifierait que théoriquement le signal passerait au travers de deux compteurs.

Devolo garantit que grâce au saut de phases à haute fréquence, le signal passe d'une phase à l'autre au niveau du tableau électrique, nous allons tester ces dires. Nous allons aussi tester si les phases du second réseau électrique du bâtiment sont alimentées par le signal du premier réseau électrique, ce qui signifierait une pollution en amont du compteur.

Pour réaliser ces tests, nous avons à disposition les outils suivants:

- **Software Cockpit:** disponible sur le site Web Devolo, permet de paramétrer les équipements Devolo et analyser les débits disponibles sur chacun des appareils Devolo.
- **SpeedTest Swisscom:** disponible sur le site Web de Swisscom, permet de mesurer le débit descendant (Download) et montant (Upload), ainsi que le temps de réponse en milliseconde.
- **SpeedTest CNLAB:** disponible sur le site Web de CNLAB, permet de mesurer le débit descendant (Download) et montant (Upload), ainsi que le temps de réponse en milliseconde.

Pour réaliser ces tests avec ces outils, nous connecterons des ordinateurs aux différents points d'accès (CPE ou PLC) en mode câblé ou WiFi.

Scénario de tests 1.1:

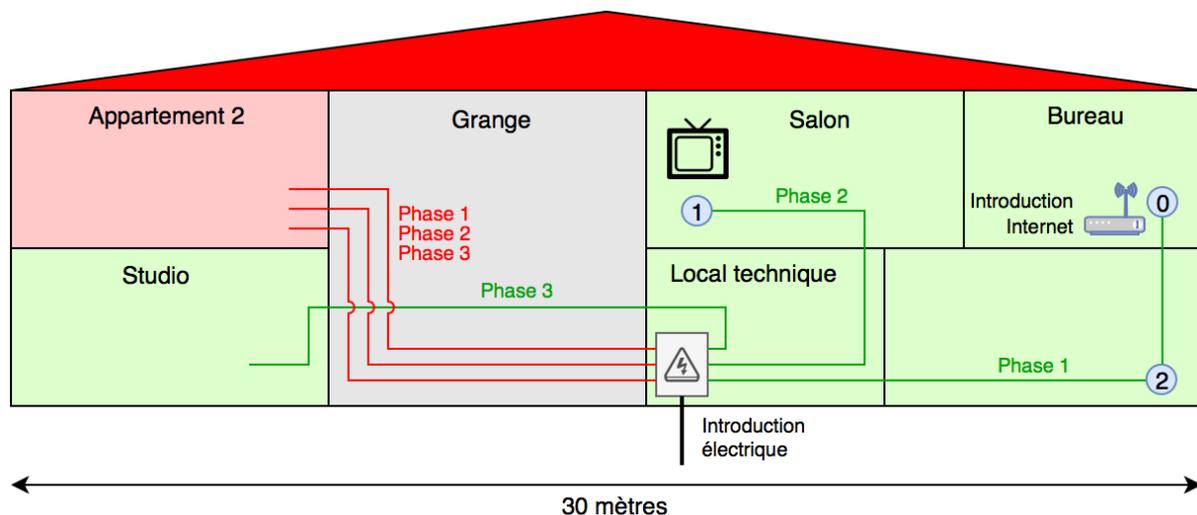


Figure 48 – Schéma du réseau de tests pour le scénario de tests 1.1

En se référant au précédent schéma, ce réseau de tests sera mis en place. L'équipement Devolo 0 est placé dans le bureau et relié avec un câblé Ethernet au CPE branché à l'introduction Internet, il permet d'alimenter, avec le signal, le réseau électrique du bâtiment. L'équipement Devolo 1 est placé sur une autre phase du même réseau électrique et la télévision y est connectée via un Ethernet, le signal de la télévision passe donc par le réseau PLC. L'équipement Devolo 2 est placé sur la même phase que l'équipement Devolo 0.

Ce scénario de tests permet d'observer si le signal est détectable sur la même phase et injecté sur les autres phases du réseau électrique. Nous pouvons ainsi mesurer le débit disponible sur la phase où se trouve connecté le CPE et le débit disponible sur une autre phase du même réseau.

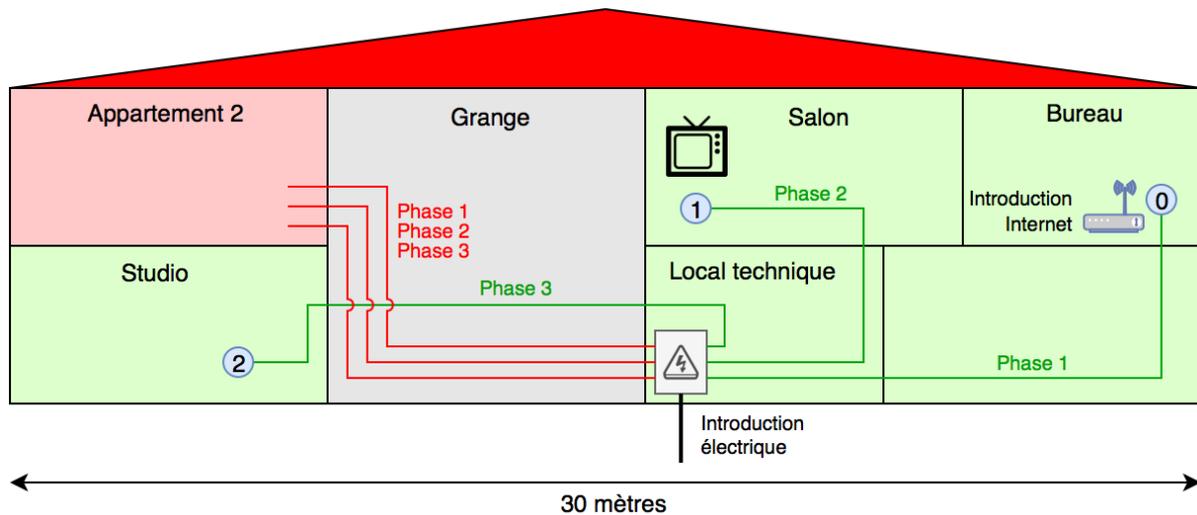
Scénario de tests 1.2:

Figure 49 – Schéma du réseau de tests pour le scénario de tests 1.2

En se référant au précédent schéma, ce réseau de tests sera mis en place. L'équipement Devolo 0 est placé dans le bureau et relié avec un câblé Ethernet au CPE branché à l'introduction Internet, il permet d'alimenter, avec le signal, le réseau électrique du bâtiment. L'équipement Devolo 1 et 2 sont placés sur deux autres phases du même réseau électrique et la télévision y est connectée via un Ethernet sur une des phases, le signal de la télévision passe donc par le réseau PLC.

Ce scénario de tests permet d'observer si le signal est injecté sur les deux autres phases du réseau électrique. Nous pourrions ainsi mesurer le débit disponible sur les deux autres phases du même réseau électrique.

Scénario de tests 1.3:

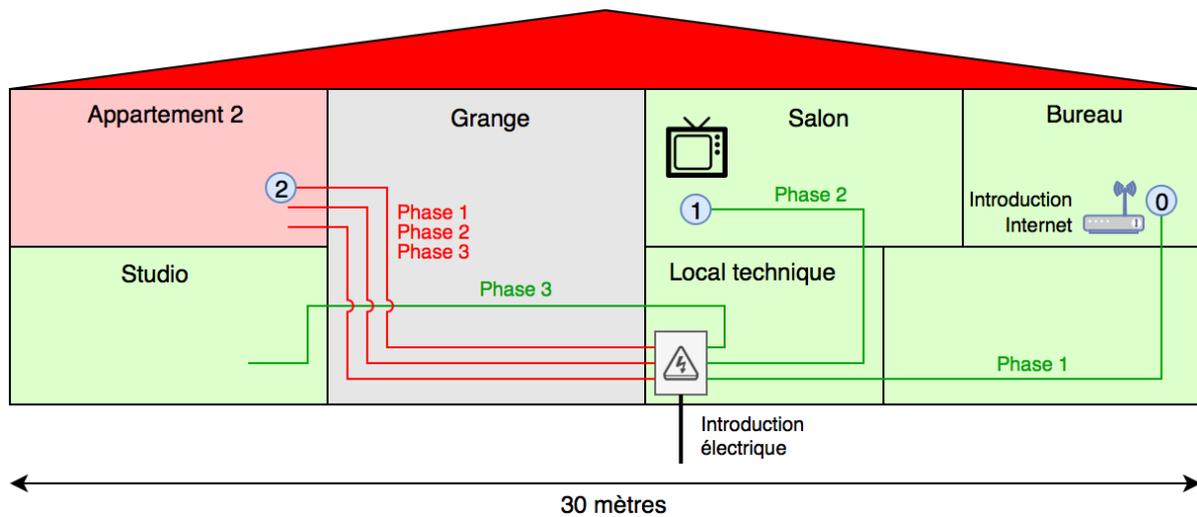


Figure 50 – Schéma du réseau de tests pour le scénario de tests 1.3

En se référant au précédent schéma, ce réseau de tests sera mis en place. L'équipement Devolo 0 est placé dans le bureau et relié avec un câblé Ethernet au CPE branché à l'introduction Internet, il permet d'alimenter, avec le signal, le réseau électrique du bâtiment. L'équipement Devolo 1 est placé sur une autre phase du même réseau électrique et la télévision y est connecté via un Ethernet, le signal de la télévision passe donc par le réseau PLC. L'équipement Devolo 2 est placé sur une phase du second réseau électrique du bâtiment.

Ce scénario de tests permet d'observer si le signal est injecté sur les autres phases du réseau électrique et même sur le second réseau électrique. Nous pourrions ainsi mesurer le débit disponible sur une autre phase du même réseau électrique et le débit disponible sur une phase du second réseau électrique du bâtiment.

3.1.4 Test 2: Spirent C1

Pour cette seconde série de tests sur le réseau de tests PLC, le Spirent C1 est utilisé afin de générer du trafic sur ces réseaux de tests et d'en analyser les pertes de paquets et la latence.

La latence et les pertes de paquets seront analysées sur le réseau PLC, grâce à plusieurs scénarios de tests. Cette seconde série de scénarios de tests permet de tester et comparer les cas suivants:

- Latence et perte de paquets sur le réseau de tests PLC, en restant sur la même phase du réseau électrique
- Latence et perte de paquets sur le réseau de tests PLC, en utilisant deux phases différentes du réseau électrique
- Latence et perte de paquets sur le réseau de tests PLC, en utilisant deux réseaux électriques différents

À noter que ce deuxième environnement de réseaux de tests PLC est le même que celui mis en place pour la première série de tests. Les équipements Devolo sont placés aux mêmes endroits. Vous pouvez toujours vous référer aux précédents schémas du bâtiment. Les trois phases du réseau électrique sont testées et le second réseau électrique.

Scénario de tests 2.1:

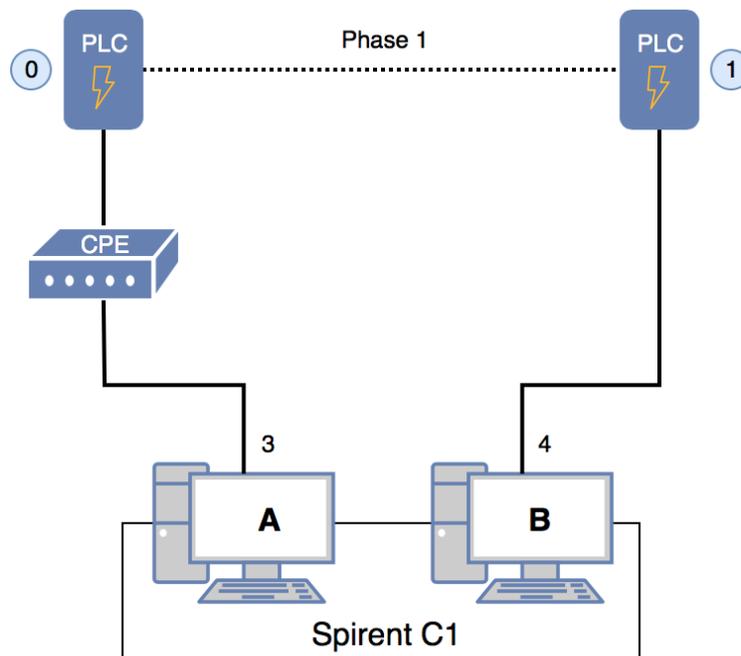


Figure 51 – Schéma du réseau de tests pour le scénario de tests 2.1

En se référant au précédent schéma, ce réseau de tests sera mis en place. L'équipement Devolo 0 est placé au même endroit que dans la première série de tests, dans le bureau et relié avec un câblé Ethernet au CPE branché à l'introduction Internet, il permet d'alimenter, avec le signal, le réseau électrique du bâtiment sur la phase 1. L'équipement Devolo 1 est placé sur la même phase du réseau électrique du bâtiment.

L'hôte virtuel A du générateur de trafic Spirent C1 est branché au CPE, et injecte les flux de trafic dans le réseau de tests à destination de l'hôte virtuel B via le réseau PLC. Le réseau PLC est construit sur la même phase du bâtiment, la phase 1, les différents flux de trafic ne transiteront que via la phase 1.

Ce scénario de tests permet d'analyser la latence et la perte de paquets des différents flux de trafic au travers le réseau PLC, tout en restant sur la même phase.

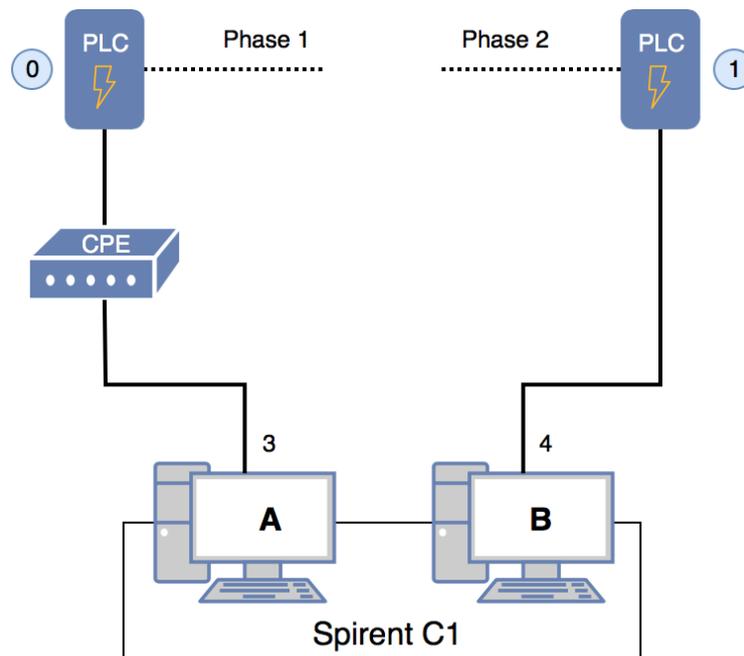
Scénario de tests 2.2:

Figure 52 – Schéma du réseau de tests pour le scénario de tests 2.2

En se référant au précédent schéma, ce réseau de tests sera mis en place. L'équipement Devolo 0 ne change pas de place, il reste branché au CPE et sur la phase 1 du réseau électrique. L'équipement Devolo 1 est placé sur une autre phase que l'équipement Devolo 0.

L'hôte virtuel A du générateur de trafic Spirent C1 est branché au CPE et injecte les flux de trafic dans le réseau de tests à destination de l'hôte virtuel B via le réseau PLC. Le réseau PLC est construit sur deux phases différentes, la phase 1 où est branché le premier équipement PLC et la phase 2 où est branché le second équipement PLC, les différents flux de trafic transiteront via la phase 1 et la phase 2.

Ce scénario de tests permet d'analyser la latence et la perte de paquets des différents flux de trafic au travers le réseau PLC, tout en transitant par deux phases différentes.

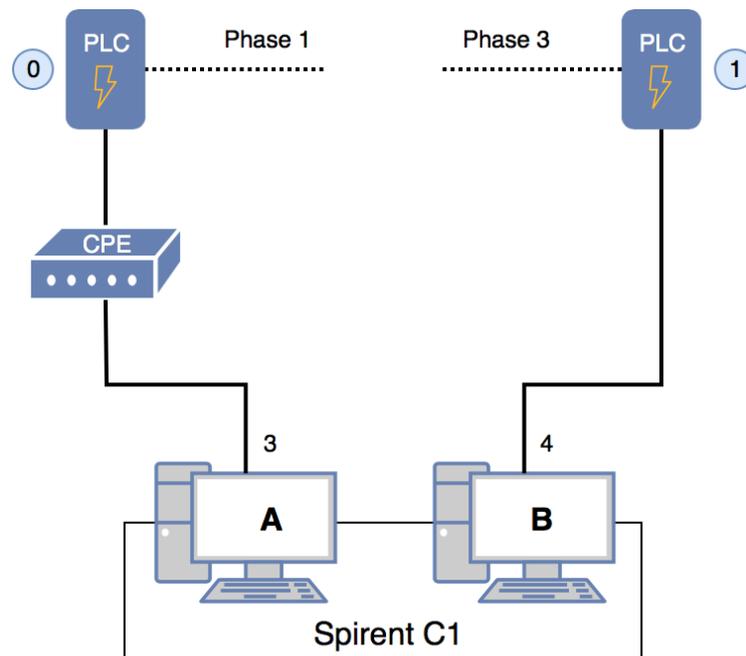
Scénario de tests 2.3:

Figure 53 – Schéma du réseau de tests pour le scénario de tests 2.3

En se référant au précédent schéma, ce réseau de tests sera mis en place. L'équipement Devolo 0 ne change pas de place, il reste branché au CPE et sur la phase 1 du réseau électrique. L'équipement Devolo 1 est placé sur une autre phase que l'équipement Devolo 0.

L'hôte virtuel A du générateur de trafic Spirent C1 est branché au CPE et injecte les flux de trafic dans le réseau de tests à destination de l'hôte virtuel B via le réseau PLC. Le réseau PLC est construit sur deux phases différentes, la phase 1 où est branché le premier équipement PLC et la phase 3 où est branché le second équipement PLC, les différents flux de trafic transiteront via la phase 1 et la phase 3.

Ce scénario de tests permet d'analyser la latence et la perte de paquets des différents flux de trafic au travers le réseau PLC, tout en transitant par deux phases différentes.

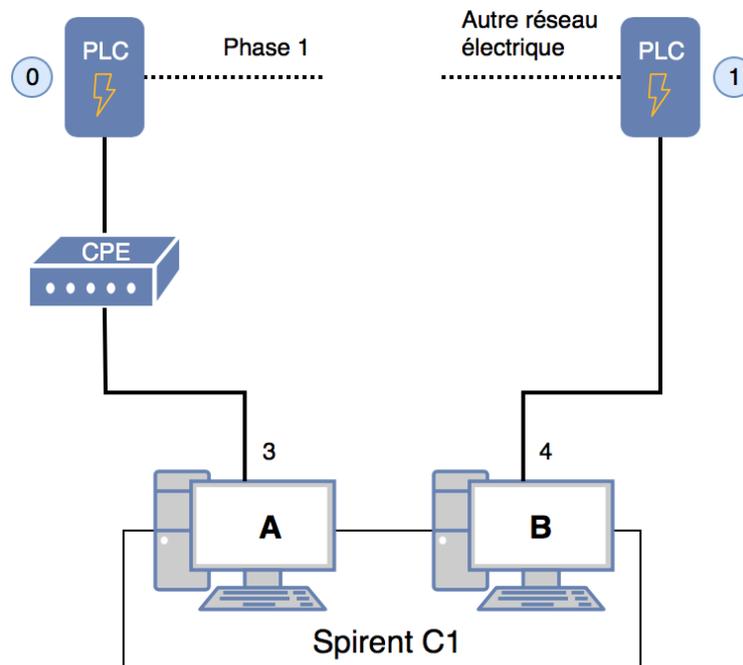
Scénario de tests 2.4:

Figure 54 – Schéma du réseau de tests pour le scénario de tests 2.4

En se référant au précédent schéma, ce réseau de tests sera mis en place. L'équipement Devolo 0 ne change pas de place, il reste branché au CPE et sur la phase 1 du premier réseau électrique. L'équipement Devolo 1 est placé sur le second réseau électrique Devolo 0. Les deux équipements Devolo ne sont donc pas placés sur le même réseau électrique, mais nous avons pu observer que le signal PLC est injecté sur les deux réseaux électriques grâce à la première série de tests.

L'hôte virtuel A du générateur de trafic Spirent C1 est branché au CPE et injecte les flux de trafic dans le réseau de tests à destination de l'hôte virtuel B via le réseau PLC. Le réseau PLC est construit sur deux réseaux électriques différents, la phase 1 où est branché le premier équipement PLC et le second réseau électrique où est branché le second équipement PLC, les différents flux de trafic transiteront via la phase 1 et la phase 3.

Ce scénario de tests permet d'analyser la latence et la perte de paquets des différents flux de trafic au travers le réseau PLC, tout en transitant par deux réseaux électriques différents.

3.2 Conclusion de la conception

Les réseaux tests conceptualisés dans cette partie du projet de Bachelor se concentrent autour de la technologie PLC. En effet, des équipements PLC de la marque Devolo ont été commandés afin d'en analyser les performances.

Ces équipements Devolo sont des produits de dernière génération et de hautes performances. Théoriquement, ils sont capables d'offrir des débits allant jusqu'à 1.2 Gb/s en mode câblé et WiFi. C'est pourquoi des réseaux de tests et des scénarios de tests ont été pensés afin de valider ces performances.

Les réseaux de tests ont été conceptualisés dans un vrai bâtiment afin de refléter au mieux les conditions d'utilisation de ces équipements. Le réseau électrique de ce bâtiment étant assez conséquent, deux réseaux électriques séparés sont un atout pour réaliser ces tests. Lors des tests, les trois phases des réseaux électriques sont utilisées afin de tester les performances entre phases. Le signal PLC étant à haute fréquence, le saut de phases au niveau de tableau électrique est possible, à voir si le signal passe aussi sur le second réseau électrique, les deux compteurs se trouvant dans le même tableau électrique, le saut de phases au niveau des deux réseaux électriques étant potentiellement possible.

Dans une première série de tests, différents SpeedTest sont réalisés afin de comparer les débits montants et descendants, depuis le CPE du bâtiment afin d'avoir une mesure de base, et depuis les différentes phases du réseau électrique afin d'y voir les différences de débits.

Dans une seconde série de tests, le puissant générateur de trafic Spirent C1 est utilisé afin de générer du trafic sur le réseau de tests PLC, toujours en jouant avec les différentes phases du premier réseau électrique, et le second réseau électrique, afin d'y analyser la latence et les pertes de paquets à un certain débit de génération. Les flux de trafic générés par le Spirent C1 reflètent le trafic Internet grâce à la classification des différents types de flux, ce qui permettra de vérifier si le CPE réalise une priorisation des flux, ce qui apportera une certaine QoS sur notre réseau de tests. En se basant sur les chiffres de l'opérateur Swisscom, le taux de génération de chaque flux de trafic reflètent aussi le trafic Internet.

Ces scénarios de tests permettent de valider ou non les performances de ces équipements Devolo. En cas de bons résultats, ces équipements peuvent être mis en place dans des bâtiments afin d'éviter de tirer une fibre optique à travers le bâtiment. Le CPE serait placé à l'introduction de la fibre optique (BEP), dans la cave, par exemple, et le premier équipement Devolo serait branché au CPE. Plusieurs autres équipements Devolo seraient placés dans le bâtiment afin d'alimenter tout le bâtiment avec le signal. Plusieurs équipements Devolo offrirait un bon WiFi, disponible dans toutes les parties du bâtiment et donc une connexion dans toutes les pièces.

Mettre en place une solution PLC, peut garantir une réduction des coûts dans le segment Inhouse du réseau d'accès.

4 Réalisation

La partie réalisation de ce projet de Bachelor permet de réaliser et mettre en place les réseaux de tests conçus dans la partie de conception.

Des photos, des différents réseaux de tests permettant l'analyse des performances des équipements PLC (Powerline Communication), sont présentées afin de bien comprendre et visualiser l'environnement de tests.

Comme déjà cité, dans certains tests, nous utilisons le puissant générateur de trafic Spirent C1. La configuration globale cet équipement est décrite et les paramétrages des différents flux de trafic générés seront précisés.

4.1 PLC (Powerline Communication)

Après la conception des réseaux de tests PLC, ils sont maintenant mis en place afin d'y tester les performances de ces équipements grâce aux différents scénarios de tests.

4.1.1 Test 1: SpeedTest

Veuillez vous référer au chapitre 3.1.3 pour la conception de ce test.

Ce premier test est découpé en trois scénarios de tests comme le démontre la partie conception. Pour les trois scénarios de tests (voir schéma 48, 49 et 50), le premier équipement PLC (Devolo 0) est connecté par câble au CPE (Swisscom) de l'appartement. Puis, cet équipement PLC (Devolo 0) est branché sur une prise (phase 1) du réseau 220 V du bâtiment. Ces équipements sont placés dans le bureau du bâtiment, il permet d'injecter le signal Internet sur le réseau électrique.



Figure 55 – CPE (Swisscom) et équipement PLC (Devolo 0) placés dans le bureau

Scénario de tests 1.1

Pour ce premier scénario de tests (voir schéma 48), le second équipement PLC (Devolo 1) est branché au salon sur une autre phase (phase 2) du réseau électrique 220 V du bâtiment. Pour des tests de qualité, la télévision est branchée par câble sur cet équipement PLC, le signal de la télévision passe maintenant via le réseau électrique.



Figure 56 – Équipement PLC (Devolo 1) placé dans le salon et câblé à la télévision

Le troisième équipement PLC (Devolo 2) est branché sur la même phase (phase 1) que l'équipement PLC de base (Devolo 0).

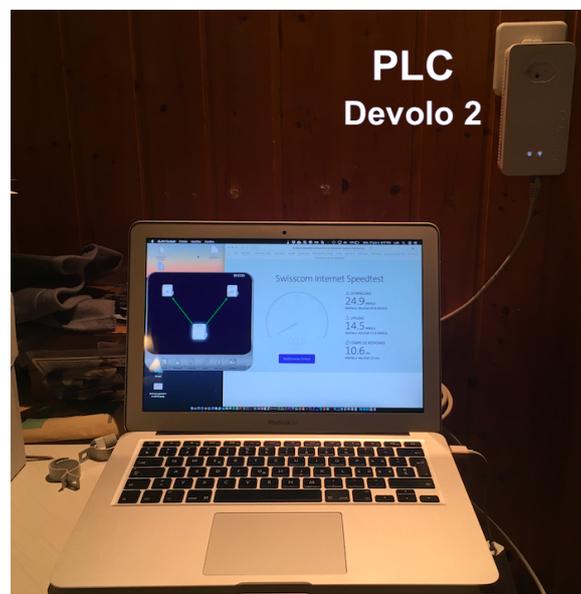


Figure 57 – Équipement PLC (Devolo 2) placé dans le bureau

À noter que les équipements PLC (Devolo) sont branchés au réseau électrique 220 V et ils se synchronisent automatiquement après 1 minute, il n'y a donc pas besoin de les paramétrer. La mise en place de ces équipements se fait très simplement.

Les trois équipements PLC (Devolo) sont maintenant branchés au réseau électrique 220 V sur deux phases différentes. Le software Cockpit, fournit sur le site Web Devolo, permet de visualiser les trois appareils PLC (Devolo), nous allons confirmer que ces trois équipements sont visibles et fonctionnels. Bien entendu, pour avoir la vision de ces équipements, l'ordinateur où se trouve le software Cockpit doit se trouver sur le réseau local du bâtiment, sur le même réseau où se trouve les équipement PLC (Devolo).

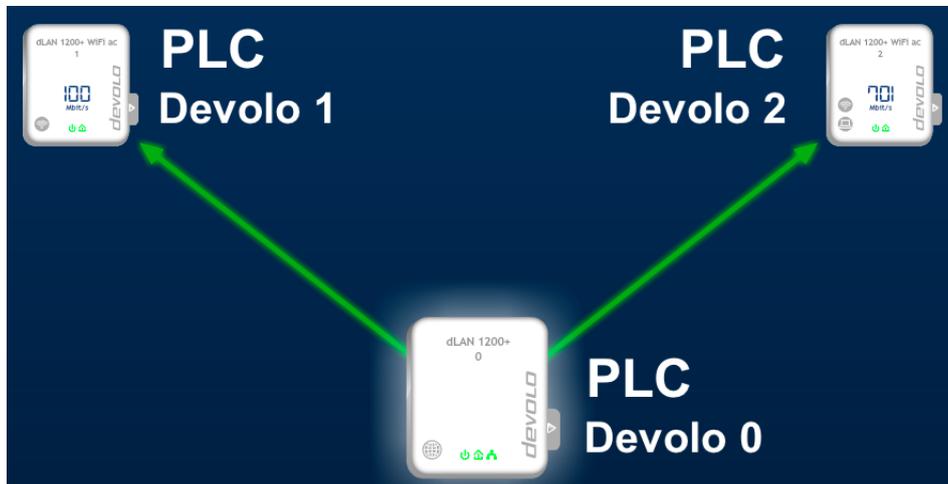


Figure 58 – Visualisation des trois équipements PLC (Devolo) avec le software Cockpit

Les trois équipements PLC (Devolo) sont fonctionnels. Nous pouvons déjà valider un premier point, le saut de phases à haute fréquence fonctionne, car le second équipement PLC (Devolo 1) est visible et ce dernier se trouve sur une autre phase du réseau électrique (phase 2), alors que les deux autres équipements qui se trouve sur une autre phase du réseau électrique (phase 1).

Le software Cockpit affiche aussi le débit offert par les deux équipements PLC (Devolo 1 et 2) placés dans le bâtiment:

- **Devolo 1:** 100 Mb/s pour cet équipement PLC placé sur une autre phase (phase 2) que l'équipement PLC (Devolo 0) injectant le signal sur le réseau électrique
- **Devolo 2:** 701 Mb/s pour cet équipement PLC placé sur la même phase (phase 1) que l'équipement PLC (Devolo 0) injectant le signal sur le réseau électrique

Ces débits sont un premier aperçu, mais nous pouvons déjà dire qu'il y a une perte de débit assez conséquente entre les différentes phases. Nous analyserons ces débits et performances dans la phase de tests et validations.

Ce premier scénario de tests est opérationnel pour différents tests.

Scénario de tests 1.2

Pour ce second scénario de tests (voir schéma 49), le second équipement PLC (Devolo 1) est toujours branché au salon sur une autre phase (phase 2) du réseau électrique 220 V du bâtiment. Cet équipement ne change pas d'emplacement afin de réaliser des tests de longues durées sur le fait que le signal de la télévision transite via cet équipement.

Le troisième équipement PLC (Devolo 2) est branché au studio, la troisième phase (phase 3) est maintenant aussi utilisée pour propager le signal Internet sur le réseau électrique 220 V.

Les trois phases du réseau électrique 220 V étant utilisées, le software Cockpit est utilisé pour valider que les trois équipements PLC (Devolo) sont fonctionnels et que le signal transite par toutes les phases.

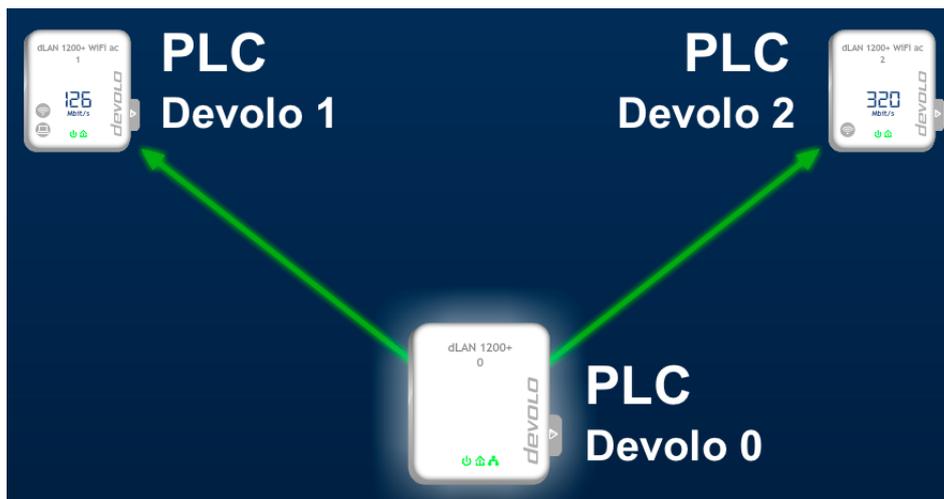


Figure 59 – Visualisation des trois équipements PLC (Devolo) avec le software Cockpit

Les trois équipements PLC (Devolo) sont fonctionnels. Le saut de phases à haute fréquence est fonctionnel sur les trois phases du réseau électrique 220 V, car les trois équipements sont visibles et repartis sur les trois phases.

Le débit offert par les deux équipements PLC (Devolo 1 et 2) placés dans le bâtiment:

- **Devolo 1:** 126 Mb/s pour cet équipement PLC placé sur une autre phase (phase 2) que l'équipement PLC (Devolo 0) injectant le signal sur le réseau électrique
- **Devolo 2:** 320 Mb/s pour cet équipement PLC placé sur une autre phase (phase 3) que l'équipement PLC (Devolo 0) injectant le signal sur le réseau électrique

Entre les scénarios de tests 1 et 2, le second équipement PLC (Devolo 1) n'a pas changé d'emplacement, et nous pouvons déjà voir une variation de débit de 26 Mb/s. Le troisième équipement PLC (Devolo 2) étant maintenant placé sur la troisième phase (phase 3) affiche un débit de 320 Mb/s, ce qui est assez performant avec ce changement de phases. Les longueurs de câbles électriques étant peut-être moins longues. Nous analyserons ces débits et performances dans la phase de tests et validations.

Ce second scénario de tests est opérationnel pour différents tests.

Scénario de tests 1.3

Pour ce troisième scénario de tests (voir schéma 50), le second équipement PLC (Devolo 1) est toujours branché au salon sur une autre phase (phase 2) du réseau électrique 220 V du bâtiment. Cet équipement ne change pas d'emplacement afin de réaliser des tests de longues durées sur le fait que le signal de la télévision transite via cet équipement.

Le troisième équipement PLC (Devolo 2) est branché dans le deuxième appartement du bâtiment, ce qui veut dire qu'il est branché sur le second réseau électrique du bâtiment, ce qui nous permet de voir si le signal est injecté dans les trois autres phases d'un autre réseau électrique 200 V.

Le software Cockpit est utilisé pour voir si le signal est injecté sur le second réseau électrique du bâtiment.

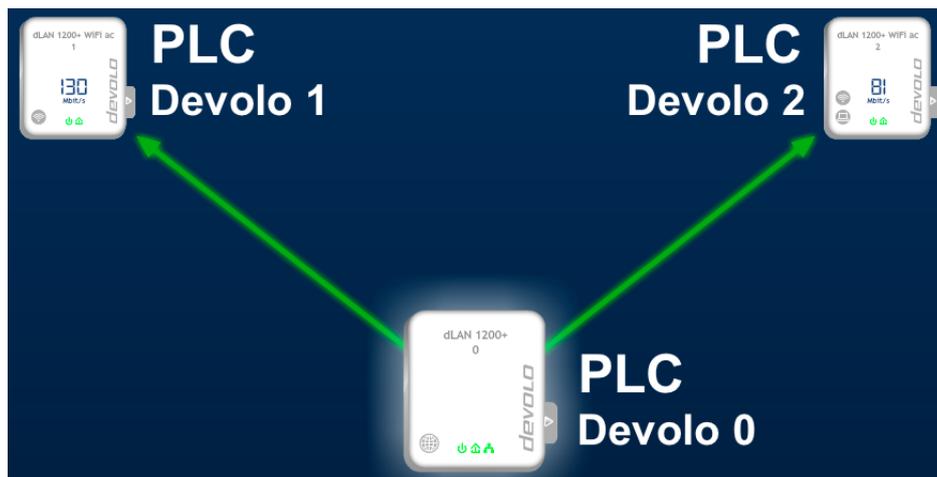


Figure 60 – Visualisation des trois équipements PLC (Devolo) avec le software Cockpit

Fait étonnant, les trois équipements PLC (Devolo) sont visibles et fonctionnels. Le signal du premier réseau électrique est aussi disponible sur le second réseau électrique du bâtiment.

À première vue, nous pensions que le signal passait au travers des deux compteurs électriques du bâtiment, afin de faire le lien entre les deux réseaux électriques 220 V. Mais après réflexion, nous savons que la technologie PLC utilise la haute fréquence pour injecter le signal sur les trois phases au niveau du tableau électrique ou lorsque les câbles sont le plus proche possible. Dans le tableau électrique, les trois phases des deux réseaux électriques sont très proches, la haute fréquence permet donc d'injecter le signal des équipements PLC sur toutes les phases des deux réseaux électriques en partance du tableau électrique.

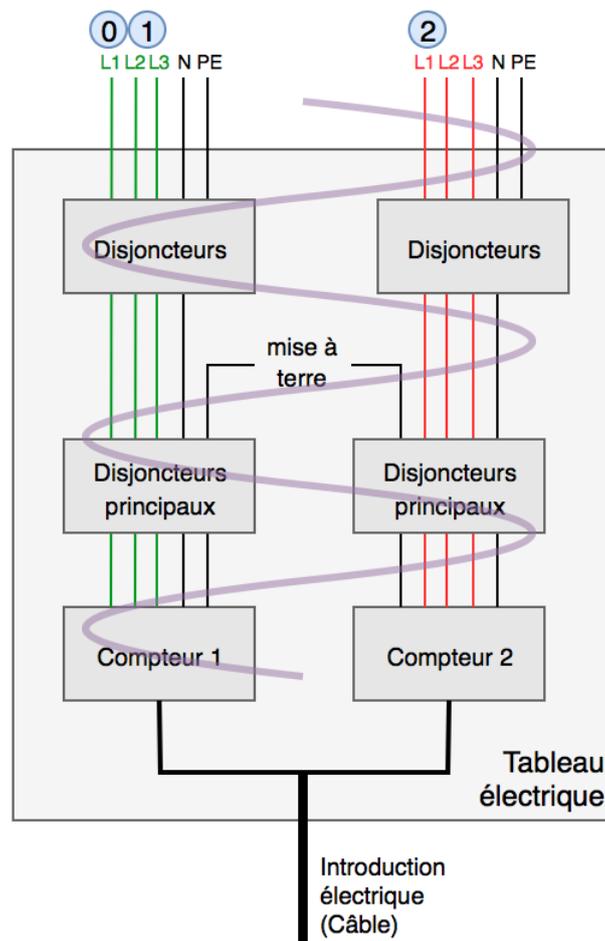


Figure 61 – Répartition du signal PLC dans les deux paires de phases partant du tableau électrique

Le saut de phases à haute fréquence est fonctionnel sur les deux réseaux électriques 220 V, car les trois équipements sont visibles.

Le débit offert par les deux équipements PLC (Devolo 1 et 2) placés dans le bâtiment:

- **Devolo 1:** 130 Mb/s pour cet équipement PLC placé sur une autre phase (phase 2), mais sur le même réseau électrique que l'équipement PLC (Devolo 0) injectant le signal
- **Devolo 2:** 81 Mb/s pour cet équipement PLC placé sur un autre réseau électrique que l'équipement PLC (Devolo 0) injectant le signal sur le réseau électrique

Entre les scénarios de tests 1, 2 et 3, le second équipement PLC (Devolo 1) n'a pas changé d'emplacement, et son débit reste plus ou moins le même. Le troisième équipement PLC (Devolo 2) phase affiche un débit de 81 Mb/s, ce qui est assez faible en comparaison des autres débits offerts, mais cela vient du fait que cet équipement est placé sur un tout autre réseau électrique. Nous analyserons ces débits et performances dans la phase de tests et validations.

Ce troisième scénario de tests est opérationnel pour différents tests.

4.1.2 Test 2: Spirent C1

Veuillez vous référer au chapitre 3.1.4 pour la conception de ce test.

Ce test est découpé en 4 scénarios de tests comme le démontre la partie conception. Pour les trois scénarios de tests (voir schéma 51, 52, 53 et 54), le premier équipement PLC (Devolo 0) est connecté par câble au CPE (Swisscom) de l'appartement. Puis, cet équipement PLC (Devolo 0) est branché sur une prise (phase 1) du réseau 220 V du bâtiment. Cet équipement permet d'injecter le signal Internet sur le réseau électrique.

L'hôte virtuel A du Spirent C1 injecte directement les flux de trafic généré dans le CPE. Puis ces flux de trafic transiteront via le réseau PLC afin de se diriger vers la destination étant l'hôte virtuel B du Spirent C1.

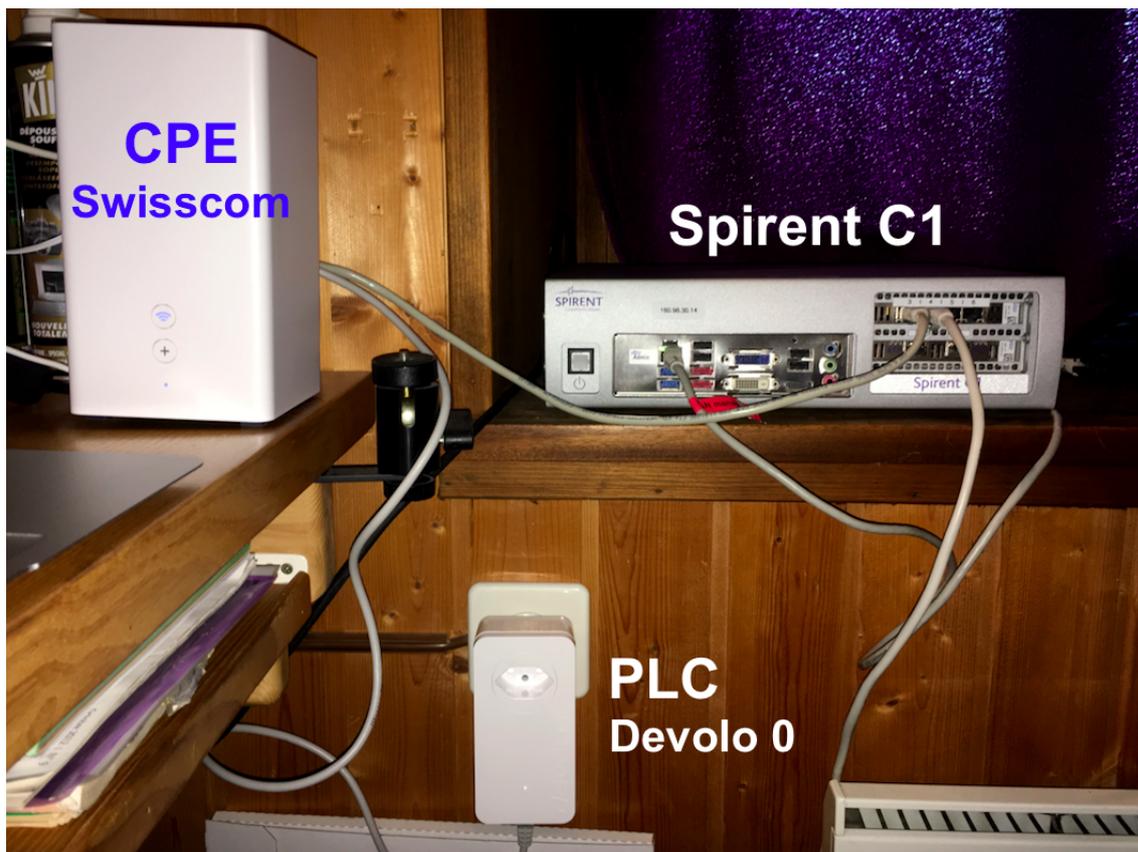


Figure 62 – CPE (Swisscom), Spirent C1 et équipement PLC (Devolo 0)

Pour la configuration du Spirent C1, nous nous sommes basés sur la documentation de configuration du Spirent C1 réalisé en annexe du projet de semestre 6 de Monsieur Loïc Dufresne "Quel est l'effet de la QoS sur des petits réseaux de labo ?" [6]. Dans cette partie de réalisation du projet, nous ne décrivons que les spécificités et la vue d'ensemble des éléments configurés sur le Spirent C1.

Les configurations relatives à ces scénarios de tests se passent entièrement au niveau du Spirent C1. Pour les trois scénarios de tests, les configurations du Spirent C1, au niveau des hôtes virtuels et de la génération des flux de trafic, restent les mêmes.

Hôtes virtuels

Deux hôtes virtuels vont être configurés sur le Spirent C1:

1. L'hôte virtuel A, sur le port 3 du Spirent C1, permet de générer les flux de trafic afin de les injecter sur le réseau de tests
2. L'hôte virtuel B, sur le port 4 du Spirent C1, permet de réceptionner les flux de trafic en provenance du réseau de tests

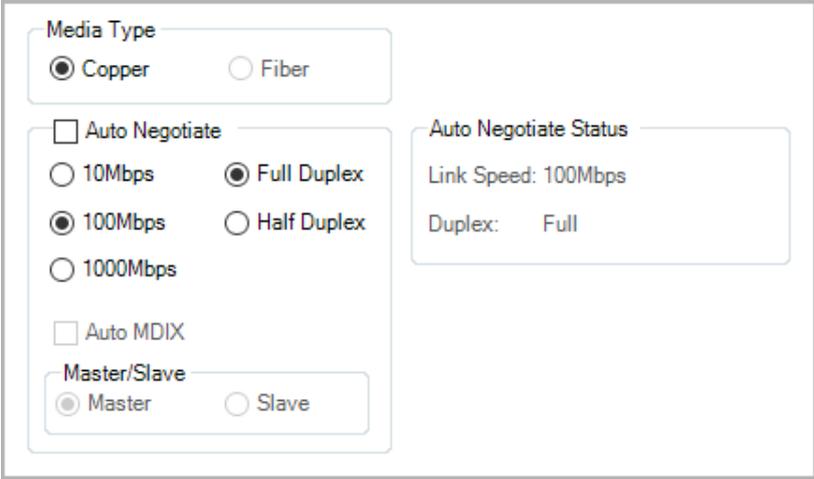
Name	Value
Interface	
EthernetII	
Source MAC	00:10:94:00:00:0B
IPv4 Header	
ToS/DiffServ	tos (0x00)
Time to live (int)	255
Source	192.168.1.10
Modifier	Count=1;Step=0.0.0.1
Prefix Length (int)	24
Destination Prefix Length (int)	24
Gateway	192.168.10.1
Modifier	Count=1;Step=0.0.0.0

Name	Value
Interface	
EthernetII	
Source MAC	00:10:94:00:00:0C
IPv4 Header	
ToS/DiffServ	tos (0x00)
Time to live (int)	255
Source	192.168.1.20
Modifier	Count=1;Step=0.0.0.1
Prefix Length (int)	24
Destination Prefix Length (int)	24
Gateway	192.168.10.1
Modifier	Count=1;Step=0.0.0.0

Figure 63 – Configuration des hôtes virtuels A et B sur le Spirent C1

Sur la gauche de la figure précédente, les hôtes virtuels A et B sont visibles sur les ports 3 et 4. Sur la droite de la figure précédente, les configurations de ces deux hôtes virtuels. Après la mise en place du réseau de tests, une analyse du réseau du CPE a été réalisée pour noter les adresses IP non attribuées, afin d'attribuer manuellement une adresse IP aux deux hôtes virtuels. L'adresse IP 192.168.1.10 a été attribuée à l'hôte virtuel A, et l'adresse IP 192.168.1.20 à l'hôte virtuel B.

La vitesse des ports est configurée à 100 Mb/s, ce qui veut dire que le trafic est généré depuis l'hôte virtuel A à un débit de 100 Mb/s et réceptionner par l'hôte virtuel B au même débit. Ce volume de trafic généré est reparti entre les cinq différents types de flux de trafic, comme le montre la figure 44.



The image shows a configuration window for a network interface. It contains several sections:

- Media Type:** Radio buttons for Copper and Fiber.
- Auto Negotiate:** A checkbox Auto Negotiate. Below it are radio buttons for 10Mbps, Full Duplex, 100Mbps, Half Duplex, and 1000Mbps.
- Auto MDIX:** A checkbox Auto MDIX.
- Master/Slave:** Radio buttons for Master and Slave.
- Auto Negotiate Status:** A summary box showing **Link Speed: 100Mbps** and **Duplex: Full**.

Figure 64 – Configuration de la vitesse des ports sur le Spirent C1

Les hôtes virtuels sont configurés, la seconde étape de configuration du Spirent C1 peut débuter, il s'agit de la génération des flux de trafic.

Génération des flux de trafic

Comme décrit dans la partie conception, nous définissons cinq types de flux trafic, la téléphonie, la télévision unicast, la télévision multicast, l'Internet et le management. La génération des flux de trafic se configure sur l'hôte virtuel A, car cet hôte virtuel est celui générant le trafic pour le réseau de tests. Ces flux de trafic sont injectés dans le réseau à 100 Mb/s.

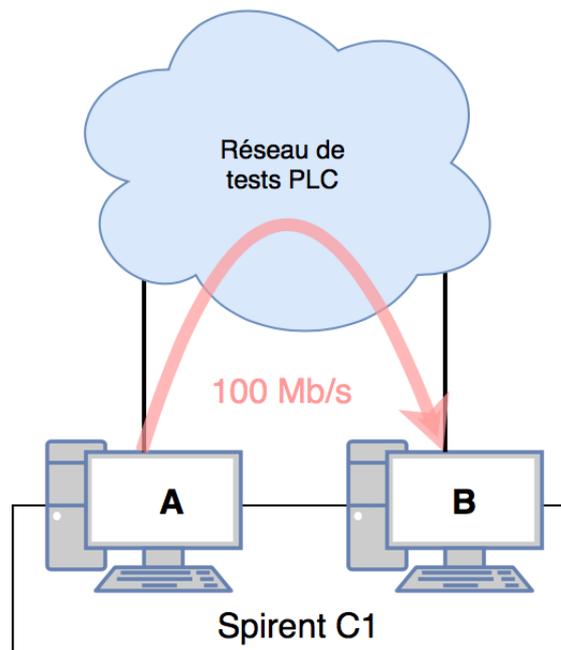


Figure 65 – Génération des flux de trafic sur l'hôte virtuel A à destination de l'hôte virtuel B

La configuration de ces flux de trafic sur l'hôte virtuel A est basée sur les informations suivantes:

Trafic	Transport	Classification de paquets		DSCP [Hex]	Volume [Mb/s]
		PHB	DSCP		
Téléphone	UDP	EF	46	2E	1
Télévision multicast	UDP	AF41	34	22	1
Télévision unicast	TCP	AF41	34	22	56
Internet	TCP	AF13	14	0E	41
Management	TCP	CS6	48	20	1

Figure 66 – Configurations des flux de trafic

Ces cinq types de flux de trafic sont définis sur l'hôte virtuel A. Pour chacun des flux, la source et la réception sont décrites avec l'adresse IP de l'hôte virtuel et leur numéro de ports du Spirent C1. Le volume de données pour chacun des flux de trafic y est aussi spécifié en se basant sur les chiffres relevés précédemment.

Scheduling Mode _____ Bandwidth Utilization (%): 100

Port Based Burst Size: Duration Mode:

Load per Stream Block Inter Frame Gap:

Advanced Interleaving Inter Frame Gap Unit:

Manual Based [Scheduling mode graphical example](#)

Status	Active	Name	Index	Source	Tx Port	Destination	Rx Port	Load	Load Unit	Fixed Frame Length
	<input checked="" type="checkbox"/>	voice	C 0	A (192.168.1.10/24)	Port //1/3	B (192.168.1.20/24)	Port //1/4	1	Mbps	1500
	<input checked="" type="checkbox"/>	multiTV	C 1	A (192.168.1.10/24)	Port //1/3	B (192.168.1.20/24)	Port //1/4	56	Mbps	1500
	<input checked="" type="checkbox"/>	uniTV	C 2	A (192.168.1.10/24)	Port //1/3	B (192.168.1.20/24)	Port //1/4	1	Mbps	1500
	<input checked="" type="checkbox"/>	internet	C 3	A (192.168.1.10/24)	Port //1/3	B (192.168.1.20/24)	Port //1/4	41	Mbps	1500
	<input checked="" type="checkbox"/>	management	C 4	A (192.168.1.10/24)	Port //1/3	B (192.168.1.20/24)	Port //1/4	1	Mbps	1500

Figure 67 – Flux de trafic définis sur le Spirent C1 avec une génération à 100 Mb/s

L'utilisation de la bande passante est de 100% car les ports sont configurés à 100 Mb/s et le total du volume de trafic généré pour chacun des flux est aussi de 100 Mb/s.

Lors de la configuration de différents types de flux de trafic, les différents headers des trames sont visibles. Chaque trame contient un EthernetII Header, un IPv4 Header et un UDP Header ou TCP Header, en fonction du choix réalisé précédemment.

Preview:

EthernetII IPv4 Udp

Name	Value
Frame	
EthernetII	
Destination MAC	<auto> 00:10:94:00:00:0c
Source MAC	<auto> 00:10:94:00:00:0b
EtherType (hex)	<auto> Internet IP
IPv4 Header	
ToS/DiffServ	diffServ (0x88)
Total length (int)	<auto> calculated
Time to live (int)	255
Protocol (int)	<auto> UDP
Source	<auto> 192.168.1.10
Destination	<auto> 192.168.1.20
Header Options	
Gateway	192.168.10.1
UDP Header	
Source port (int)	1024
Destination port (int)	<auto> 1024
Length (int)	<auto> 0
Checksum (int)	<auto> 29823

Figure 68 – Configuration des flux de trafic UDP sur le Spirent C1 pour le trafic téléphonique

Preview:

EthernetII IPv4 Tcp

Name	Value
Frame	
EthernetII	
Destination MAC	<auto> 00:10:94:00:00:0c
Source MAC	<auto> 00:10:94:00:00:0b
EtherType (hex)	<auto> Internet IP
IPv4 Header	
ToS/DiffServ	diffServ (0x88)
Total length (int)	<auto> calculated
Time to live (int)	255
Protocol (int)	<auto> TCP
Source	<auto> 192.168.1.10
Destination	<auto> 192.168.1.20
Header Options	
Gateway	192.168.10.1
TCP Header	
Source port (int)	1024
Destination port (int)	1024
Checksum (int)	<auto> 40429

Figure 69 – Configuration des flux de trafic TCP sur le Spirent C1 pour le trafic de télévision unicast

À noter que le générateur de trafic Spirent C1 simule uniquement une entête TCP ou UDP, il n'y a pas de retransfert de paquets, en cas de pertes, des flux simulés avec une entête TCP.

Pour chacun des types de flux de trafic, il faut configurer la classification des flux afin de mettre en place une certaine QoS. Cette notion est configurable dans le champ "diffServ", du IPv4 Header, avec une valeur comme nous l'avons défini à la figure 66. Cette valeur permet de définir le PHB comme vu précédemment dans la partie conception.

Figure 70 – Classification des paquets de voix

Figure 71 – Classification des paquets de télévision

Figure 72 – Classification des paquets Internet

Figure 73 – Classification des paquets de management

Les flux de trafic sur l'hôte virtuel A sont configurés.

Scénario de tests 2.1, 2.2, 2.3 et 2.4

L'infrastructure des scénarios de tests 2.1, 2.2, 2.3 et 2.4 est mise en place. Les équipements PLC sont maintenant placés sur les différentes phases comme lors de la première série de tests, les mêmes prises sont utilisées. Pour ces 4 différents scénarios de tests, les configurations du Spirent C1, au niveau des hôtes virtuels et de la génération des flux de trafic, restent les mêmes.

4.2 Conclusion de la réalisation

La partie réalisation de ce projet traite de la mise en place des réseaux de tests PLC. Pour ces différents réseaux de tests PLC, le même environnement a été gardé. L'infrastructure et les équipements ont été installés dans une habitation dont le réseau électrique est connu afin de mieux schématiser les réseaux de tests.

Pour la première série de tests, les équipements Devolo ont été connectés au réseau électrique selon les scénarios de tests et administrer grâce au software Cockpit de Devolo. Ce dernier nous démontre déjà les débits offerts par chacun des équipements, ce qui est intéressant, car ils pourront être comparés aux résultats des SpeedTest.

Pour la seconde série de tests, le puissant générateur de trafic Spirent C1 est utilisé afin de pousser les tests. En effet, avec cet équipement, les latences et les pertes de paquets peuvent être analysées. Le Spirent C1 est un appareil très complexe offrant une multitude d'outils d'analyses de réseau, mais il a été pris en main préalablement lors d'un projet précédemment réalisé, ce qui nous a permis de ne pas perdre trop de temps lors de sa configuration. La configuration du Spirent C1 est essentiellement basée sur les hôtes virtuels et la génération des flux de trafic.

Pour les deux séries de tests, les scénarios de tests définis permettent de réaliser des mesures avec plusieurs phases et même un autre réseau électrique, ce qui permet d'effectuer des tests variés afin que les résultats démontrent les performances d'une solution Devolo de manière précise.

5 Tests et validations

La partie tests et validations de ce projet de Bachelor permet de tester et valider les scénarios de tests définis pour les réseaux de tests PLC.

5.1 PLC (Powerline Communication)

Voici le catalogue des différents scénarios des tests effectués sur les différents réseaux de tests PLC:

Tests	Scénarios	Méthodes	Mesures	Contextes
1	1	SpeedTest	Débits montants et descendants Temps de réponse	Réseau PLC sur même phase
	2	SpeedTest	Débits montants et descendants Temps de réponse	Réseau PLC entre deux phases différentes
	3	SpeedTest	Débits montants et descendants Temps de réponse	Réseau PLC entre deux réseaux électriques différents
2	1	Spirent C1	Latence Perte de paquets	Réseau PLC sur même phase
	2	Spirent C1	Latence Perte de paquets	Réseau PLC entre deux phases différentes
	3	Spirent C1	Latence Perte de paquets	Réseau PLC entre deux phases différentes
	4	Spirent C1	Latence Perte de paquets	Réseau PLC entre deux réseaux électriques différents

Figure 74 – Catalogue des scénarios de tests effectués

Ces scénarios des tests sont répartis dans deux séries de tests. La première série de tests réalisée grâce à des SpeedTest et la seconde série de tests réalisée grâce au puissant générateur de trafic Spirent C1. À noter que suivant les résultats des tests, d'autres scénarios de tests supplémentaires peuvent être pensés afin de répondre à d'éventuelles questions.

5.1.1 Test 1: SpeedTest

Veillez vous référer au chapitre 3.1.3 pour la conception et au chapitre 4.1.1 pour la réalisation de ce test.

Des ordinateurs sont placés sur le réseau afin de pouvoir effectuer les tests de performance. Ces ordinateurs sont identifiés avec des lettres, contrairement aux équipements PLC (Devolo) qui sont identifiés avec des chiffres. Pour chacun des scénarios de tests suivants, les ordinateurs sont associés chaque fois aux mêmes équipements PLC et connectés à ces derniers de la même manière, par câble ou WiFi. À noter que pour les tests de performance en WiFi, l'ordinateur se trouve à maximum 10 mètres sans obstacle physique.

- **CPE:**
 - Ordinateur A connecté par câble
 - Ordinateur B connecté par WiFi
- **Devolo 1:**
 - Ordinateur C connecté par câble
 - Ordinateur D connecté par WiFi
 - Télévision connecté par câble
- **Devolo 2:**
 - Ordinateur E connecté par câble
 - Ordinateur F connecté par WiFi

Le fait de réaliser des tests de performance de débits directement sur le CPE, nous permet d'avoir une base afin d'analyser ensuite les débits depuis les équipements PLC (Devolo). Nous pourrions ainsi voir les différences de performances.

Dans les trois scénarios de tests, nous effectuerons des SpeedTest avec les outils Swisscom et CNLAB depuis les ordinateurs A, B, C, D, E et F. Le fait d'utiliser deux SpeedTest différents nous permet d'avoir une meilleure idée des performances au niveau des débits atteignables. Tous les SpeedTest ont été réalisés à la suite, dans les mêmes conditions et sans autre utilisation supplémentaire du réseau.

Les résultats des SpeedTest Swisscom et CNLAB sont reportés dans des tableaux afin de concentrer l'information et d'avoir une bonne vision des résultats. Avec ces deux SpeedTest, les résultats sont visibles de la manière suivante.

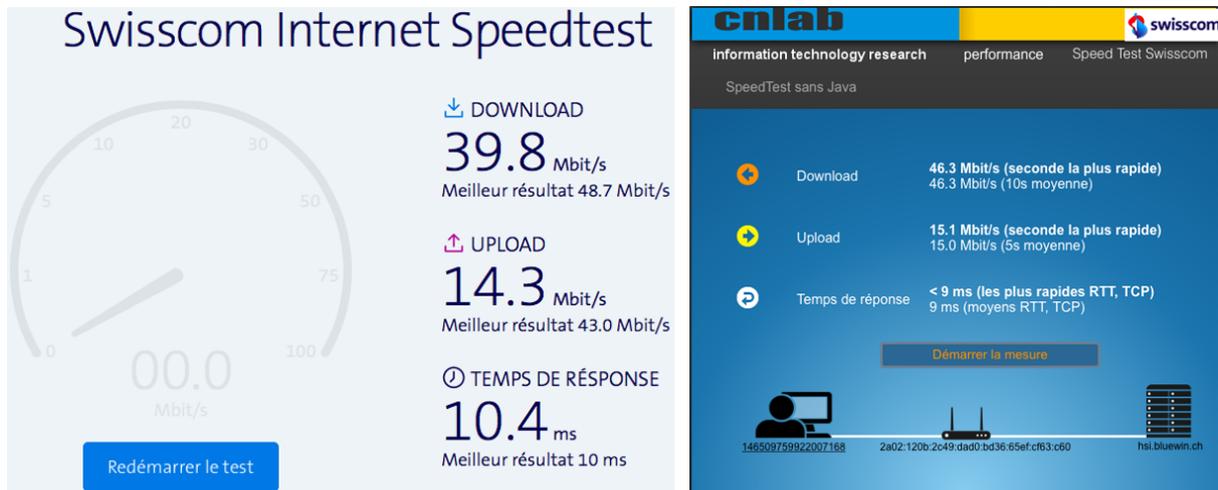


Figure 75 – Résultats des tests sur les SpeedTest Swisscom et CNLAB

Tous les SpeedTest, des différents scénarios de tests, ont été réalisés plusieurs fois afin d'éviter les mesures faussées. Pour le remplissage des tableaux de résultats, les résultats moyens sont récoltés et affichés.

Pour rappel, les scénarios de tests sont les suivants:

- **Scénario de tests 1.1:** communication PLC avec la même phase et avec une autre phase
- **Scénario de tests 1.2:** communication PLC avec deux autres phases
- **Scénario de tests 1.3:** communication PLC avec une autre phase et un autre réseau électrique

Une synthèse est réalisée, en fin de la présentation de ces tests, afin de résumer les résultats et commenter les effets sur le signal de la télévision passant via le réseau PLC.

Scénario de tests 1.1

Le schéma suivant fait référence au schéma présenté dans la conception concernant le scénario de tests 1.1. Il présente, physiquement, le positionnement des ordinateurs en rapport aux équipements PLC (Devolo).

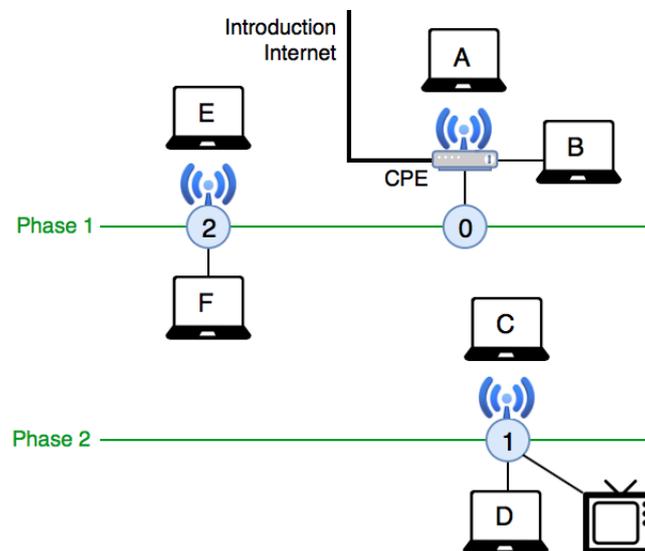


Figure 76 – Schéma de positionnement des ordinateurs sur le réseau pour le scénario de tests 1.1

Les deux SpeedTest sont exécutés sur ces ordinateurs étant connectés soit par câble, soit par WiFi. Les tableaux présentés ci-dessous représentent les résultats des mesures.

Pour la première phase de ce scénario de tests, les SpeedTest sont exécutés directement sur le CPE afin d'avoir un débit descendant et montant de référence.

Équipement / Emplacement	CPE (phase 1)			
	A (WiFi)		B (câble)	
Ordinateur / Connexion				
SpeedTest	Swisscom	CNLAB	Swisscom	CNLAB
Download [Mb/s]	39.8	46.3	42.1	39
Upload [Mb/s]	14.3	15	13.5	14.7
Temps de réponse [ms]	10.4	9	10	8

Figure 77 – Tableau des performances de débit depuis le CPE réalisé avec les SpeedTest

Les deux SpeedTest montrent des débits avec de faibles différences. Depuis le CPE, le débit descendant atteint en moyenne 41.8 Mb/s que ce soit en mode câblé ou en mode WiFi. Concernant le débit montant depuis le CPE, en moyenne 14.4 Mb/s est atteint que ce soit en mode câblé ou en mode WiFi. Ces deux débits servent de référence pour la suite du scénario de tests.

L'équipement PLC (Devolo 1) est branché sur la phase 2 du réseau électrique, ce qui représente une communication PLC sur un réseau de tests entre deux phases.

Équipement / Emplacement	PLC (Devolo 1) (phase 2)			
Ordinateur / Connexion	C (WiFi)		D (câble)	
SpeedTest	Swisscom	CNLAB	Swisscom	CNLAB
Download [Mb/s]	5.1	4.3	5.3	4.5
Upload [Mb/s]	14.1	14.7	13.9	14.5
Temps de réponse [ms]	14.6	11	10.8	12

Figure 78 – Tableau des performances de débit depuis le PLC (Devolo 1) réalisé avec les SpeedTest (autre phase que le PLC branché au CPE)

En moyenne, le débit descendant atteint 4.7 Mb/s que ce soit en mode câblé ou en mode WiFi, ce qui représente une forte diminution, le débit descendant est pratiquement divisé par 9 en rapport au débit descendant de base relevé depuis le CPE. Pour le débit montant, il est en moyenne de 14.4 Mb/s en mode câblé ou en mode WiFi. Étonnamment, ce débit montant n'est pas diminué, il reste le même que le débit montant de base relevé depuis le CPE.

L'équipement PLC (Devolo 2) est branché sur la même phase que l'équipement PLC (Devolo 0) qui alimente le réseau électrique avec le signal du CPE.

Équipement / Emplacement	PLC (Devolo 2) (phase 1)			
Ordinateur / Connexion	E (WiFi)		F (câble)	
SpeedTest	Swisscom	CNLAB	Swisscom	CNLAB
Download [Mb/s]	15.4	15.5	32.8	17.2
Upload [Mb/s]	12.5	14.9	14.5	14.6
Temps de réponse [ms]	15	14	12.2	9

Figure 79 – Tableau des performances de débit depuis le PLC (Devolo 2) réalisé avec les SpeedTest (même phase que le PLC branché au CPE)

En moyenne, le débit descendant atteint 20.2 Mb/s que ce soit en mode câblé ou en mode WiFi, ce qui représente une diminution de moitié en rapport au débit descendant de base relevé depuis le CPE. Pour le débit montant, il est en moyenne de 14.1 Mb/s en mode câblé ou en mode WiFi. Encore une fois, ce débit montant reste le même que celui relevé depuis le CPE.

Scénario de tests 1.2

Le schéma suivant fait référence au schéma présenté dans la conception concernant le scénario de tests 1.2. Il présente physiquement le positionnement des ordinateurs en rapport aux équipements PLC (Devolo).

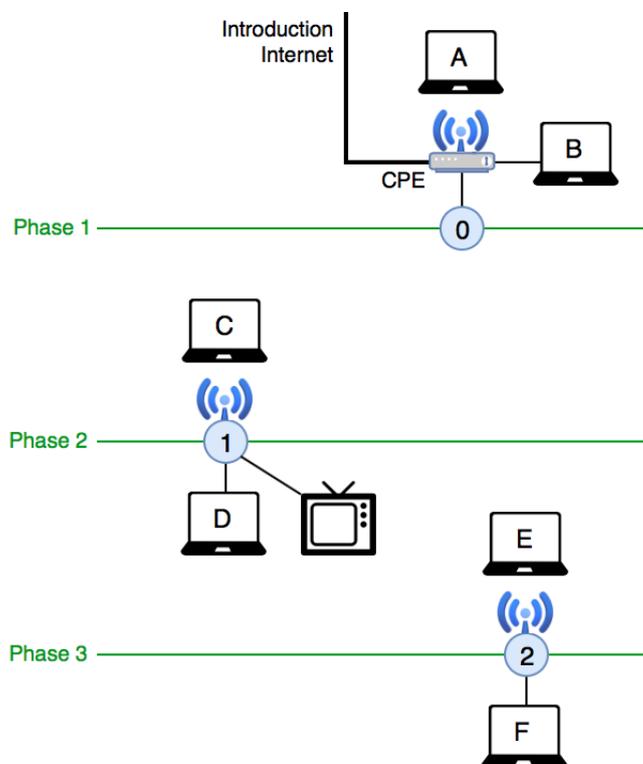


Figure 80 – Schéma de positionnement des ordinateurs sur le réseau pour le scénario de tests 1.2

Les deux SpeedTest sont exécutés sur ces ordinateurs étant connectés soit par câble, soit par WiFi. Les tableaux présentés ci-dessous représentent les résultats des mesures.

Pour la première phase de ce scénario de tests, les SpeedTest sont exécutés directement sur le CPE afin d'avoir un débit descendant et montant de référence.

Équipement / Emplacement	CPE (phase 1)			
	A (WiFi)		B (câble)	
Ordinateur / Connexion				
SpeedTest	Swisscom	CNLAB	Swisscom	CNLAB
Download [Mb/s]	46.6	46.9	41.4	33.5
Upload [Mb/s]	14.4	15	14	14.9
Temps de réponse [ms]	11.6	8	11	8

Figure 81 – Tableau des performances de débit depuis le CPE réalisé avec les SpeedTest

Le débit descendant atteint en moyenne 42.1 Mb/s que ce soit en mode câblé ou en mode WiFi. Le débit montant atteint en moyenne 14.5 Mb/s. Ces deux débits atteignent les mêmes performances que lors du scénario de test 1.1, ils servent de référence pour la suite du scénario de tests.

L'équipement PLC (Devolo 1) est branché sur la phase 2 du réseau électrique, ce qui représente une communication PLC sur un réseau de tests entre deux phases, comme lors du scénario de tests 1.1.

Équipement / Emplacement	PLC (Devolo 1) (phase 2)			
Ordinateur / Connexion	C (WiFi)		D (câble)	
SpeedTest	Swisscom	CNLAB	Swisscom	CNLAB
Download [Mb/s]	4.2	3.8	4.5	4.1
Upload [Mb/s]	12.1	13.6	11.9	13.4
Temps de réponse [ms]	12	11	11	12

Figure 82 – Tableau des performances de débit depuis le PLC (Devolo 1) réalisé avec les SpeedTest (autre phase que le PLC branché au CPE)

En moyenne, le débit descendant atteint 4.2 Mb/s et le débit montant atteint 12.8 Mb/s. Le débit descendant est encore une fois fortement diminué et le débit montant reste le même sur les phases 1 et 2. Les mêmes débits sont atteints entre les scénarios de tests 1.1 et 1.2 pour la phase 2.

L'équipement PLC (Devolo 2) est branché sur la phase 3 du réseau électrique, ce qui représente une communication PLC sur un réseau de tests entre deux phases.

Équipement / Emplacement	PLC (Devolo 2) (phase 3)			
Ordinateur / Connexion	E (WiFi)		F (câble)	
SpeedTest	Swisscom	CNLAB	Swisscom	CNLAB
Download [Mb/s]	5.9	6.3	6.1	7.9
Upload [Mb/s]	9.3	8.9	9.2	9.8
Temps de réponse [ms]	12	11.1	15	9

Figure 83 – Tableau des performances de débit depuis le PLC (Devolo 2) réalisé avec les SpeedTest (autre phase que le PLC branché au CPE)

En moyenne, le débit descendant atteint 6.6 Mb/s et le débit montant atteint 9.9 Mb/s. Sur cette troisième phase, le débit descendant est moins diminué alors que le débit montant et plus diminué. Les phases 2 et 3 ne se comportent pas de la même manière avec les débits descendants et montants.

Scénario de tests 1.3

Le schéma suivant fait référence au schéma présenté dans la conception concernant le scénario de tests 1.3. Il présente physiquement le positionnement des ordinateurs en rapport aux équipements PLC (Devolo).

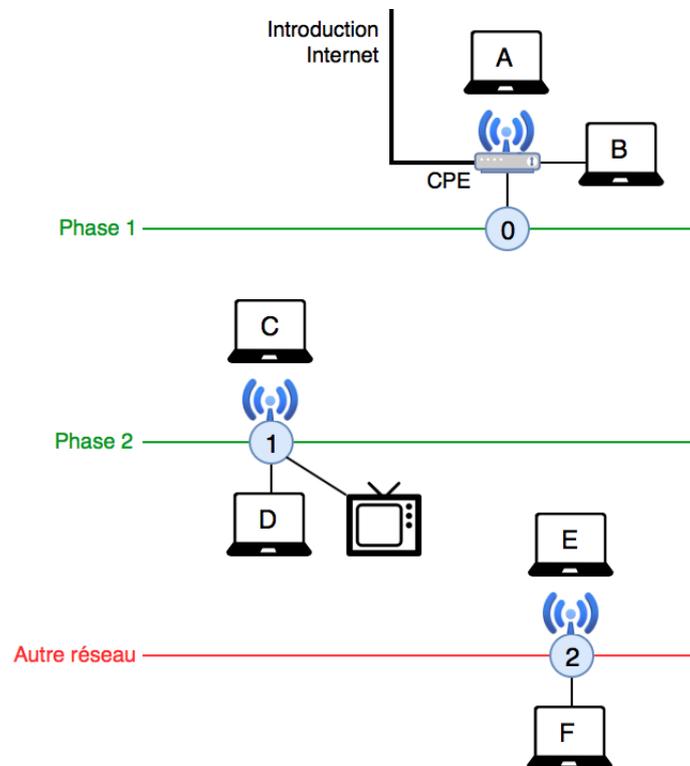


Figure 84 – Schéma de positionnement des ordinateurs sur le réseau pour le scénario de tests 1.3

Les deux SpeedTest sont exécutés sur ces ordinateurs étant connectés soit par câble, soit par WiFi. Les tableaux présentés ci-dessous représentent les résultats des mesures.

Pour la première phase de ce scénario de tests, les SpeedTest sont exécutés directement sur le CPE afin d’avoir un débit descendant et montant de référence.

Équipement / Emplacement	CPE (phase 1)			
	A (WiFi)		B (câble)	
Ordinateur / Connexion				
SpeedTest	Swisscom	CNLAB	Swisscom	CNLAB
Download [Mb/s]	46.2	45.8	40.8	37.2
Upload [Mb/s]	13.9	14.2	14.3	15.1
Temps de réponse [ms]	11	8.6	11	8

Figure 85 – Tableau des performances de débit depuis le CPE réalisé avec les SpeedTest

Le débit descendant atteint en moyenne 42.5 Mb/s et le débit montant atteint en moyenne 14.4 Mb/s. Ces deux débits atteignent les mêmes performances que lors des scénarios de test 1.1 et 1.2, ils servent de référence pour la suite du scénario de tests. Ces mêmes débits de référence, atteints pour les trois scénarios de tests depuis le CPE, confirment la constance des débits et des performances.

L'équipement PLC (Devolo 1) est branché sur la phase 2 du réseau électrique, ce qui représente une communication PLC sur un réseau de tests entre deux phases, comme lors des scénarios de tests 1.1 et 1.2.

Équipement / Emplacement	PLC (Devolo 1) (phase 2)			
Ordinateur / Connexion	C (WiFi)		D (câble)	
SpeedTest	Swisscom	CNLAB	Swisscom	CNLAB
Download [Mb/s]	4.8	4.2	4.6	4.4
Upload [Mb/s]	13	13.9	12.5	13.8
Temps de réponse [ms]	12.5	11.2	11	11.9

Figure 86 – Tableau des performances de débit depuis le PLC (Devolo 1) réalisé avec les SpeedTest (autre phase que le PLC branché au CPE)

En moyenne, le débit descendant atteint 4.5 Mb/s et le débit montant atteint 13.3 Mb/s. Le débit descendant est encore une fois fortement diminué et le débit montant reste le même sur les phases 1 et 2. Les mêmes débits sont atteints entre les scénarios de tests 1.1, 1.2 et 1.2 pour la phase 2.

L'équipement PLC (Devolo 2) est branché sur une phase d'un autre réseau électrique, ce qui représente une communication PLC sur un réseau de tests entre deux réseaux électriques.

Équipement / Emplacement	PLC (Devolo 2) (autre réseau électrique)			
Ordinateur / Connexion	E (WiFi)		F (câble)	
SpeedTest	Swisscom	CNLAB	Swisscom	CNLAB
Download [Mb/s]	10.1	5.8	8.3	7.4
Upload [Mb/s]	1.2	3.2	2.4	2.9
Temps de réponse [ms]	15	10	14.5	11

Figure 87 – Tableau des performances de débit depuis le PLC (Devolo 2) réalisé avec les SpeedTest (autre réseau électrique que le PLC branché au CPE)

En moyenne, le débit descendant atteint 7.9 Mb/s, ce qui représente le même débit descendant atteint sur une autre phase du même réseau électrique. Pour le débit montant, il atteint en moyenne 2.4 Mb/s sur cet autre réseau électrique, il est fortement diminué en comparaison aux débits montants atteints sur les autres phases du même réseau électrique.

Synthèse

Un tableau récapitulatif des débits moyens montants et descendants par phases et réseaux électriques est réalisé afin de synthétiser les résultats obtenus précédemment.

Équipement / Emplacement	Mesures	
CPE (phase 1)	Download [Mb/s]	42.1
	Upload [Mb/s]	14.4
	Temps de réponse [ms]	9.6
PLC (Devolo) (phase 1)	Download [Mb/s]	20.2
	Upload [Mb/s]	14.1
	Temps de réponse [ms]	12.6
PLC (Devolo) (phase 2)	Download [Mb/s]	4.5
	Upload [Mb/s]	13.5
	Temps de réponse [ms]	11.8
PLC (Devolo) (phase 3)	Download [Mb/s]	6.6
	Upload [Mb/s]	9.3
	Temps de réponse [ms]	11.8
PLC (Devolo) (autre réseau électrique)	Download [Mb/s]	7.9
	Upload [Mb/s]	2.4
	Temps de réponse [ms]	12.6

Figure 88 – Tableau des performances moyennes de débit depuis le CPE, sur les trois phases du premier réseau électrique et sur le second réseau électrique

La première affirmation, à en tirer, est que le signal introduit sur le réseau électrique par les équipements PLC (Devolo) est injecté sur toutes les phases du réseau électrique, ce qui est un bon point. En effet, les équipements PLC peuvent être placés sur n'importe quelle prise du bâtiment, le propriétaire du bâtiment peut choisir l'emplacement qu'il désire pour ces équipements PLC. Le saut à haute fréquence est donc performant, comme la société Devolo le promet.

Il a été observé que le signal PLC est aussi injecté sur le second réseau électrique du bâtiment. En effet, le tableau électrique du bâtiment, où les tests ont été menés, contient deux compteurs électriques, ces deux compteurs étant assez proche, comme le montre la figure suivante, le signal PLC y est aussi injecté. L'hypothèse est que ce signal PLC est injecté sur ce second réseau électrique en traversant les deux compteurs électriques, mais grâce au saut à haute fréquence. Ce procédé peut être un avantage comme un inconvénient. Un avantage, si le signal PLC est censé couvrir ces deux réseaux électriques. Un désavantage, si le signal PLC ne doit pas couvrir ces deux réseaux électriques, le second réseau électrique possédant un second réseau PLC, les signaux pourraient être perturbés.

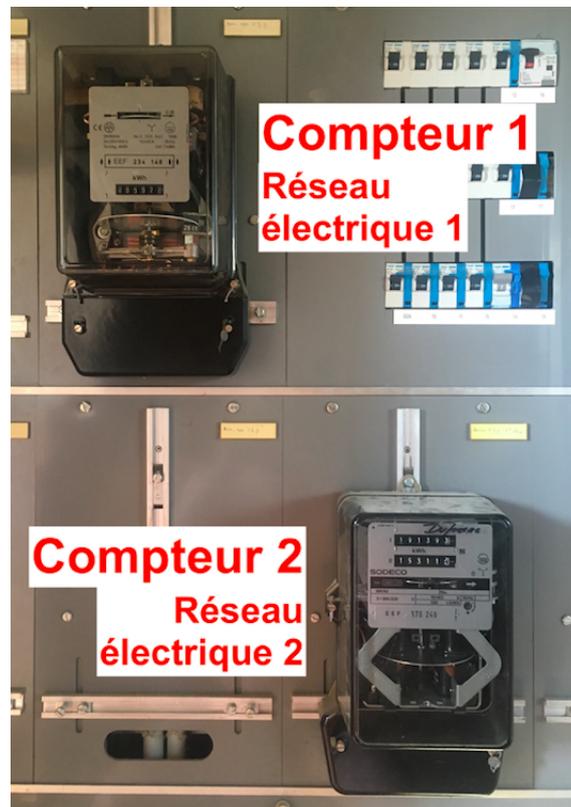


Figure 89 – Les deux compteurs dans le tableau électrique du bâtiment

Au niveau des débits, de grandes différences ont été mesurées sur les différentes phases, cela vient du fait que le courant électrique peut perturber le signal PLC. En connectant tous les équipements PLC sur la même phase, le débit montant n'est pas perturbé, il reste le même, en revanche, le débit descendant est perturbé et diminue, dans tous les cas, de moitié. Le fait que le débit montant n'est pas perturbé alors que le débit descendant est perturbé peut venir du fait que le sens du courant électrique joue un rôle, d'après la société Devolo. À noter que la consommation d'équipements gourmands en énergie peut fortement perturber le signal PLC.

Avec la pose d'équipements PLC sur les deux autres phases du réseau électrique, encore une fois, le débit montant n'est que très peu perturbé. Alors que le débit descendant est encore plus perturbé, ce dernier passe même en dessous du débit montant. Le saut de phase fonctionne, mais les débits sont diminués.

Concernant le saut de fréquence sur le second réseau électrique, le débit descendant est semblable aux débits descendants sur les deux autres phases du réseau électrique précédent. Alors que le débit montant est fortement perturbé, contrairement à ce qui a été observé précédemment.

Ces variations de débits sont aussi causées par les longueurs du réseau électrique. Les débits ne sont pas stables sur tout le réseau PLC, voilà peut être le désavantage de cette technologie.

Pour les temps de réponse des SpeedTest, les mesures sont plus ou moins semblables. Mais la latence sera mieux analysée dans les scénarios tests suivants.

5.1.2 Test 2: Spirent C1

Veillez vous référer au chapitre 3.1.4 pour la conception et au chapitre 4.1.2 pour la réalisation de ce test.

Le fichier Excel contenant les tableaux et graphiques concernant cette partie est disponible en annexe sous le nom de "dufresne_bachelor_mesuresSpirentC1_130718.xlsx".

La latence et les pertes de paquets, analysés grâce au Spirent C1, pour les réseaux de tests PLC de la seconde série de tests, sont présentés ci-dessous. À noter que toutes les mesures réalisées ont une durée de 10 minutes.

Scénario de tests 2.1

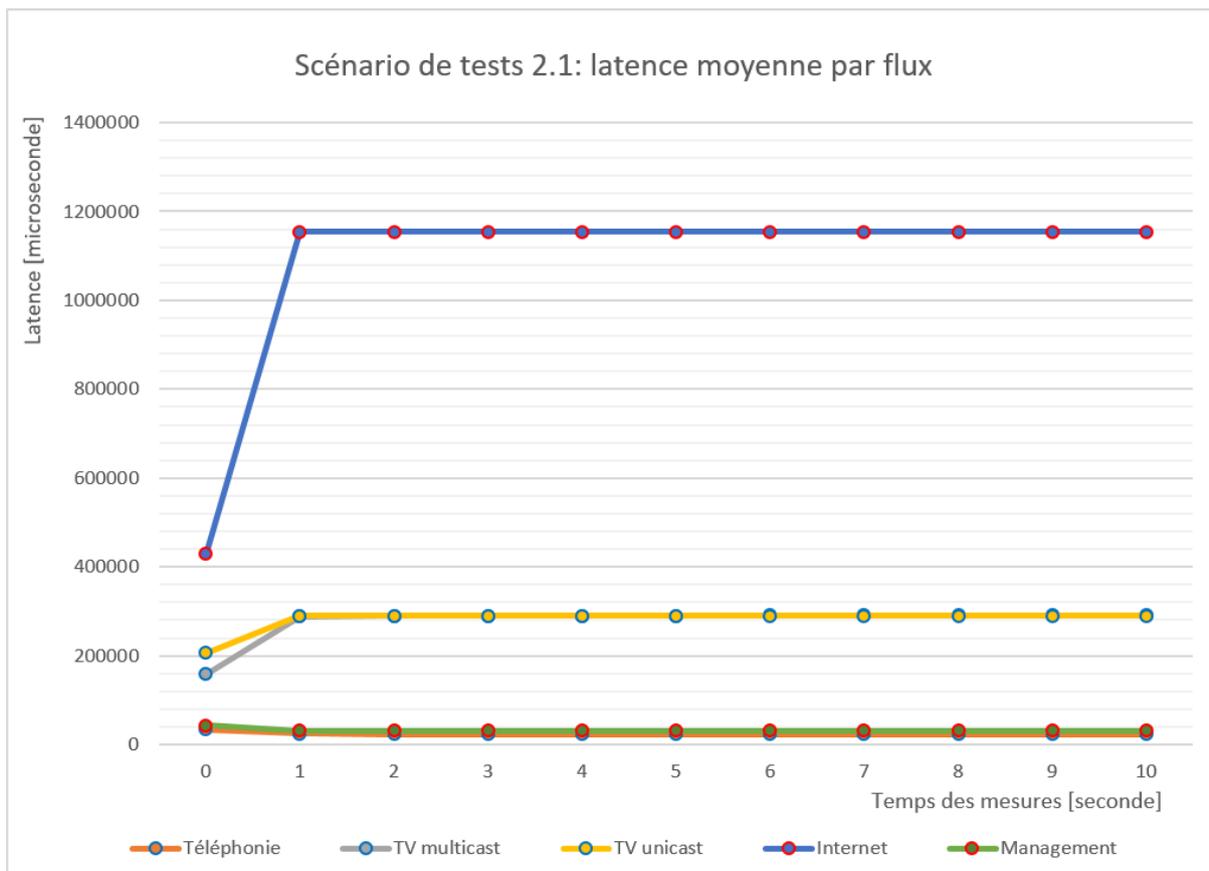


Figure 90 – Latence moyenne sur le réseau de tests PLC lors du scénario de tests 2.1

La première observation faite, avec ce graphique représentant la latence moyenne par flux de trafic, est que le CPE priorise les flux selon la classification de paquets faite à la source. En effet, les flux ont été classés en fonction de leur importance, les flux téléphoniques et de management étant de haute priorité, alors que les flux Internet sont classés selon la plus basse priorité.

Les flux de haute priorité sont traités en premier, voilà pourquoi leur latence est la plus faible, en moyenne 30 millisecondes pour les flux de téléphonie et de management. Pour les deux flux de télévisions, de priorités moyennes, leur classification étant la même, la latence est semblable, en moyenne 290 millisecondes. En revanche, pour le flux Internet étant le flux le moins prioritaire, la latence explose et passe à plus de 1 seconde, ce qui est énorme.

Ces différences de latence, pour ces flux de trafic, permettent d'affirmer que le réseau est congestionné et que le CPE active ces techniques de QoS en priorisant les flux. Un réseau congestionné veut également dire qu'il y a des pertes de paquets.

Ces latences sont de bonnes informations, mais il faut aussi analyser les pertes de paquets par flux.

Scénario de tests 2.1: pertes de paquets					
Flux de trafic	Hôte virtuel A (source) Compteur de trames	Hôte virtuel B (réception) Compteur de trames	Hôte virtuel A (source) Compteur de trames [Mb]	Hôte virtuel B (réception) Compteur de trames [Mb]	Perte de paquets [%]
Téléphonie	39'890	36'275	478.680	435.300	9.06
TV multicast	39'890	1'139	478.680	13.668	97.14
TV unicast	2'792'297	77'531	33'507.564	930.372	97.22
Internet	2'034'389	93	24'412.668	1.116	99.99
Management	39'890	36'316	479.680	435.792	8.96
Total	4'946'356	152'972	59'356.272	1'817.234	96.90

Figure 91 – Perte de paquets sur le réseau de tests PLC lors du scénario de tests 2.1

Les pertes de paquets sont énormes, au total, sur 4'946'356 trames envoyées, seules 152'972 arrivent à destination, ce qui représente une perte de paquets totale de pratiquement 97%. Les flux de hautes priorités, la téléphonie et le management, ont une perte de paquets d'en moyenne 9%. Les flux de télévisions, une perte de 97% et les flux Internet, une perte de pratiquement 100%.

Avec ces chiffres, nous pouvons confirmer que le CPE effectue bien son travail au niveau de la QoS avec priorisation des flux, les flux sensibles étant moins touchés par la perte de paquets. Les flux sensibles étant priorisés au détriment des flux Internet. Une telle suppression de paquets provient du fait que le réseau de tests est largement congestionné et le CPE doit faire son travail de suppression de paquets en se basant sur les priorités des flux de trafic.

Pour tous les flux, la latence moyenne reste stable, cela vient du fait que les paquets sont supprimés au fur et à mesure, car les files d'attente du CPE sont pleines, voilà pourquoi ces latences n'augmentent pas.

Ce qui est impressionnant est que ce réseau de tests comprend deux équipements Devolo branchés à la même phase. Les résultats ne sont pas du tout satisfaisants alors qu'une seule phase est utilisée pour ce test.

Pour les flux téléphoniques (VoIP), la latence moyenne doit être entre 150 et 400 millisecondes au maximum, dans ce réseau de tests, une latence de 30 millisecondes est observée, ce qui est très bon. En revanche, la perte de paquets doit être entre 1 et 4% au maximum, dans ce réseau de tests, une perte de 9% est observée, ce qui n'est pas acceptable.

Pour les flux de télévision, la latence moyenne doit être entre 4 et 5 secondes au maximum, dans ce réseau de tests, une latence de 0.3 seconde est observée, ce qui est très bon. En revanche, la perte de paquets doit être de 5% au maximum, dans ce réseau de tests, une perte de 97% est observée, ce qui n'est pas du tout acceptable.

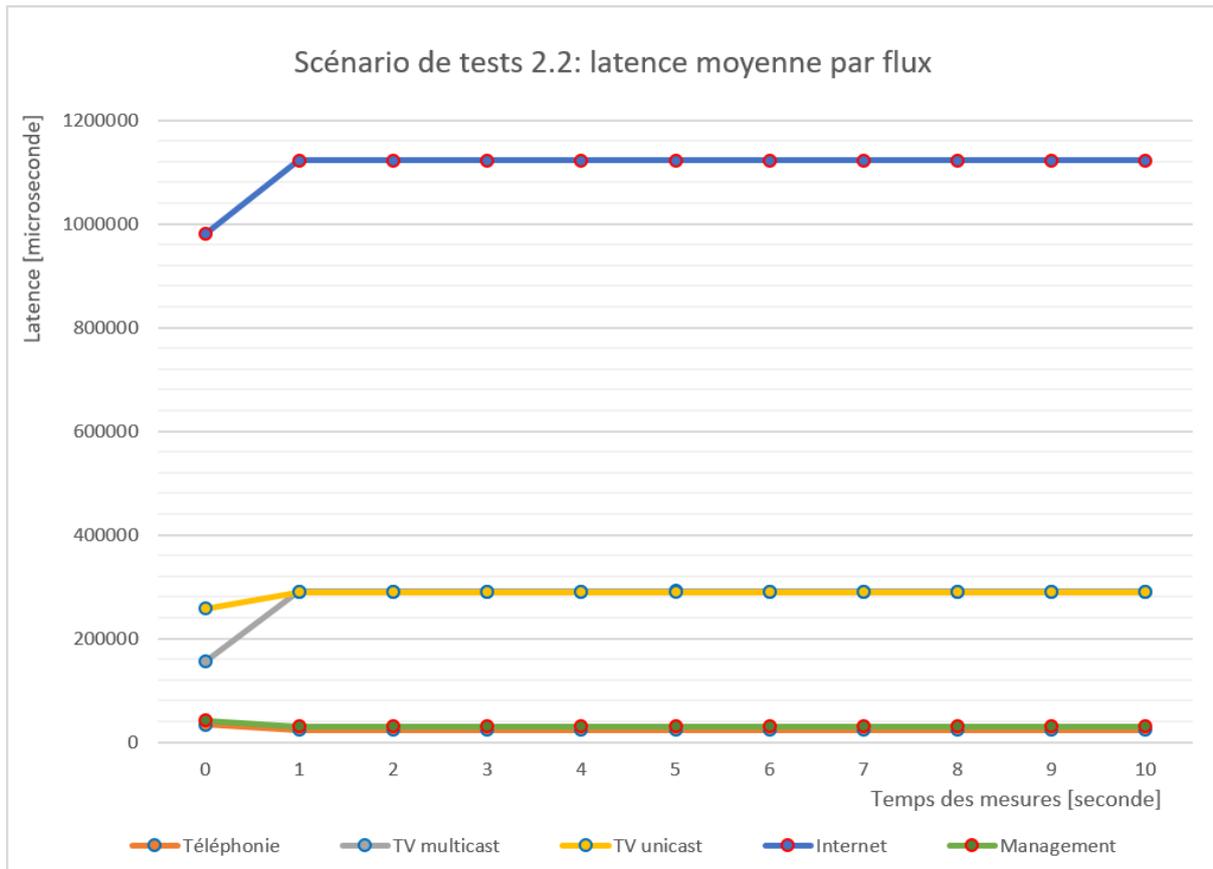
Scénario de tests 2.2

Figure 92 – Latence moyenne sur le réseau de tests PLC lors du scénario de tests 2.2

Pour ce second scénario de tests, les équipements Devolo sont branchés sur deux phases différentes, les résultats devraient logiquement être moins performants. Mais contre toutes attentes, la latence moyenne des différents flux est la même que celle observée dans le scénario de tests précédents.

Scénario de tests 2.2: pertes de paquets					
Flux de trafic	Hôte virtuel A (source) Compteur de trames	Hôte virtuel B (réception) Compteur de trames	Hôte virtuel A (source) Compteur de trames [Mb]	Hôte virtuel B (réception) Compteur de trames [Mb]	Perte de paquets [%]
Téléphonie	39'909	36'267	478.908	434.904	9.12
TV multicast	39'909	1'113	478.908	13.356	97.21
TV unicast	2'793'591	78'130	33'523.092	937.560	97.20
Internet	2'035'332	113	24'423.984	1.356	99.99
Management	39'909	36'242	478.908	434.904	9.18
Total	4'948'650	152'889	59'383.800	1'822.981	96.91

Figure 93 – Perte de paquets sur le réseau de tests PLC lors du scénario de tests 2.2

Concernant les pertes de paquets, là encore, les mêmes pourcentages de pertes sont atteints. Une perte de paquets totale de pratiquement 97 % est observée.

Scénario de tests 2.3 et 2.4

Pour les scénarios de tests 2.3 et 2.4, les graphiques des latences moyennes et les tableaux des pertes de paquets, des différents flux de trafic, ne sont pas présentés, car, encore une fois, les mêmes résultats sont atteints. En effet, les latences moyennes et les pertes de paquets sont les mêmes que dans les scénarios de tests 2.1 et 2.2.

Synthèse

Ces réseaux de tests PLC ne supportent donc pas une injection de trafic à 100 Mb/s. Ces différents résultats ne sont pas du tout satisfaisants et laissent perplexes. Pourquoi ces résultats sont tous semblables, alors que les réseaux de tests sont construits sur différentes phases, et même entre deux réseaux électriques différents avec le scénario de tests 2.4 ?

Est-ce que le CPE ne supporte pas une réception de trafic à 100 Mb/s et que ce dernier supprime les paquets dès leur entrée dans cet équipement ? Le CPE est censé supporter une charge de trafic, surtout qu'il s'agit de la dernière génération de CPE Swisscom, supportant théoriquement le Gb/s. De plus, lors des tests, le CPE n'était pas congestionné par d'autres flux, aucune autre utilisation d'Internet pouvant fausser les tests n'était faite. Les appareils Devolo proposant, d'après le fabricant, 1.2 Gb/s, ces équipements doivent logiquement supporter un débit de 100 Mb/s.

Face à toutes ces questions, un autre réseau de tests a été pensé afin de tester uniquement les performances du CPE, afin de définir si ces résultats, pour le moins médiocres, proviennent du CPE.

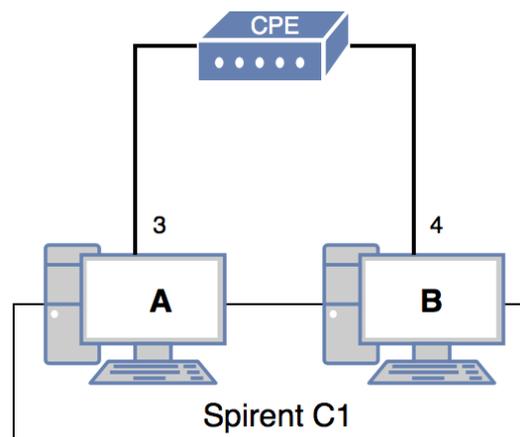


Figure 94 – Schéma du réseau de tests sur le CPE

Sur ce réseau de tests comprenant uniquement le CPE, les latences et les pertes de paquets vont être analysées afin de déterminer si les mêmes résultats sont obtenus. Le trafic injecté garde les mêmes paramètres, une injection à 100 Mb/s avec les mêmes volumes de génération entre les différents flux de trafic.

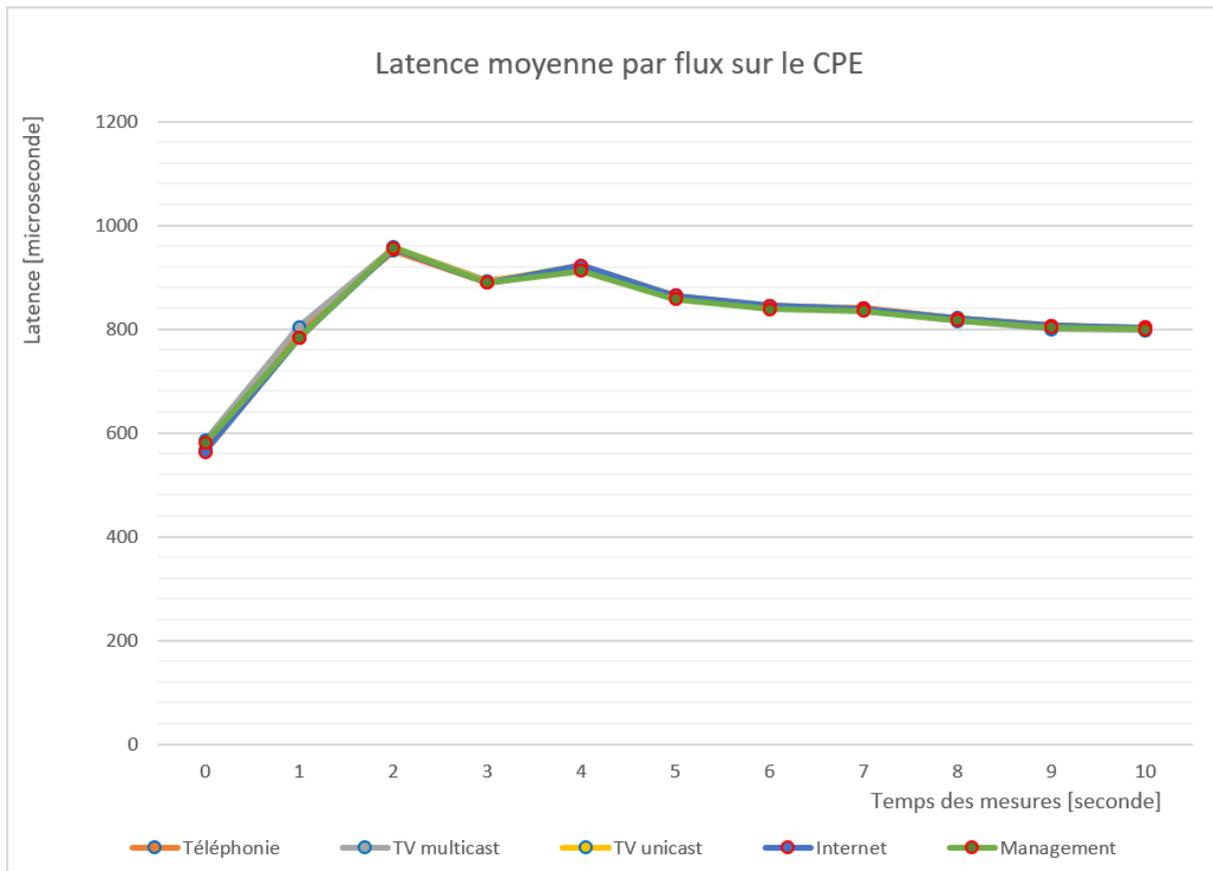


Figure 95 – Latence moyenne sur le CPE

La latence des différents flux de trafic est la même pour tous ces flux, en moyenne 0.8 milliseconde ce qui est très bon. Ces latences moyennes sont beaucoup moins élevées que celles observées, dans les scénarios de tests, précédents réalisés avec les équipements Devolo, ce sont donc les équipements Devolo qui ajoutent beaucoup de latence aux différents flux de trafic.

Cette première observation permet de dire que les techniques de QoS, dont la priorisation des flux n'est pas activée sur le CPE. Ce qui veut dire qu'il n'y a pas de congestions sur le réseau de tests. Au premier abord, un réseau non congestionné laisse penser qu'il n'y a pas de pertes de paquets, mais cela ne veut pas forcément dire aucune perte de paquets.

Pertes de paquets sur le CPE					
Flux de trafic	Hôte virtuel A (source) Compteur de trames	Hôte virtuel B (réception) Compteur de trames	Hôte virtuel A (source) Compteur de trames [Mb]	Hôte virtuel B (réception) Compteur de trames [Mb]	Perte de paquets [%]
Téléphonie	39'810	36'157	477.720	433.884	9.17
TV multicast	39'810	36'182	477.720	434.184	9.11
TV unicast	2'786'691	2'532'829	33'440.292	30'393.948	9.10
Internet	2'030'304	1'845'776	24'363.648	22'149.312	9.08
Management	39'810	36'250	477.720	435.000	8.94
Total	4'936'425	4'448'024	59'237.100	53'847.601	9.89

Figure 96 – Perte de paquets sur le CPE

Une perte de paquets d'en moyenne 9% est observée sur tous les flux de trafic transitant via le CPE. Cette même perte de paquets, de 9% pour tous les flux, confirme le fait que les paquets ne sont pas supprimés en fonction de leur priorisation. Le CPE n'active pas ces techniques de QoS au niveau de la priorisation, c'est maintenant une certitude. Au total, en moyenne 10% du trafic est supprimé.

Cette perte de paquets est bien engendrée par le CPE, mais elle est due au fait que le CPE active une sécurité en fonction des échanges entre deux machines, ou dans notre cas entre deux hôtes virtuels, afin que la bande passante ne soit pas utilisée par un seul échange. Bien entendu, cette technique observée est aussi en relation avec de la QoS, mais pas au niveau d'une priorisation des flux.

Les importantes pertes de paquets et latences, observées lors des précédents scénarios de tests, ne sont donc pas dues au CPE, mais bien au réseau PLC mis en place avec les équipements Devolo.

Ces réseaux de tests PLC ne supporte donc pas le fait que 100 Mb/s de trafic y soit injecté. Avec un débit de 100 Mb/s, il a été démontré qu'en moyenne 97% du trafic est supprimé.

Une nouvelle série de tests a été pensée afin d'analyser les limites du réseau PLC. Il est intéressant de démontrer à partir de quel débit les latences et les pertes de paquets explosent sur le réseau de tests. Avec cette série de tests, les limites des équipements PLC seront démontrées.

Cette démonstration prend du temps, car il faut trouver le débit limite dont le réseau de tests PLC accepte. Tous les résultats ne sont pas présentés, les débits limites acceptables et non acceptables sont présentés. Pour rappel, le débit limite acceptable est le débit maximum afin que la latence soit acceptable et aucune perte de paquets pour tous les différents flux de trafic. Une limite non acceptable est le débit minimum produisant une augmentation de la latence et une perte de paquets pour un type de flux de trafic.

Afin de découvrir ces limites, le rapport de génération de trafic entre les différents types de flux reste la même, en revanche, le débit total est diminué sur le Spirent C1.

Débits [Mb/s]	Latence moyenne entre les flux [ms]	Perte de paquets moyenne entre les flux [%]	Limites
100	165.131	96.6	KO
50	391.635	54.6	KO
25	504.886	33.6	KO
20	527.532	29.4	KO
15	551.184	25.2	KO
10	571.939	21.1	KO
5	596.312	16.8	KO
4	600.925	15.3	KO
3	4.567	0	OK
2	3.971	0	OK
1	3.289	0	OK

Figure 97 – Génération de trafic à différents débits depuis le Spirent C1

Après les différentes générations de débits, grâce au Spirent C1, sur le réseau de tests PLC, les limites ont été analysées. En effet, avec une génération de trafic à 3 Mb/s, une faible latence est observée et aucun paquet n'est supprimé du réseau de tests PLC. Ce débit maximum acceptable est très faible. À partir de 4 Mb/s de trafic injecté, le réseau de tests est congestionné, la latence explose et une perte de paquets d'en moyenne 15% est observée sur le trafic total.

Il est intéressant de noter que la latence moyenne totale des différents flux est plus élevée avec une génération de trafic à 4 Mb/s, qu'avec une génération de trafic à 100 Mb/s. Ce phénomène a déjà pu être observé dans un travail précédemment réalisé. À 4 Mb/s, le réseau n'étant pas congestionné au maximum, le CPE ne supprime pas tout de suite les paquets et ce dernier tente de tous les traiter, autant les paquets de haute priorité que ceux de faible priorité, dans ce cas la latence totale augmente. En revanche, avec 100 Mb/s, le réseau de tests est totalement congestionné et le CPE n'arrive plus suivre la cadence, les paquets avec une faible priorité sont donc immédiatement supprimés dès leur entrée dans le CPE, et les paquets de haute priorité sont directement traité, ce qui diminue la latence totale.

Voilà pourquoi le fait d'analyser que la latence moyenne n'est pas suffisant. Il faut aussi observer le nombre de paquets supprimés. Comme dans ce cas, on peut se retrouver avec une latence moyenne acceptable et une forte perte de paquets, ou une latence énorme et une plus faible suppression de paquets.

Les résultats d’une injection de trafic à 3 Mb/s vont être maintenant présentés. Ce débit étant le débit maximum avec lequel le réseau n’est pas congestionné.

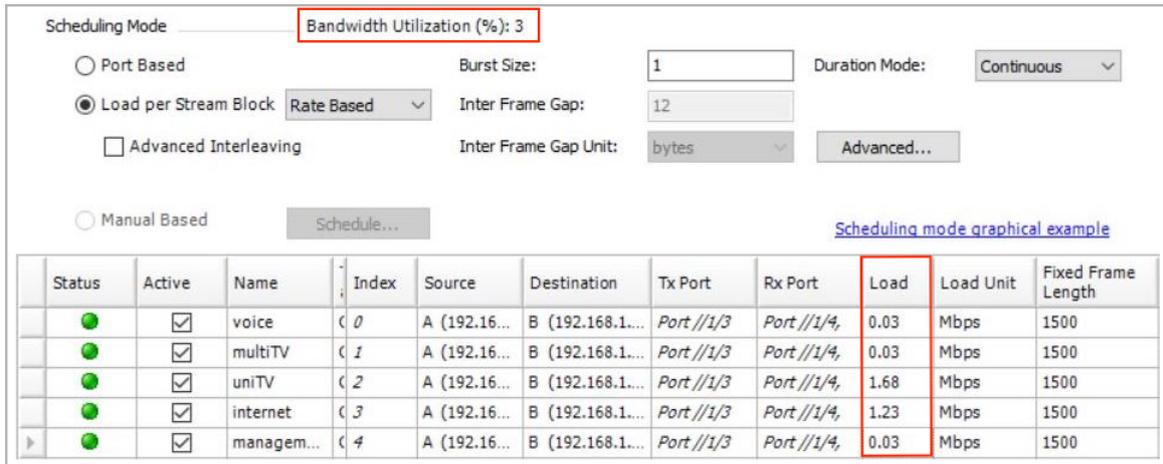


Figure 98 – Flux de trafic définis sur le Spirent C1 avec une génération à 3 Mb/s

Des modifications au niveau de la configuration du Spirent C1 ont été réalisées. Comme déjà cité, le rapport entre les volumes générés des différents flux de trafic reste le même. Avec une simple règle de trois, ces volumes sont diminués afin de générer au total un débit de 3 Mb/s.

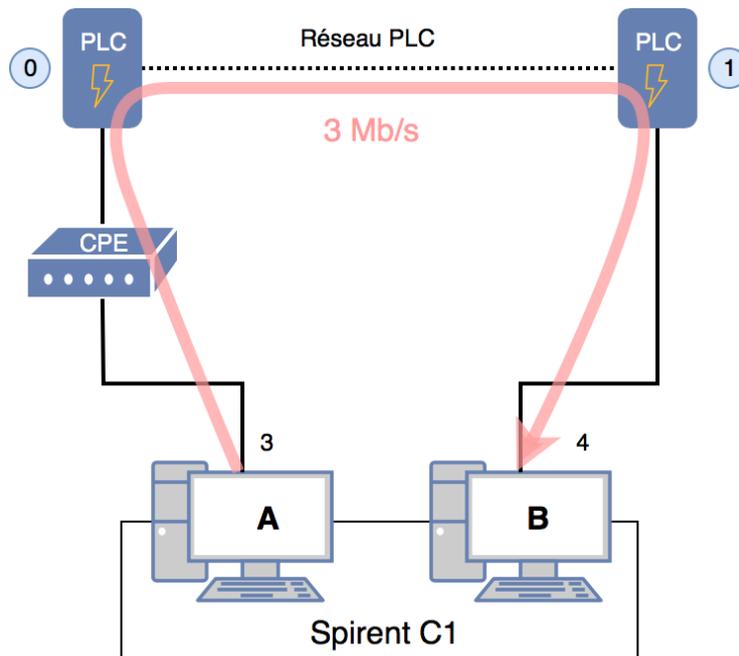


Figure 99 – Schéma du réseau de tests PLC avec un génération de trafic à 3 Mb/s

En se référant au précédent schéma, le réseau de tests PLC reste le même. Comme testé précédemment, le fait que le réseau de tests PLC soit construit sur la même phase ou entre différentes phases n’a aucune importance, car dans tous les cas, les mêmes résultats sont obtenus.

Les tests peuvent être maintenant démarrés afin d’en analyser la latence et la perte de paquets.

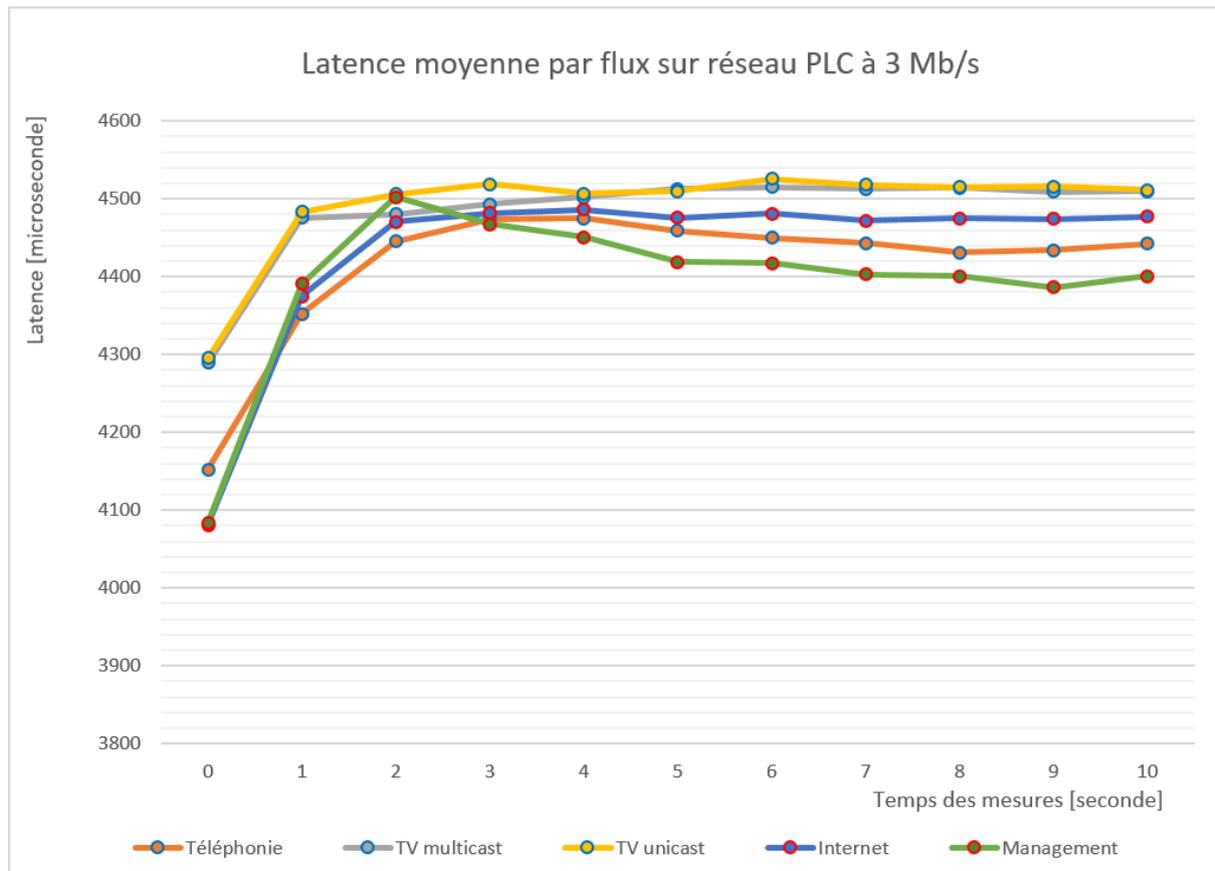


Figure 100 – Latence moyenne sur le réseau de tests PLC avec une génération de trafic à 3 Mb/s

Les résultats concernant la latence moyenne des différents flux de trafic sont logiques. Les latences sont stables et sont semblables pour tous les flux, en moyenne 4.5 millisecondes. Ce qui indique qu'il n'y a pas de congestion du réseau de tests et les techniques de QoS au niveau de la priorisation des flux ne sont pas activées sur le CPE.

Pertes de paquets sur réseau PLC à 3 Mb/s					
Flux de trafic	Hôte virtuel A (source) Compteur de trames	Hôte virtuel B (réception) Compteur de trames	Hôte virtuel A (source) Compteur de trames [Mb]	Hôte virtuel B (réception) Compteur de trames [Mb]	Perte de paquets [%]
Téléphonie	1'211	1'211	14.532	14.532	0
TV multicast	1'211	1'211	14.532	14.532	0
TV unicast	83'537	83'537	1'002.444	1'002.444	0
Internet	61'139	61'139	733.668	733.668	0
Management	1'211	1'211	14.532	14.532	0
Total	148'309	148'309	1'779.708	1'779.708	0

Figure 101 – Perte de paquets sur le réseau de tests PLC avec une génération de trafic à 3 Mb/s

Au niveau des pertes de paquets, aucune surprise, une perte de 0%, pour tous les flux de trafic, est atteinte.

Ces résultats prouvent que le réseau de tests n'est pas congestionné. Un débit 3 Mb/s est donc acceptable sur ce réseau de tests, mais il s'agit d'un débit très faible.

Les résultats d'une injection de trafic à 4 Mb/s vont être maintenant présentés. Ce débit étant le débit à partir duquel le réseau de tests devient congestionné.

The screenshot shows the configuration interface for traffic injection on the Spirent C1. The 'Scheduling Mode' is set to 'Load per Stream Block' with 'Rate Based' selected. The 'Bandwidth Utilization (%)' is set to 4. Other settings include 'Burst Size: 1', 'Duration Mode: Continuous', 'Inter Frame Gap: 12', and 'Inter Frame Gap Unit: bytes'. A table below lists the active streams:

Status	Active	Name	Index	Source	Destination	Tx Port	Rx Port	Load	Load Unit	Fixed Frame Length
●	<input checked="" type="checkbox"/>	voice	C 0	A (192.16...	B (192.168.1...	Port //1/3	Port //1/4	0.04	Mbps	1500
▶	<input checked="" type="checkbox"/>	multiTV	C 1	A (192.16...	B (192.168.1...	Port //1/3	Port //1/4	0.04	Mbps	1500
●	<input checked="" type="checkbox"/>	uniTV	C 2	A (192.16...	B (192.168.1...	Port //1/3	Port //1/4	2.24	Mbps	1500
●	<input checked="" type="checkbox"/>	internet	C 3	A (192.16...	B (192.168.1...	Port //1/3	Port //1/4	1.64	Mbps	1500
●	<input checked="" type="checkbox"/>	managem...	C 4	A (192.16...	B (192.168.1...	Port //1/3	Port //1/4	0.04	Mbps	1500

Figure 102 – Flux de trafic définis sur le Spirent C1 avec une génération à 4 Mb/s

Comme pour les tests avec un débit de 3 Mb/s, les volumes de trafic sont diminués afin de générer au total un débit de 4 Mb/s.

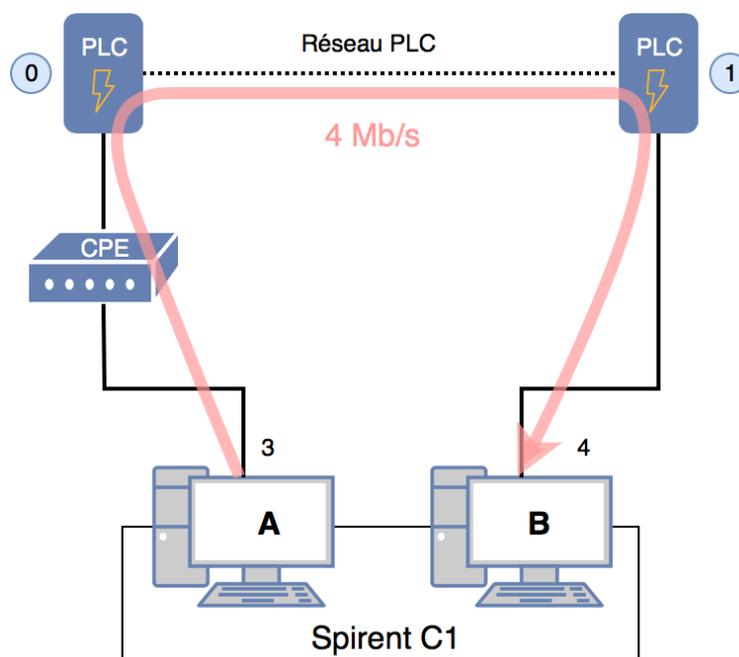


Figure 103 – Schéma du réseau de tests PLC avec un génération de trafic à 4 Mb/s

En se référant au précédent schéma, le réseau de tests PLC reste le même. Seul le débit transitant entre les deux hôtes virtuels est différent, il augmente de 1 Mb/s.

Les tests peuvent être maintenant démarrés afin d'en analyser la latence et la perte de paquets.

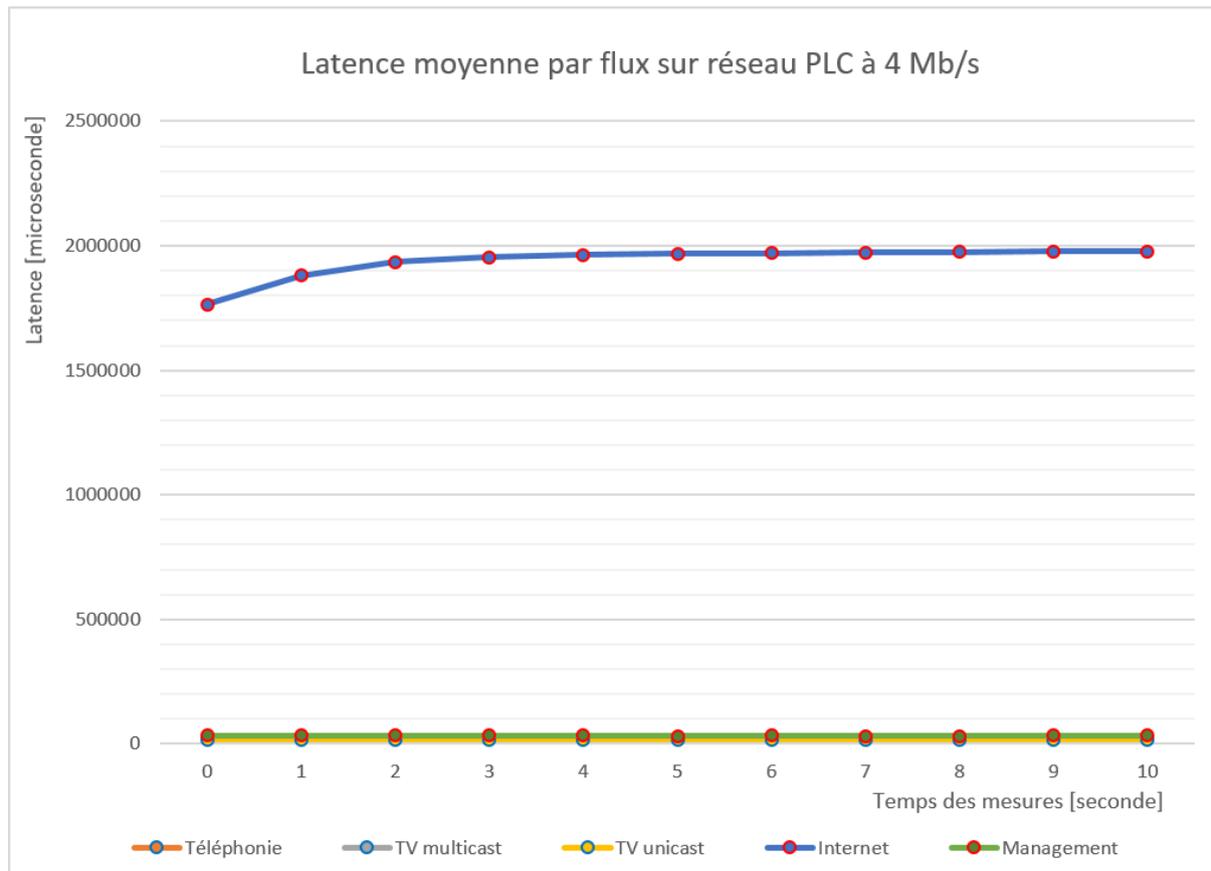


Figure 104 – Latence moyenne sur le réseau de tests PLC avec une génération de trafic à 4 Mb/s

La première conséquence de la congestion du réseau de tests est observable. La latence moyenne, du trafic ayant la priorité la plus faible, explose. La latence moyenne du flux de trafic atteint pratiquement 2 secondes, ce qui est énorme. En revanche, les flux de trafic ayant une priorité plus haute conservent une latence moyenne relativement faible.

L'exposition de la latence moyenne, concernant le trafic Internet, démontre que le réseau de tests PLC devient congestionné à 4 Mb/s. La priorisation des paquets est donc activée sur le CPE et la latence augmente pour les flux de trafic concernés.

Pertes de paquets sur réseau PLC à 4 Mb/s					
Flux de trafic	Hôte virtuel A (source) Compteur de trames	Hôte virtuel B (réception) Compteur de trames	Hôte virtuel A (source) Compteur de trames [Mb]	Hôte virtuel B (réception) Compteur de trames [Mb]	Perte de paquets [%]
Téléphonie	1'594	1'594	19'128	19'128	0
TV multicast	1'594	1'594	19'128	19'128	0
TV unicast	111'580	111'578	1'338.960	1'338.936	0
Internet	81'294	49'295	975.528	591.540	39.36
Management	1'594	1'594	19'128	19'128	0
Total	197'656	167'463	2'371.872	1'989.170	15.27

Figure 105 – Perte de paquets sur le réseau de tests PLC avec une génération de trafic à 4 Mb/s

Au niveau des pertes de paquets, seul le trafic Internet est concerné. En effet, une perte de paquets totale d'environ 40%, pour ce flux, est observée.

Le réseau de tests est bel et bien congestionné et le CPE se doit de supprimer des paquets. Ce qui est intéressant de noter est le fait que seul le trafic Internet est concerné par cette suppression de paquets. En effet, la congestion n'atteignant pas un seuil maximal, seul le flux le moins prioritaire est impacté par le mécanisme de suppression de paquets.

Apparemment, le CPE doit fonctionner par seuil de congestion. Avec une faible congestion, comme dans ce cas avec un débit de 4 Mb/s, seuls les flux de trafic ayant le moins de priorité sont concernés par une augmentation de latence et une suppression de paquets. En revanche, lors d'une forte congestion du réseau de tests, tous les flux de trafic sont impactés par la suppression de paquets, comme nous avons pu l'observer quand un débit de 100 Mb/s est injecté sur le réseau de tests.

Comme observé précédemment, un simple réseau de tests avec CPE, Spirent C1 et une injection de trafic à 100% donne une suppression de paquets totale d'environ 10% (figure 96) sur tous les flux de trafic. Si le rapport entre le débit injecté et la perte de paquets est respecté, un débit de 90 Mb/s ne devrait pas provoquer de pertes de paquets. Cette hypothèse va être analysée.

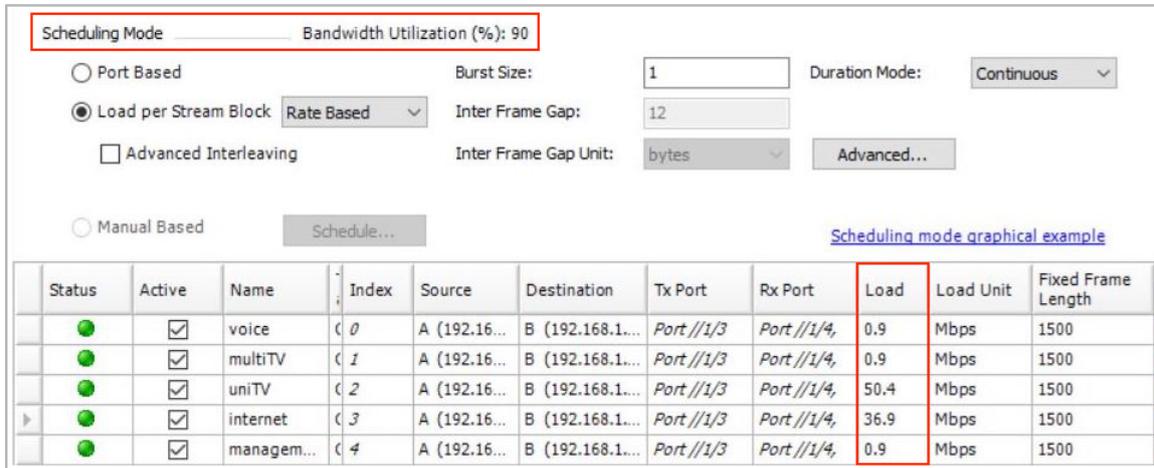


Figure 106 – Flux de trafic définis sur le Spirent C1 avec une génération à 90 Mb/s

Comme pour les tests avec un débit de 10 Mb/s, encore une fois, les volumes de trafic sont modifiés sur le Spirent C1.

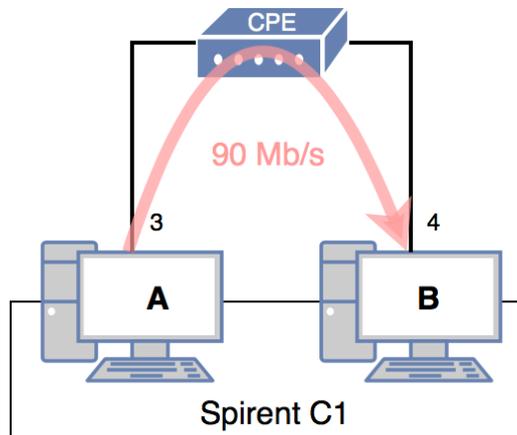


Figure 107 – Schéma du réseau de tests CPE avec une génération de trafic à 90 Mb/s

Sur ce réseau de tests comprenant uniquement le CPE, les latences et les pertes de paquets vont être analysées afin de déterminer si une injection à 90 Mb/s provoque une suppression de paquets.

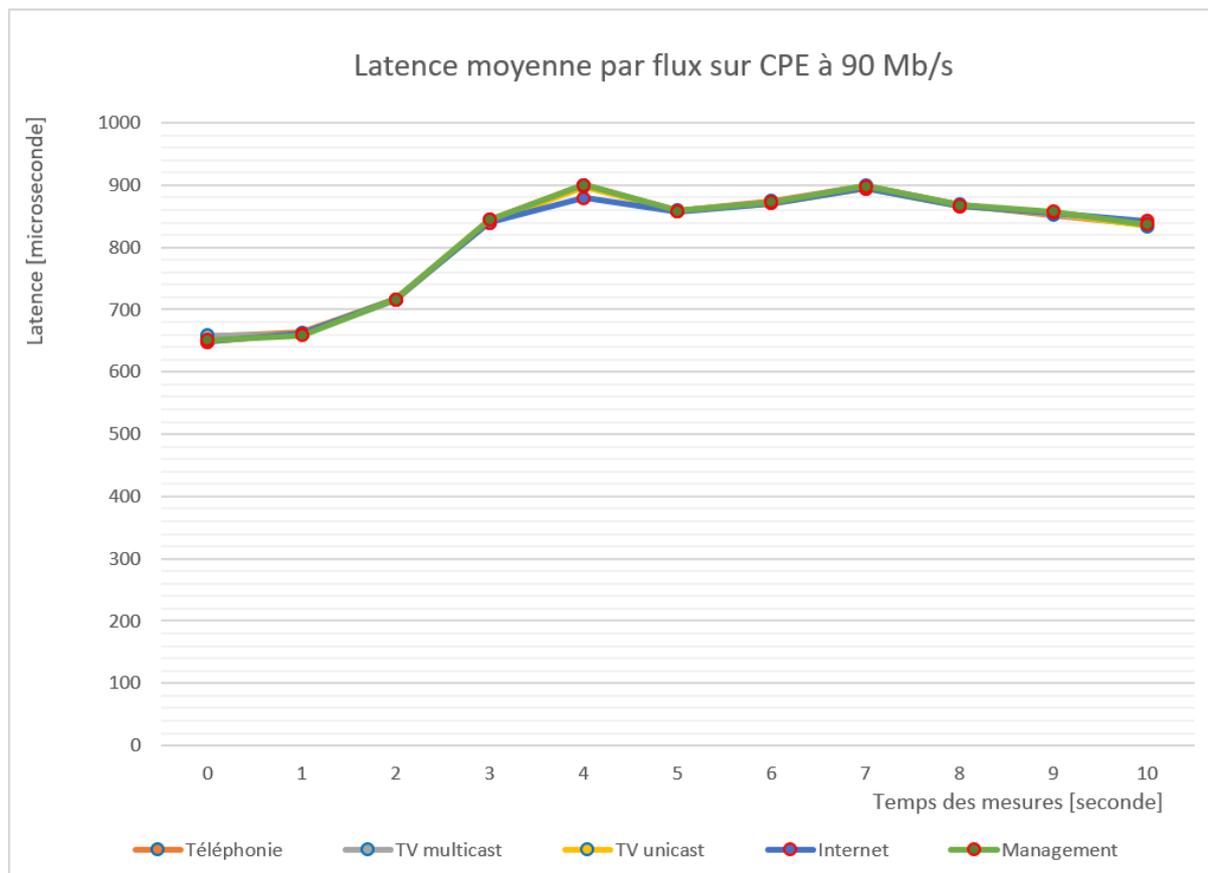


Figure 108 – Latence moyenne sur le CPE avec une génération de trafic à 90 Mb/s

Concernant la latence moyenne des différents flux de trafic, des latences plus ou moins stables sont atteintes. Les latences moyennes sont les mêmes pour tous les flux de trafic.

Si une comparaison est faite entre les latences moyennes atteintes entre les tests avec CPE et une injection de trafic à 90 et 100 Mb/s (figure 96), ces latences sont dans les deux cas les mêmes, environ 0.8 milliseconde. Aucune priorisation des flux n'est donc activée sur le CPE.

Pertes de paquets sur CPE à 90 Mb/s					
Flux de trafic	Hôte virtuel A (source) Compteur de trames	Hôte virtuel B (réception) Compteur de trames	Hôte virtuel A (source) Compteur de trames [Mb]	Hôte virtuel B (réception) Compteur de trames [Mb]	Perte de paquets [%]
Téléphonie	44'515	44'515	534.180	534.180	0
TV multicast	44'515	44'515	534.180	534.180	0
TV unicast	2'492'807	2'492'807	29'913.684	29'913.684	0
Internet	1'825'091	1'825'091	21'901.092	21'901.092	0
Management	44'515	44'515	534.180	534.180	0
Total	4'451'443	4'451'443	53'417.316	53'417.316	0

Figure 109 – Perte de paquets sur le CPE avec une génération de trafic à 90 Mb/s

L'hypothèse qu'avec un débit de 90 Mb/s, aucune suppression de paquets n'ait lieu est confirmée. En effet, avec un débit de 100 Mb/s, une suppression d'environ 10% était enregistrée sur le CPE, donc théoriquement avec une génération de trafic à 90 Mb/s sur le Spirent C1, aucune perte de paquet n'est enregistrée.

En augmentant le débit de 1 Mb/s afin d'injecter 91 Mb/s de trafic dans le CPE, une perte de paquets de 1% est enregistrée, et ainsi de suite. Le CPE accepte donc une communication entre deux machines, ou dans notre cas entre deux hôtes virtuels, de maximum 90 Mb/s sans qu'il n'y ait de pertes de paquets, la latence étant dans tous les cas non influencée.

5.2 Conclusion des tests et validation

Ces séries de tests ont été menées sur des réseaux de tests implémentant la technologie PLC, notamment grâce aux équipements Devolo commandés préalablement. Ces tests se sont divisés en deux parties, une première étape en réalisant des SpeedTest, sur différents réseaux de tests PLC, grâce aux SpeedTest Swisscom et CNLAB. Puis, une seconde étape en analysant les latences et les pertes de paquets, sur les réseaux de tests, grâce au puissant générateur de trafic Spirent C1. Les outils utilisés, afin d'analyser les performances de ces équipements Devolo, se complètent bien, et grâce à eux, un bon aperçu des performances peut être observé.

Pour la première partie des tests, les SpeedTest permettent d'analyser les performances des débits descendants et montants atteignables avec les équipements Devolo. Premièrement, des SpeedTest ont été lancés directement depuis le CPE afin d'obtenir une mesure sur laquelle se baser. Des débits montants moyens de 42 Mb/s et des débits descendants moyens de 14 Mb/s ont été atteints, ces débits permettent d'avoir une référence depuis le CPE afin d'analyser les différences de débits avec le réseau PLC. Les SpeedTest sont, ensuite, démarrés au travers du réseau PLC. Les équipements PLC étant branchés sur la même phase, des débits montants moyens de 20 Mb/s et des débits descendants moyens de 14 Mb/s ont été atteints, le débit descendant est divisé par deux, alors que le débit montant reste le même. En jouant sur deux phases différentes avec les SpeedTest, des débits montants moyens de 4 à 6 Mb/s et des débits descendants moyens de 9 à 13 Mb/s ont été atteints, encore une fois, le débit montant est fortement perturbé, alors que le débit descendant est relativement peu perturbé. Étonnamment, en créant un réseau électrique entre deux réseaux électriques différents, des débits descendants moyens de 6 Mb/s et des débits descendants moyens de 2 Mb/s ont été atteints, le débit descendant reste comparable aux résultats précédents, alors que le débit montant est énormément diminué.

Un réseau PLC construit sur une même phase présente des performances acceptables, en comparaison aux débits atteints directement depuis le CPE. En revanche, le fait de construire un réseau entre plusieurs phases ou entre deux réseaux électriques différents diminue considérablement les performances. La technique du saut de phases à haute fréquence, mis en place par les équipements Devolo, est fonctionnelle, mais les performances sont fortement réduites. À noter que les débits présentés par le software Cockpit de Devolo, comme nous avons pu le voir lors de la phase de réalisation, ne reflètent pas les débits réels obtenus avec les tests.

Le réseau de tests Devolo a été mis en place durant deux semaines dans le bâtiment, la télévision de l'appartement étant branché à Internet via ce réseau PLC. Le signal de la télévision transitant entre le CPE Swisscom et la télévision via le réseau PLC, ce signal ayant été que très peu perturbé. De plus, l'équipement Devolo connecté au CPE et celui connecté à la télévision se trouvant sur deux phases différentes, les performances ont été jugées bonnes. En effet, le signal de la télévision était perturbé que très rarement, des nuisances ont été notées lorsque des équipements électriques consommant beaucoup d'énergie, comme le four, étaient démarrés, ces nuisances ne durant que quelques secondes.

Pour la seconde partie des tests, des tests de 10 minutes chacun ont été réalisés avec le générateur de trafic Spirent C1, afin d'analyser les latences et les pertes de paquets entre deux machines. En effet, différents flux de trafic ont été configurés sur le Spirent C1 afin d'imiter au mieux le trafic Internet réel. Des flux de trafic téléphoniques (VoIP), de télévision (multicast et unicast), des flux de trafic de management et Internet ont été créés, afin de les injecter dans le réseau de test PLC, entre deux hôtes virtuels créés sur le Spirent C1, à plusieurs débits. À noter que lors de leur génération, ces flux de trafic sont classifiés selon une certaine QoS, afin que le CPE puisse prioriser les paquets des différents flux de trafic selon leur importance, en cas de congestion du réseau.

Dans un premier temps, plusieurs réseaux de tests PLC sont mis en place, toujours en jouant avec les différentes phases du réseau électrique, et ces flux de trafic sont injectés à 100 Mb/s entre les deux hôtes virtuels. Les latences et les pertes de paquets de ces différents flux sont analysées. Dans tous les cas, avec une injection de trafic à 100 Mb/s, les latences moyennes des flux de trafic de télévision (multicast et unicast) et Internet explosent, alors que les latences moyennes des flux de trafic téléphonique et de management sont relativement basses. La perte de paquets totale atteint 97%, pour le flux Internet, la perte est de 100%, alors que les pertes de paquets des trafics téléphoniques et de management atteignent environ 9%. Ces observations permettent d'affirmer que le réseau de tests est largement congestionné. En revanche, les techniques de QoS sont performantes sur le CPE, ce dernier priorisant les flux sensibles.

Ces fortes latences et pertes de paquets sont dues à la congestion du réseau de tests mis en place avec les équipements Devolo, car en testant uniquement les pertes de paquets sur le CPE sans équipements PLC, avec une injection de 100 Mb/s, les pertes de paquets atteignent 10% pour tous les flux de trafic. Les latences moyennes des différents flux de trafic sont stables et aussi les mêmes pour tous les flux. Ce qui veut dire que les techniques de priorisation ne sont pas activées sur le CPE, cette perte de paquets est due à une sécurité afin que la communication entre deux machines n'utilise pas la bande passante complète disponible du réseau.

Il était intéressant de découvrir la limite du débit maximum acceptable, afin qu'il n'y ait pas de perte de paquets, sur ces réseaux PLC. Après une longue série de tests, cette limite a été fixée. En effet, en injectant 3 Mb/s sur le réseau de tests PLC depuis le Spirent C1, aucune perte de paquets n'est enregistrée, et la latence moyenne est faible et la même pour tous les flux de trafic. En augmentant ce débit à 4 Mb/s, la latence du trafic Internet explose et une perte de paquets de 40% est observée pour ce trafic, les techniques de priorisation des flux de trafic sont activées sur le CPE, car le réseau devient congestionné.

Cette même analyse a été menée sur le CPE, afin de trouver la limite du débit maximum acceptable, afin qu'il n'y ait pas de perte de paquets. Avec un réseau de tests comprenant uniquement le CPE, il a été observé qu'une perte de paquets de 10% est engendrée avec une injection de trafic à 100 Mb/s. Donc logiquement, en injectant un débit de 90 Mb/s, aucune perte de paquets ne devrait avoir lieu et c'est le cas. À 91 Mb/s, les pertes de paquets commencent sur le CPE, et les latences moyennes explosent.

Dans l'ensemble des tests réalisés avec les équipements Devolo, les performances, au niveau des débits atteints, des latences et des pertes de paquets, ne sont pas acceptables. Nous remettons donc en question les performances, des équipements Devolo, assurées par la société Devolo. En effet, la société Devolo parle de débits allant jusqu'à 1.2 Gb/s sur une section de câbles électriques allant jusqu'à 300/400 mètres, mais vu les tests réalisés et les résultats obtenus, nous sommes très loin des performances attendues. Un réseau PLC peut être utilisé lorsque les services tiennent à 10, voir 15 Mb/s.

Ces faibles performances peuvent être dues à plusieurs facteurs. En effet, le réseau électrique du bâtiment où a été réalisé ces séries de tests à plus de 30 ans, ce qui peut réduire les performances si les câbles sont abîmés ou de qualité moindre. La longueur des segments de câbles électriques peut aussi avoir une influence sur le réseau PLC, mais ces tests ont aussi été réalisés avec des équipements Devolo branchés sur la même phase distante de moins de 5 mètres, et les mesures donnaient les mêmes résultats. Les SpeedTest offrent des débits acceptables dans certains cas, mais ces chiffres ne présentent pas les pertes de paquets, il ne faut donc pas totalement s'y fier. Il a aussi été pensé que les tests réalisés sur le réseau PLC avec le Spirent C1 ont pu être influencé par le Spirent C1. En effet, il a été observé que les équipements consommant beaucoup d'énergie peuvent perturber le signal, durant les tests le Spirent C1 génère le trafic ce qui demande une forte demande en énergie, et cet équipement est branché au réseau électrique via lequel le trafic transite grâce aux équipements Devolo, le signal peut donc fortement être perturbé.

Une conclusion peut être faite, les réseaux électriques ne sont pas faits pour le transport des données Internet.

6 Analyse économique

La partie analyse économique de ce projet de Bachelor nous permet de calculer et d'analyser les différents coûts de la mise en place et de l'exploitation de réseaux d'accès. Ces réseaux d'accès sont conceptualisés avec différentes méthodes et technologies d'accès comme FTTH P2P, FTTH PON, G.Fast, FSO, ou encore PLC. Ces calculs de coûts permettront de comparer la mise en place de ces différentes méthodes et technologies d'accès.

Des tableaux et graphiques économiques sont créés sur les coûts des différents segments d'un réseau d'accès pour les technologies FTTH P2P et G.Fast.

Les tableaux sont remplis en fonction de certaines hypothèses comme le nombre d'habitants desservit par ce réseau d'accès, le type de zone qu'il couvre (urbaine ou rurale), le nombre moyen d'habitants dans ces différents types de zones, les différentes longueurs des segments Feeder, Drop et Inhouse, et les différents coûts des équipements sur le réseau d'accès.

Une fois les tableaux remplis, des graphiques sont générés afin de représenter ces coûts. Ces graphiques représentent le CAPEX (Capital Expenditures ou dépenses d'investissement) et l'OPEX (Operational Expenditure ou dépenses d'exploitation) des différents segments d'accès du réseau, et le Business Case est aussi généré.

Premièrement, les coûts d'un réseau d'accès FTTH P2P sont calculés afin d'avoir une base de coûts pour les différents segments du réseau d'accès et par client. Puis, d'autres technologies d'accès comme FTTH PON, G.Fast, FSO ou PLC sont comparées avec des cas concrets de déploiement de réseau avec des exemples, ou des hypothèses définies.

Cette partie d'analyse économique permet de différencier les coûts totaux des réseaux d'accès implémentant différentes technologies dans différents contextes. Au final, ces chiffres permettront de représenter le temps qu'il faut pour qu'un réseau d'accès soit rentable.

6.1 Spécifications des zones et des segments d'accès

Par technologie d'accès, les tableaux et graphiques économiques sur les coûts sont remplis de deux manières différentes:

1. Par zone urbaine
2. Par zone rurale

Tous les chiffres présentés ci-dessous proviennent de discussions avec la société FTTH-FR, les superviseurs et le service de la statistique du canton de Fribourg. Les chiffres transmis par le service de la statistique du canton de Fribourg sont basés sur des données de 2016.

Les calculs de coûts et la génération des tableaux sont réalisés dans des documents Excel disponibles en annexe. Dans le rapport, les graphiques sont présentés, mais pour les tableaux de coûts, veuillez vous référer aux documents Excel en annexe, sur le CD ou la Forge.

Pour une zone urbaine

Les chiffres sont définis en prenant l'exemple de la ville de Fribourg et son agglomération.

En se référant au chapitre d'analyse technique 2.1.4 concernant l'état du déploiement du réseau de la société FTTH-FR, la ville de Fribourg et agglomération compte 6 grands CO pour 50'000 logements ou entreprises. Ce qui veut dire qu'un CO dessert environ 8'500 logements ou entreprises.

Concernant le nombre de logements par bâtiment en zone urbaine, nous avons contacté l'office des statistiques du canton de Fribourg et ils ont réalisé le calcul. En moyenne, pour une zone urbaine (Fribourg et agglomération ou Bulle), il y a 3.8 ménages par bâtiments. Il y a donc 9'800 bâtiments pour 37'444 ménages au total pour les zones urbaines du canton de Fribourg.

Pour la conception de réseaux en zones urbaines, 8'500 logements ou entreprises, correspondant à 2'237 bâtiments. Ces chiffres sont fixés comme hypothèse.

Pour une zone rurale

Les chiffres sont définis en prenant l'exemple d'un village moyen de 1'000 habitants de la campagne fribourgeoise.

Un CO de moyenne ou petite taille dessert ces 1'000 logements ou entreprises. Après contact avec l'office des statistiques du canton de Fribourg, ils ont réalisé le calcul pour connaître le nombre de logements par bâtiment en zone rurale. En moyenne, pour une zone rurale (reste du canton), il y a 1.5 ménage par bâtiments. Il y a donc 60'258 bâtiments pour 88'907 ménages dans une zone rurale au total dans le canton de Fribourg.

Pour la conception de réseaux en zones rurales, 1'000 logements ou entreprises, correspondant à 667 bâtiments. Ces chiffres sont fixés comme hypothèse.

6.1.1 Tableaux et chiffres

Les spécifications, équipements et chiffres présentés ci-dessous sont en relation avec un réseau d'accès FTTH P2P.

Chiffres par CO

Par CO	Logements / Entreprises	Logements par bâtiments	Bâtiments	DP
Zone urbaine	8'500	3.8	2'237	8
Zone rurale	1'000	1.5	667	4

Figure 110 – Tableau de chiffres pour un CO (Central Office)

Chiffres par DP

Par DP	Logements / Entreprises	Logements par bâtiments	Bâtiments
Zone urbaine	1'063	3.8	280
Zone rurale	250	1.5	167

Figure 111 – Tableau de chiffres pour un DP (Distribution Point)

Segments du réseau d'accès et délimitations:

1. **Feeder:** CO (terminaisons fibrées) à DP (manchon)
2. **Drop:** Connexion au DP (ports de sortie du manchon) à BEP (manchon)
3. **Inhouse:** Sortie du BEP (ports de sortie du manchon) à la prise optique (OTO)

Longueur des segments

Longueur des segments	Feeder [m]	Drop [m]	Inhouse [m]
Zone urbaine	1'000	250	40
Zone rurale	2'000	500	40

Figure 112 – Tableau de chiffres pour les longueurs de segments

6.2 Coût des équipements d'un réseau d'accès

Les coûts des équipements d'un réseau d'accès sont définis, dans un premier temps, pour un réseau d'accès de type FTTH P2P. Les équipements sont répartis par segments d'accès. Ces coûts sont des estimations et ils ont été estimés avec l'aide des superviseurs et du mandant.

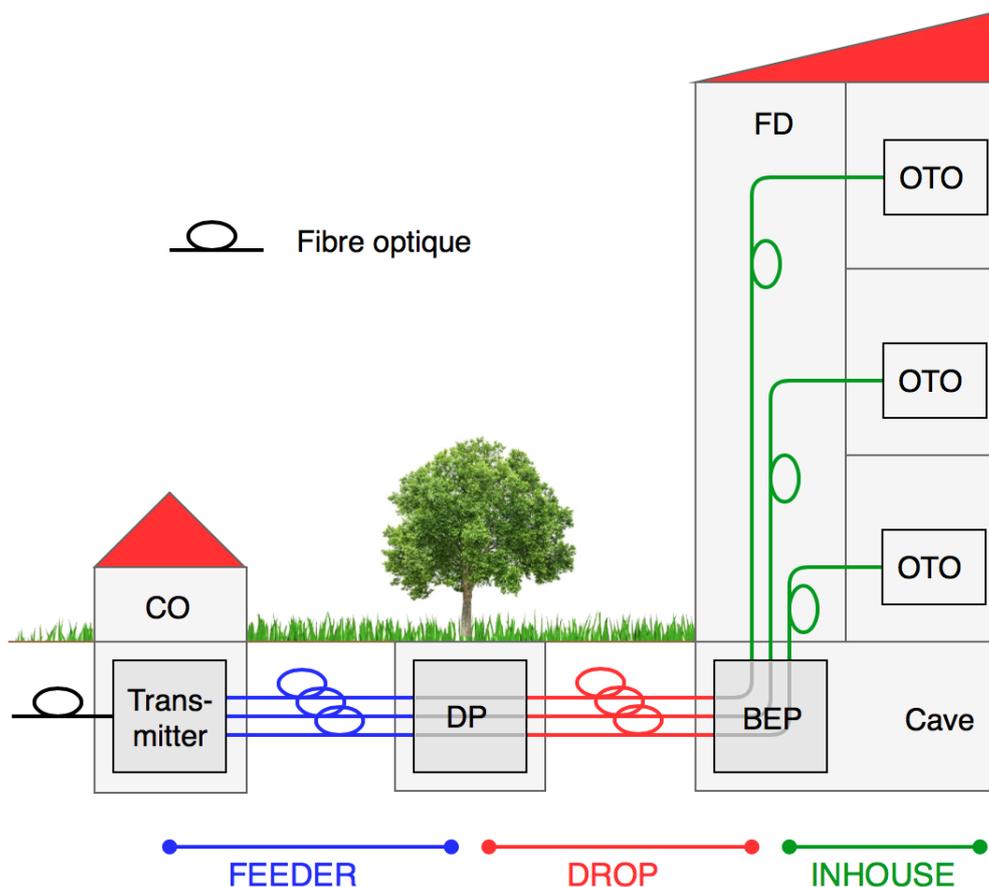


Figure 113 – Segments d'accès FTTH P2P

Feeder

Comme défini, le segment Feeder est délimité du CO (terminaisons fibrées) jusqu'au DP (manchon).

Équipements du segment Feeder		Prix unitaire [CHF]
CO	Terminaisons fibrées par port	50
	Sortie câblée par câble	500
	Équipements (armoie ODFM équipée de cassette d'épissure et d'environ 2000 connecteurs)	10'000
DP	Chambre (maçonnée)	2'000
	Manchon	600
	Connexion au manchon par câble (depuis Feeder)	300

Figure 114 – Coût unitaire des équipements du segment Feeder

Drop

Comme défini, le segment Drop est délimité du DP (connexion au manchon) jusqu'au BEP (manchon).

Équipements du segment Drop		Prix unitaire [CHF]
DP	Connexion au manchon par port (sur Drop)	35
BEP	Entrée câblée dans le bâtiment et connexion au manchon par câble (depuis Feeder)	500
	Manchon	200

Figure 115 – Coût unitaire des équipements du segment Drop

Inhouse

Comme défini, le segment Inhouse est délimité du BEP (connexion au manchon) jusqu'à la prise optique (OTO).

Équipements du segment Inhouse		Prix unitaire [CHF]
BEP	Connexion au manchon par câble (sur Inhouse)	35
OTO	Prise optique (prise pré-confectionnée avec 40 mètres de câble à 4 fibres et 4 connecteurs, tirage et installation)	600

Figure 116 – Coût unitaire des équipements du segment Inhouse

6.2.1 Fibre optique

Concernant les coûts de la fibre optique, deux aspects sont à prendre en compte. Le coût du câble de fibre optique et le coût de la pose du câble de fibres optiques.

Câble de fibres optiques

Les coûts des câbles de fibres optiques suivants ont été donnés par la société Transfibres basée à Grandvaux (Suisse).

Nombre de fibres	Longueur [m]	Prix [CHF]
144	1'000	5'328
	500	2'765
48	1'000	1'885
	500	1'042
24	1'000	1'057
	500	628
4	1'000	467
	500	246

Figure 117 – Coût des câbles de fibres optiques selon la société Transfibres

Dans un premier temps, nous avons utilisé ces chiffres afin de calculer les coûts des réseaux d'accès fibrés. Mais après discussion avec Monsieur Frédéric Mauron, nous avons obtenu des coûts par mètres pour les différents câbles de fibres optiques.

Segments d'accès	Nombre de fibres	Prix [CHF/m]
Feeder	576	16.80
	288	8.20
	144	5.10
Drop	96	3.20
	48	1.90
	24	1
	12	0.70

Figure 118 – Coût des câbles de fibres optiques selon Monsieur Frédéric Mauron

Ces coûts vont nous servir de base afin de calculer les coûts des réseaux d'accès.

Pose du câble de fibres optiques

Les coûts de la pose du câble de fibres optiques viennent s'ajouter aux coûts du câble de fibres optiques.

La société FTTH-FR, nous a informé que lors de la pose des câbles de fibres optiques, dans 99% des cas, les canalisations électriques sont utilisées pour accueillir les câbles de fibres optiques. Dans ce cas, le câble est simplement posé dans les canalisations et les fibres optiques sont soufflées à l'intérieur. En revanche, dans 1% des cas, une tranchée doit être creusé afin d'y déposer le ou les câbles, ce qui implique des coûts de génie civil bien plus élevés.

Pose de câbles de fibres optiques		Prix [CHF]
Dans les canalisations électriques (tirage et soufflage)		30 /mètre
Dans les tranchées en zones urbaines (creusage, tirage et soufflage)	En zones urbaines	200 /mètre
	En zones rurales	65 /mètre

Figure 119 – Coût de la pose des câbles de fibres optiques

À noter que peu importe le nombre de fibres optiques dans le câble, la taille de la tranchée reste la même. La société FTTH-FR nous a renseigné qu'un câble de 144 fibres optiques mesure 16 millimètres de diamètre et un câble de 1'008 fibres optiques mesure 18 millimètres de diamètre. Et, au final, ces câbles des fibres optiques sont placés dans des tubes de protection (par exemple 60 millimètres) pouvant accueillir n'importe quelle grandeur de câbles.

6.3 Coûts d'un réseau d'accès FTTH P2P

Le document Excel contenant les tableaux et graphiques, concernant cette partie, est disponible en annexe, sur le CD ou la Forge, sous le nom de "dufresne_bachelor_costFTTHP2P_130718.xlsx". Les coûts des équipements par segments d'accès sont définis afin d'y calculer le coût des segments d'accès, le coût par client, le CAPEX, l'OPEX et le Business Case du réseau d'accès entier.

Le CAPEX peut être maintenant calculé avec les coûts et les informations présentés ci-dessus. Des schémas sont définis ci-dessous afin de définir les réseaux d'accès, en zones urbaines et rurales, dont les coûts sont calculés.

Il faut encore définir les coûts d'exploitation ou OPEX avant de pouvoir générer les Business Case des réseaux d'accès. L'OPEX des réseaux d'accès en fibres optiques n'est pas très élevé. Il faut prendre en compte les coûts d'utilisation des canalisations existantes, par exemple celles des distributeurs d'électricité, et les réparations occasionnelles comme les dommages causés par les rongeurs. Nous compterons une vingtaine de francs par câbles fibrés par année. Ensuite, il y a des coûts pour l'activation, les éventuels dépannages et la désactivation de chaque client, environ 150 à 250 CHF par client actif sur la durée du contrat.

Les OPEX sont fixés en fonction de l'importance des réseaux FTTH P2P en zones urbaines et rurales. 10'000 CHF d'OPEX, par année, est fixé pour un réseau FTTH P2P en zones urbaines et 5'000 d'OPEX CHF, par année, est fixé pour un réseau FTTH P2P en zones rurales.

Premièrement, les schémas des réseaux d'accès en zones urbaines et rurales sont présentés, puis les coûts finaux sont présentés.

6.3.1 Schéma du réseau d'accès en zones urbaines selon les hypothèses fixées

Le schéma réseau ci-dessous, permet de rendre plus explicites les chiffres présentés précédemment pour un réseau d'accès FTTH P2P en zone urbaine. Il s'agit, bien évidemment, d'une illustration.

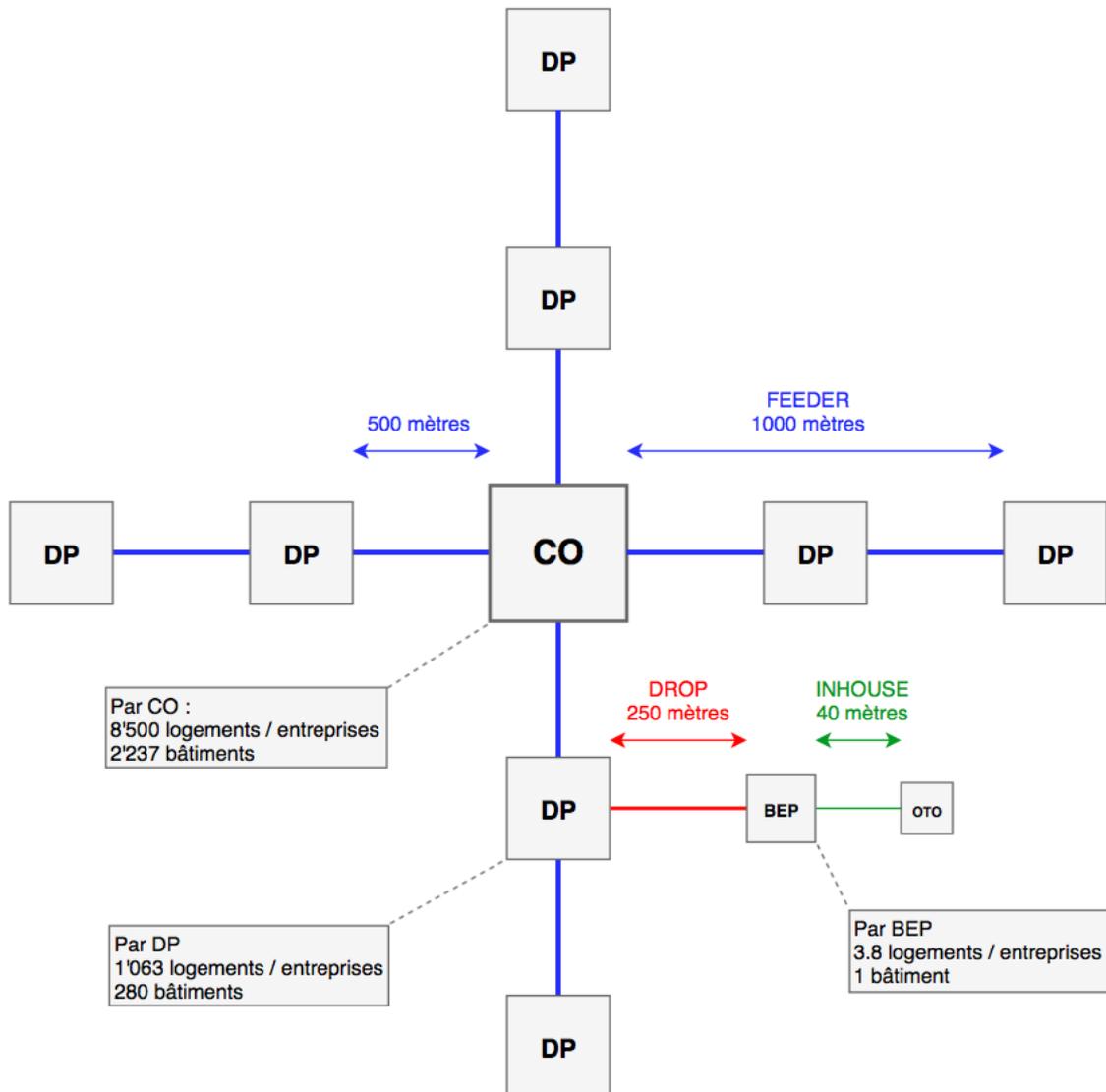


Figure 120 – Schéma du réseau d'accès FTTH P2P en zones urbaines dont les coûts sont calculés

6.3.2 Schéma du réseau d'accès en zones rurales selon les hypothèses fixées

Le schéma réseau ci-dessous, permet de rendre plus explicites les chiffres présentés précédemment pour un réseau d'accès FTTH P2P en zone rurale. Il s'agit, bien évidemment, d'une illustration.

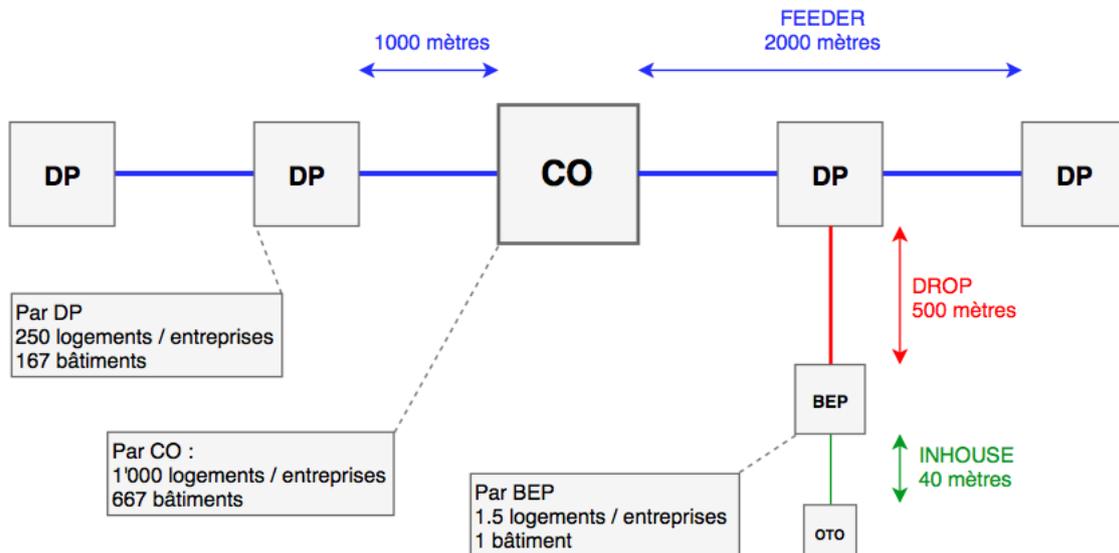


Figure 121 – Schéma du réseau d'accès FTTH P2P en zones rurales dont les coûts sont calculés

Pour rappel, le réseau d'accès FTTH P2P en zones urbaines compte 8'500 logements/entreprises, contre 1'000 en zones rurales.

6.3.3 CAPEX, OPEX et Business Case pour un réseau d'accès FTTH P2P

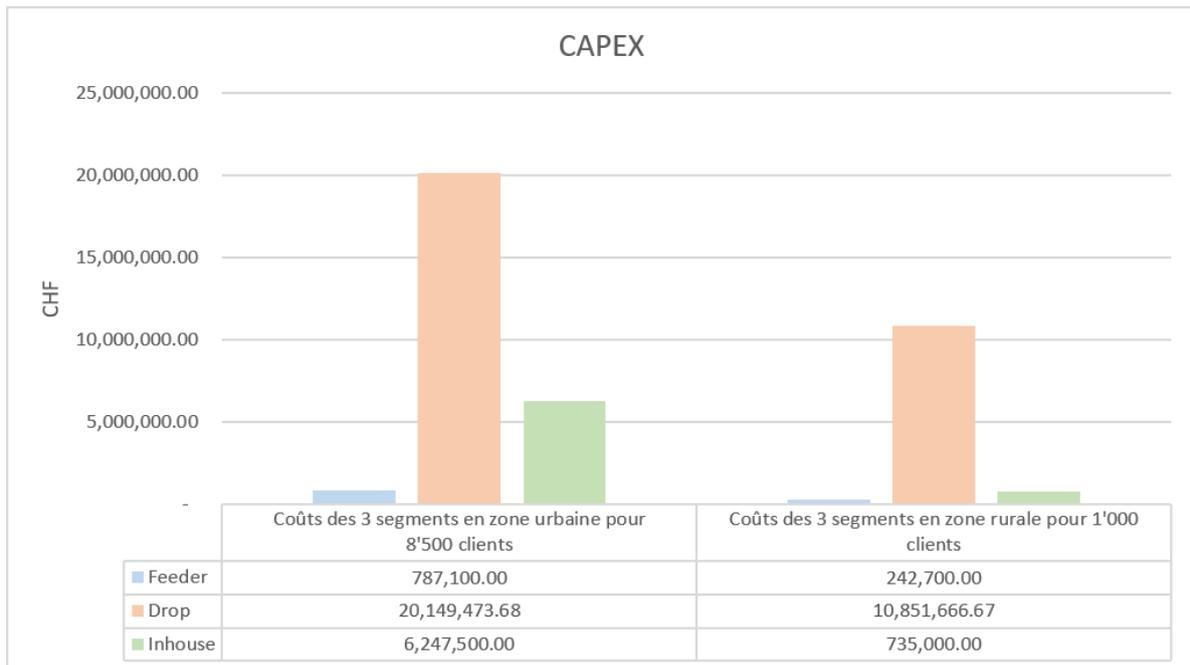


Figure 122 – CAPEX des réseaux d'accès FTTH P2P en zones urbaines et rurales total

Le CAPEX total du déploiement de ce réseau d'accès FTTH P2P en zones urbaines est de 27'184'074 CHF, contre 11'829'367 en zones rurales. Le Drop est le segment d'accès le plus coûteux à déployer, car sa longueur totale est la plus importante. Mais ces coûts ne veulent pas forcément dire que le coût par client est plus élevé en zone urbaine, une analyse du CAPEX par client est aussi réalisée.

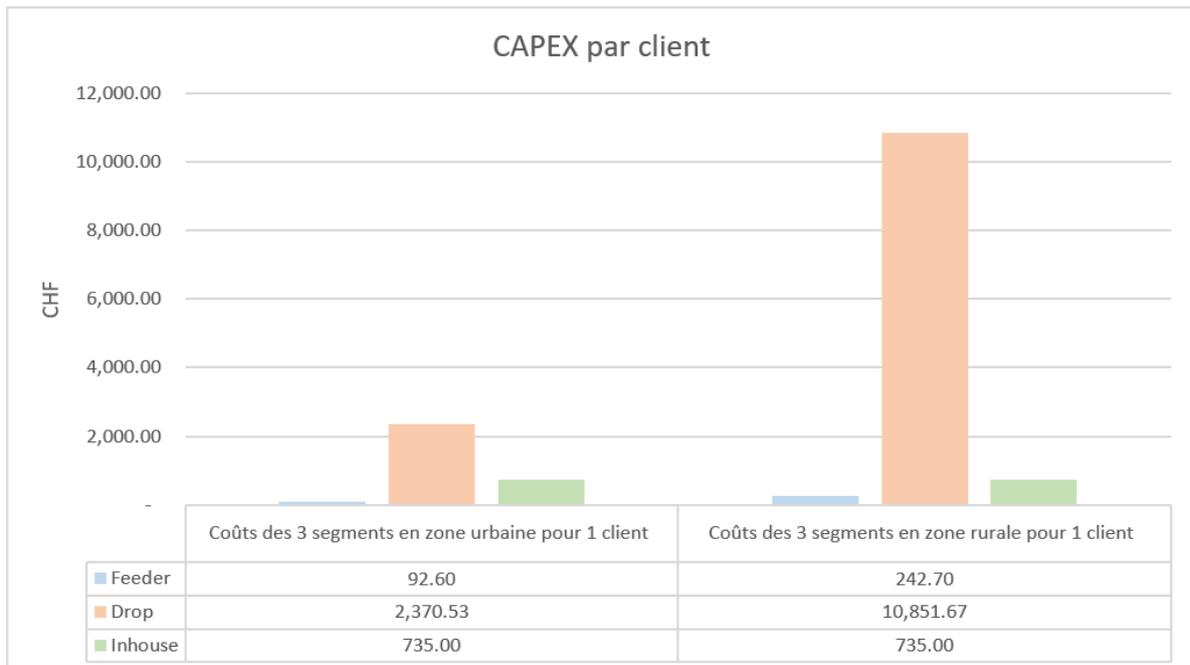


Figure 123 – CAPEX des réseaux d'accès FTTH P2P en zones urbaines et rurales par client

Le CAPEX par client de ce réseau d'accès FTTH P2P en zones urbaines est de 3'199 CHF, contre 11'830 en zones rurales. En zones rurales, le CAPEX par client est beaucoup plus élevé, cette différence de coûts provient des longueurs de segments. En effet, en zones rurales, les segments d'accès Feeder et Drop sont beaucoup plus longs qu'en zones urbaines.

Concernant les Business Case des réseaux d'accès FTTH P2P en zones urbaines et rurales, l'hypothèse que les 8'500 clients souscrivent un abonnement chez les fournisseurs de services est fixée, et que les 1'000 clients en zones rurales fassent de même est fixée. Au cours des années, le nombre d'abonnés supplémentaires n'est pas pris en compte, car l'analyse financière porte uniquement sur le réseau d'accès mis en place pour le nombre de clients de base. À noter que la location d'une fibre optique aux fournisseurs de services est estimée à 26 CHF.

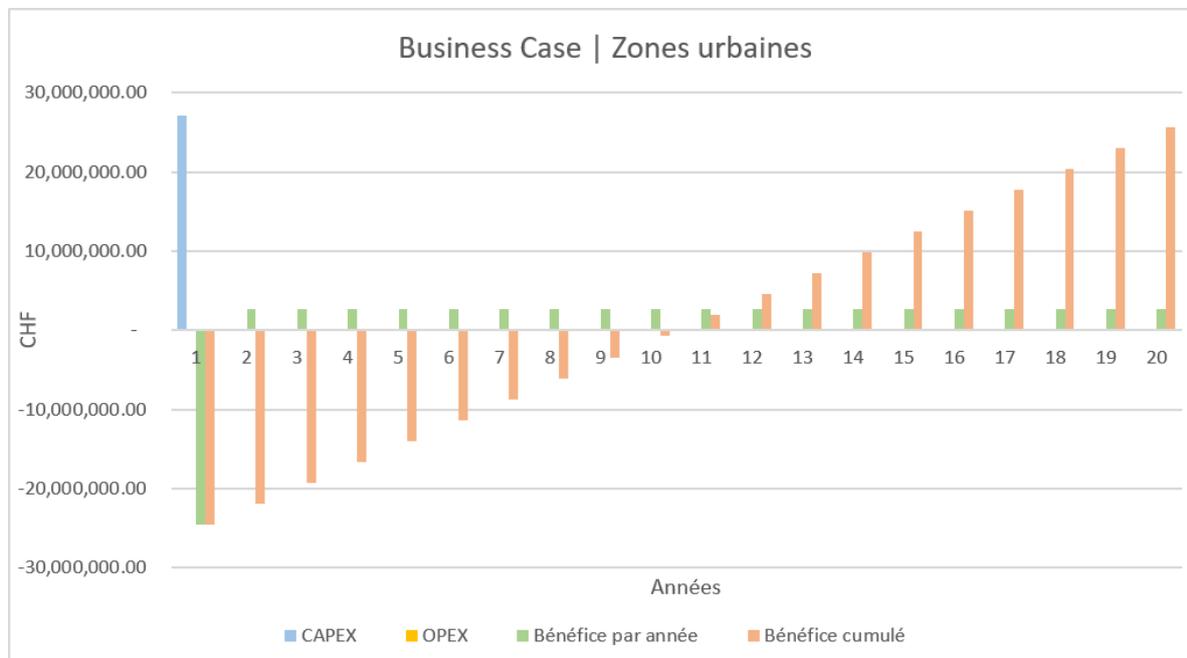


Figure 124 – Business Case d'un réseau FTTH P2P en zones urbaines

D'après le Business Case, en zones urbaines, le réseau FTTH P2P engendre un bénéfice après 11 ans. À noter que l'OPEX est tellement faible qu'il n'est pas visible sur le graphique. Après 50 ans, ce réseau d'accès FTTH P2P aura rapporté 104'915'927 CHF.

Ce réseau d'accès FTTH P2P est rentable après 11 ans, si 100% des fibres optiques sont actives. Pour calculer le nombre minimum de fibres optiques devant être actives afin de rentabiliser le réseau, il faut se baser sur l'OPEX annuel. En effet, la somme acquise par le nombre de fibres optiques devant être actives doit être supérieure à l'OPEX annuel. Pour un réseau FTTH P2P en zones urbaines, l'OPEX annuel est de 10'000 CHF, en estimant qu'une fibre optique active rapportant 26 CHF par mois, il faut qu'il y ait 32 fibres optiques actives sur ce réseau afin que le réseau soit rentable. Ce réseau en zones urbaines dessert 8'500 logements/entreprises, il doit donc y avoir 0.5% des fibres optiques actives. En revanche, dans ce cas, le réseau serait rentable après plusieurs centaines d'années.

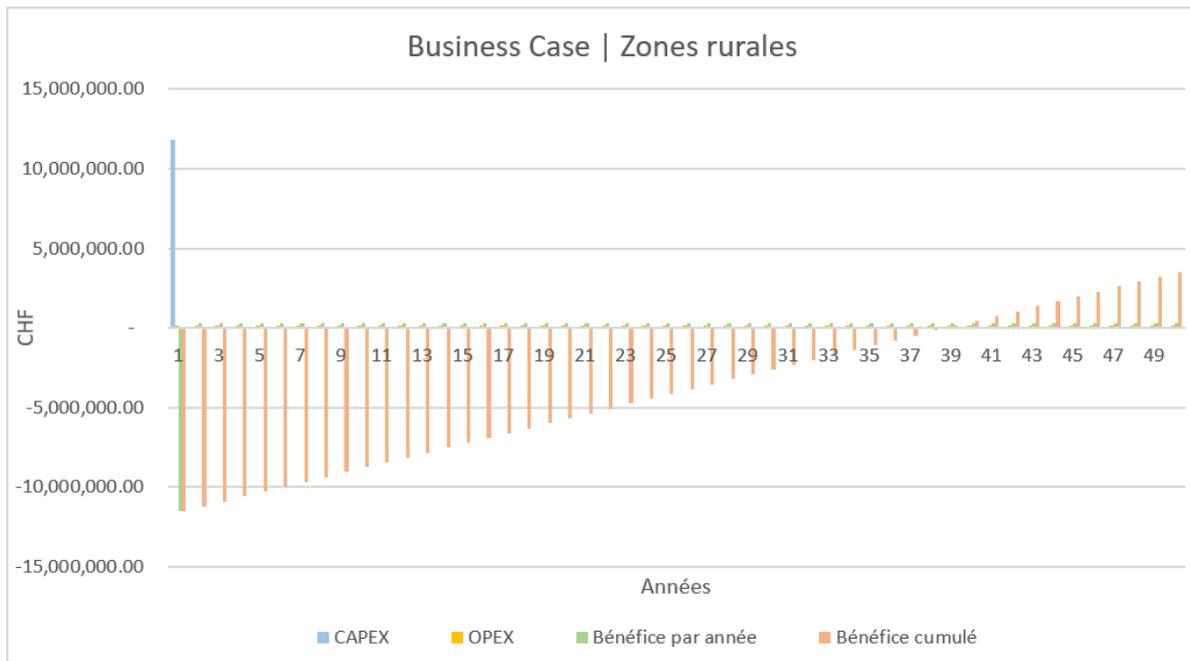


Figure 125 – Business Case d'un réseau FTTH P2P en zones rurales

D'après le Business Case, en zones rurales, le réseau FTTH P2P engendre un bénéfice après 39 ans. Après 50 ans, ce réseau d'accès FTTH P2P aura rapporté 3'213'634 CHF.

Ce réseau d'accès FTTH P2P est rentable après 39 ans, si 100% des fibres optiques sont actives. Pour un réseau FTTH P2P en zones urbaines, l'OPEX annuel est de 5'000 CHF, en estimant qu'une fibre optique active rapportant 26 CHF par mois, il faut qu'il y ait 17 fibres optiques actives sur ce réseau afin que le réseau soit rentable. Ce réseau en zones urbaines dessert 1'000 logements/entreprises, il doit donc y avoir 0.2% des fibres optiques actives. En revanche, dans ce cas, le réseau serait rentable après plusieurs centaines d'années.

6.3.4 Segments d'accès Inhouse et technologie d'accès PLC

Durant ce projet, la technologie PLC a pu être analysée et testée. Bien que les résultats des performances de cette technologie restent moyens. La mise en place d'une solution PLC permet de réduire considérablement les coûts du segment d'accès Inhouse.

Le coût d'une installation FTTH P2P jusque dans l'appartement classique, comme vu précédemment, est comparé avec une installation FTTH P2P + PLC. Dans cette comparaison, le cas d'un bâtiment avec un appartement est pris comme illustration.

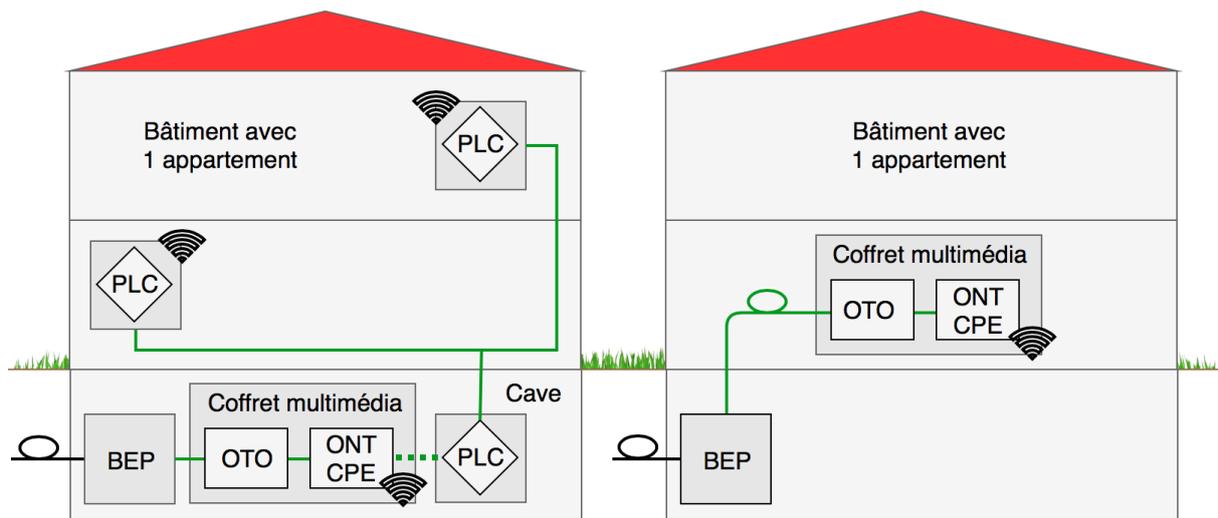


Figure 126 – Comparaison d'un segment Inhouse FTTH P2P classique et FTTH P2P + PLC

Pour le segment Inhouse classique avec fibres optiques jusque dans l'appartement, le calcul des coûts est basé sur l'analyse économique réalisée précédemment.

Pour le segment Inhouse avec la technologie PLC, le calcul des coûts sont basés sur les équipements PLC commandé pour ce projet. En effet, trois équipements PLC ont été commandés, afin de réaliser des tests durant ce projet, ces trois équipements ont été acquis pour une somme de 299 CHF.

Uniquement le CAPEX est analysé pour cette partie.

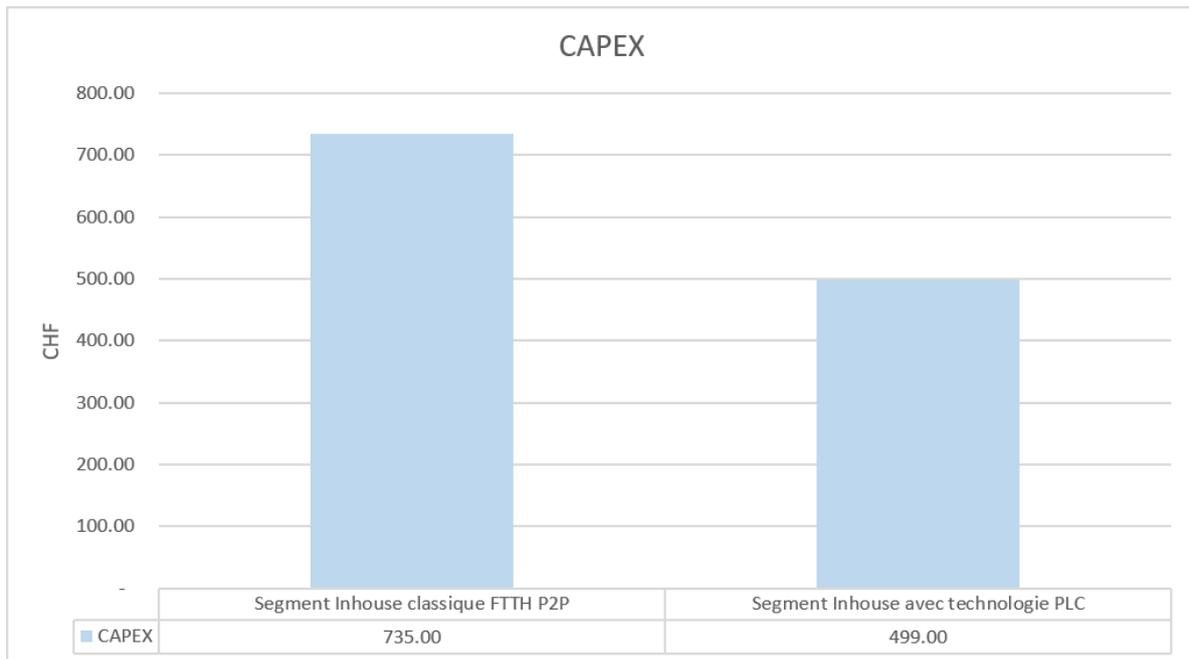


Figure 127 – CAPEX d'un segment Inhouse FTTH P2P classique et FTTH P2P + PLC

Pour le segment Inhouse classique FTTH P2P, le CAPEX prend en compte le BEP (partie Inhouse), la prise optique, les câbles de fibres optiques et le travail afin d'installer ce matériel, avec cette première solution, le CAPEX total est estimé à 735 CHF pour ce bâtiment. Pour le segment Inhouse avec technologie PLC, le CAPEX prend en compte le BEP (partie Inhouse), la prise optique et le travail afin d'installer ce matériel, avec cette deuxième solution, le CAPEX total est estimé à 499 CHF pour ce bâtiment.

Cette seconde solution permet réduire les coûts pour le segment Inhouse. Les performances de la technologie PLC laisse à désirer, c'est pourquoi la mise en place d'un réseau PLC peut être plus adéquate pour un seul client. En effet, il a été pensé de mettre en place un réseau FTTB et PLC pour plusieurs clients en partageant ce réseau dans un bâtiment à plusieurs appartements, mais vu les résultats obtenus, cette méthode ne serait vraiment pas performante.

6.3.5 Synthèse

Lorsque les coûts des zones urbaines et rurales sont comparés, nous pouvons constater qu'il est beaucoup plus avantageux de déployer un réseau en zones urbaines. En effet, les coûts de mise en place d'un réseau FTTH P2P en zones urbaines sont moins élevés par client et ce dernier est couvert beaucoup plus rapidement.

En zones rurales, il y a beaucoup moins d'habitants, ou potentiels futurs abonnés aux services des fournisseurs de services, par kilomètres carrés ou par bâtiments, ce qui a pour conséquence des longueurs de réseaux d'accès beaucoup plus importantes, ce qui engendre un coût supplémentaire. En revanche, en zones urbaines, la concentration d'habitants par kilomètres carrés ou par bâtiments est plus importante, ce qui a comme conséquence, des longueurs de segments d'accès moins importantes.

Les concepteurs de réseaux, ont donc meilleur temps de déployer des réseaux en zones urbaines au détriment des zones rurales.

Il a été observé que la mise en place d'un réseau FTTH P2P engendre un CAPEX très élevé dans tous les cas. En revanche, un réseau d'accès FTTH P2P ne comprend pas d'équipements actifs, ce qui est un avantage. En effet, le fait qu'il n'y ait que des équipements passifs engendre un OPEX est beaucoup moins élevé, les frais du réseau d'accès seront plus vite remboursés.

La mise en place d'un réseau PLC, dans un bâtiment avec un appartement, permet de réduire les coûts du segment Inhouse. Cette solution peut être une alternative à court terme en attendant des travaux futurs dans le bâtiment afin de poser la fibre optique jusque dans l'appartement.

Un grand avantage de la mise en place d'un réseau PLC dans un bâtiment est le fait que les équipements PLC permettent de créer des accès WiFi et câblé n'importe où dans le bâtiment en plus du CPE qui dans la plupart de cas crée aussi un accès WiFi.

Ces coûts des différents segments d'accès d'un réseau FTTH P2P, en zones urbaines et rurales, sont une estimation, ils nous serviront de base pour la suite de l'analyse économique.

6.4 Coûts d'un réseau d'accès G.Fast

Le document Excel contenant les tableaux et graphiques, concernant cette partie, est disponible en annexe, sur le CD ou la Forge, sous le nom de "dufresne_bachelor_costGFast_130718.xlsx". Les coûts des équipements sont définis afin d'y calculer le coût des segments d'accès, le coût par client, le CAPEX, l'OPEX et le Business Case du réseau d'accès entier.

Les coûts d'un réseau d'accès G.Fast sont présentés, car cette méthode d'accès peut être intéressante. En effet, la mise en place d'un réseau d'accès FTTB associé à la technologie G.Fast permet d'atteindre des débits raisonnables, comme démontré dans la partie d'analyse technique, et permet de réduire considérablement les coûts du réseau d'accès. Les paires torsadées, permettant de mettre en place une méthode d'accès G.Fast, sont déjà existantes dans les bâtiments, les coûts du segment d'accès Inhouse sont donc considérablement réduits.

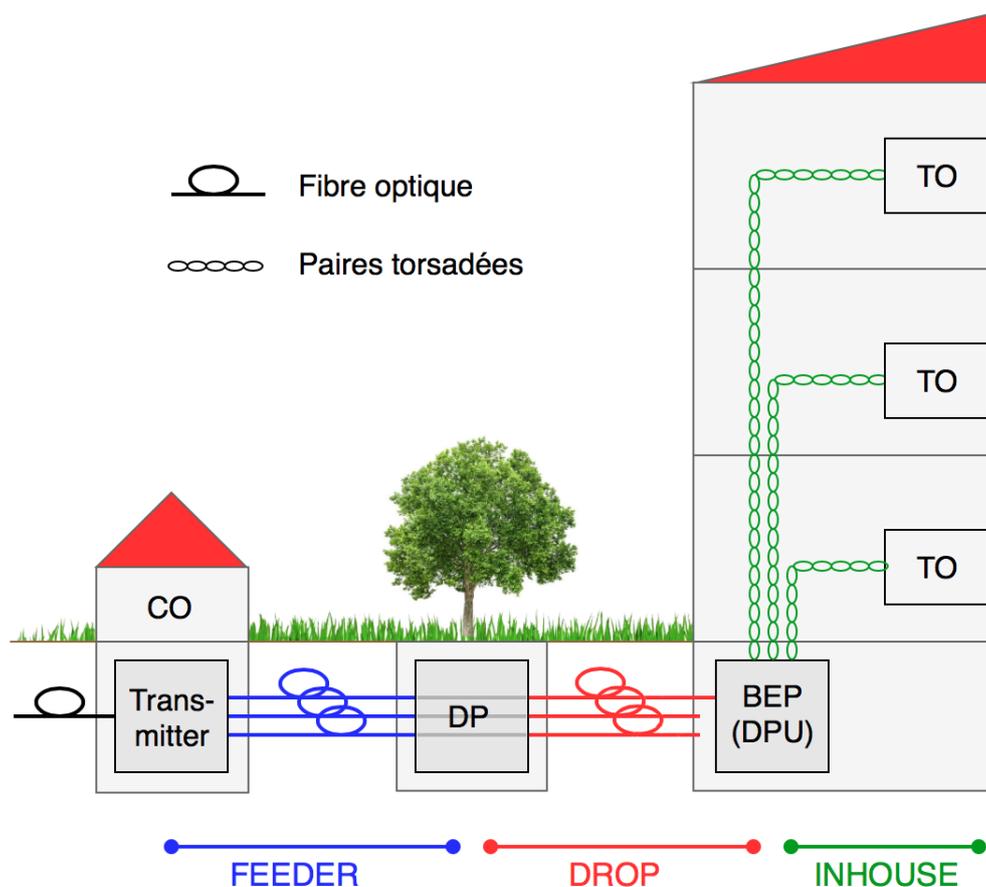


Figure 128 – Segments d'accès G.Fast

En se référant au précédent schéma, la fibre optique est tirée jusqu'au BEP du bâtiment (FTTB), au niveau du segment d'accès Inhouse, les coûts diminuent. En effet, les fibres optiques n'ont plus besoin d'être tirées jusque dans l'appartement et les paires torsadées déjà existantes sont utilisées pour acheminer le signal. En revanche, un nouvel équipement actif vient s'ajouter dans le segment d'accès Inhouse afin de mettre en place la technique G.Fast.

Cette technique est une alternative à court terme avant de passer à une solution FTTH lorsque les performances devront augmenter, ou lorsque des travaux sont prévus dans le bâtiment. Sur toute la totalité des segments Feeder et Drop, les fibres optiques sont tirées en mode FTTH P2P, mais une seule fibre optique par bâtiment est active, les autres fibres optiques sont en attente, ce qui permet aussi de diminuer les coûts au niveau des ports actifs dans les segments Feeder et Drop.

L'équipement actif permettant la mise en place du G.Fast, appelé DSLAM (Digital Subscriber Line Access Multiplexer), est placé dans le BEP du bâtiment, ce qui permet une accessibilité aisée et il est plus facile d'alimenter en électricité cet équipement actif, car il se trouve dans le bâtiment. En effet, si cet équipement se trouvait dans un DP, l'accessibilité en cas de maintenance serait plus délicate et des câbles électriques devraient être tirés. Autre point important, plus l'équipement actif réalisant la technique du G.Fast est proche du client final, plus le débit proposé est performant.

Le calcul des coûts de la mise en place d'un tel réseau d'accès est basé sur les spécifications et chiffres par zones présentés précédemment (point 6.1) et sur les coûts présentés pour un réseau d'accès FTTH P2P (point 6.2), ces coûts sont adaptés pour un réseau FTTB + G.Fast. Les hypothèses fixées restent les mêmes que pour un réseau FTTH P2P, afin d'avoir une comparaison financière finale concrète entre ces deux solutions.

Concernant l'OPEX, il faut prendre en compte les mêmes critères que ceux fixés pour un réseau FTTH P2P, mais les équipements actifs sont aussi à prendre en compte. En effet, les équipements passifs ne tombent que très rarement en panne, alors que les équipements actifs tombent plus souvent en panne, et il faut les remplacer. L'hypothèse que 5% de ces équipements doivent être remplacés par année est fixée, cette moyenne est calculée sur plusieurs années. 60'000 CHF d'OPEX par année est fixé pour un réseau FTTH P2P en zones urbaines et 20'000 CHF par année est fixé pour un réseau FTTH P2P en zones rurales.

6.4.1 CAPEX, OPEX et Business Case pour un réseau d'accès FTTB + G.Fast

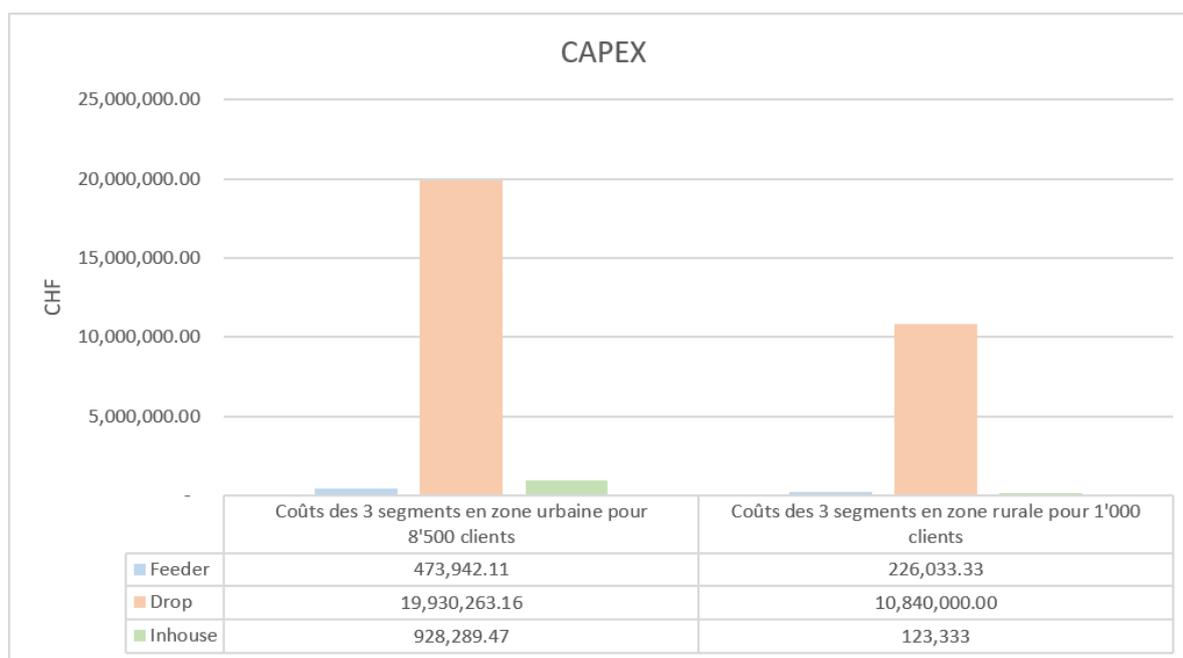


Figure 129 – CAPEX des réseaux d'accès FTTB + G.Fast en zones urbaines et rurales total

Le CAPEX total du déploiement de ce réseau d'accès FTTB + G.Fast en zones urbaines est de 21'332'495 CHF, contre 11'189'367 en zones rurales. Le Drop est encore une fois, le segment d'accès le plus coûteux à déployer à cause de sa longueur. En zones urbaines, le CAPEX total est, logiquement, le plus coûteux.

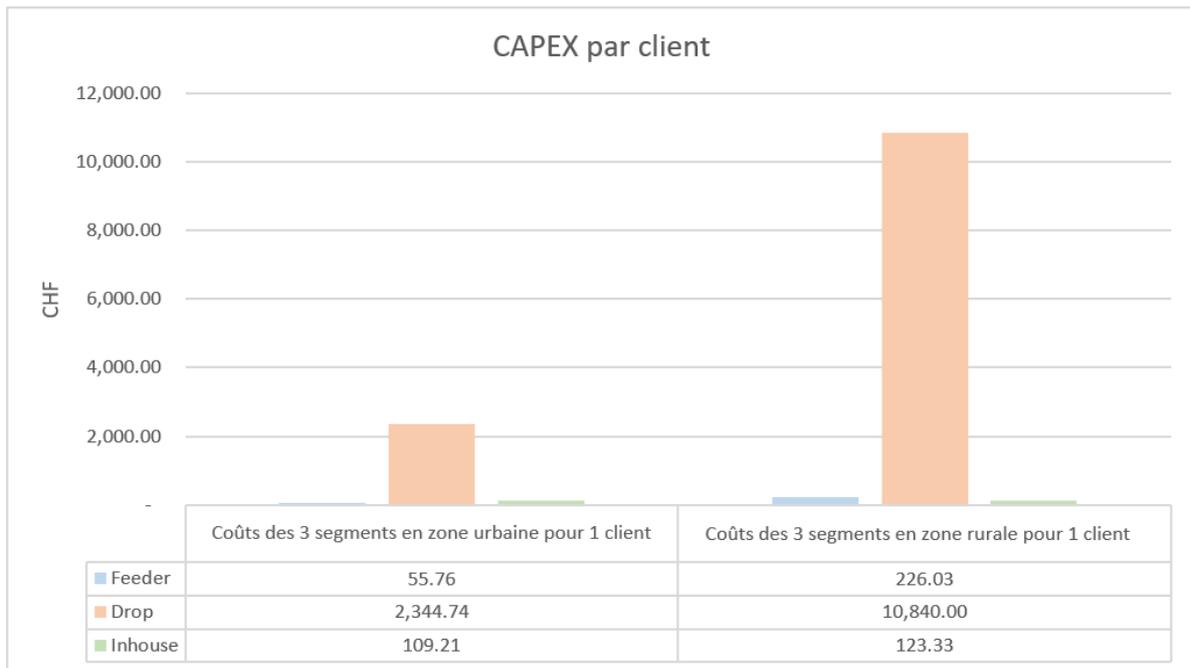


Figure 130 – CAPEX des réseaux d'accès FTTB + G.Fast en zones urbaines et rurales par client

Le CAPEX par client de ce réseau d'accès FTTB + G.Fast en zones urbaines est de 2'666 CHF, contre 11'302 CHF en zones rurales. En zones rurales, le CAPEX par client est beaucoup plus élevé, cette différence de coûts provient des longueurs de segments.

Concernant les Business Case des réseaux d'accès FTTB + G.Fast en zones urbaines et rurales, l'hypothèse que les 8'500 clients souscrivent un abonnement chez les fournisseurs de services est fixée, et que les 1'000 clients en zones rurales fassent de même est fixée. Au cours des années, le nombre d'abonnés supplémentaires n'est pas pris en compte, car l'analyse financière porte uniquement sur le réseau d'accès mis en place pour le nombre de clients de base. Il s'agit des mêmes hypothèses fixées qu'avec la présentation des Business Case d'un réseau d'accès FTTH P2P.

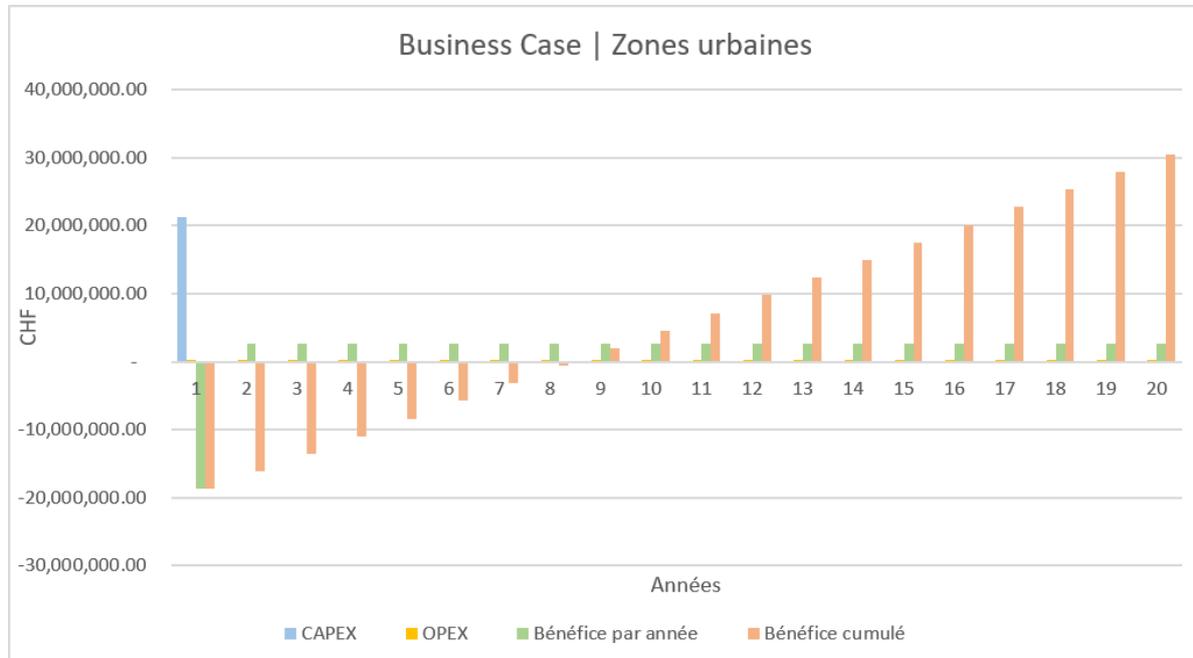


Figure 131 – Business Case d'un réseau FTTB + G.Fast en zones urbaines

D'après le Business Case, en zones urbaines, le réseau FTTB + G.Fast engendre un bénéfice après 9 ans. À noter que l'OPEX est tellement faible qu'il n'est pas visible sur le graphique. Après 50 ans, ce réseau d'accès FTTH P2P aura rapporté 108'267'506 CHF.

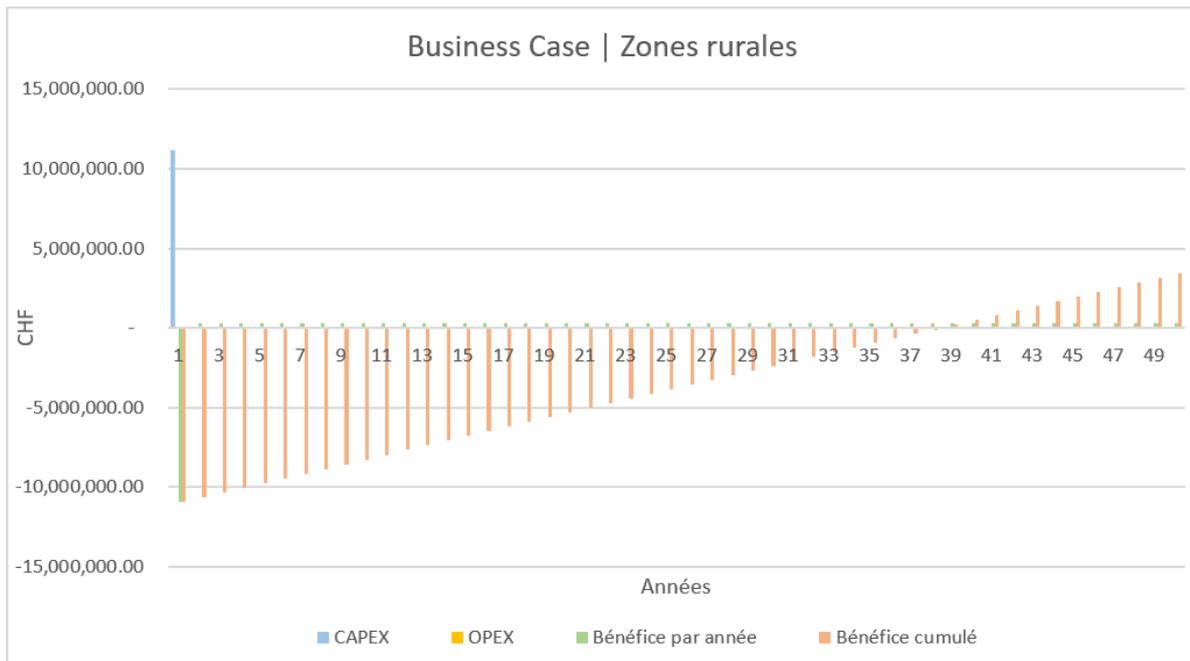


Figure 132 – Business Case d'un réseau FTTB + G.Fast en zones rurales

D'après le Business Case, en zones rurales, le réseau FTTH P2P engendre un bénéfice après 39 ans, et c'est le même nombre d'années qu'un réseau FTTH P2P. Après 50 ans, ce réseau d'accès FTTH P2P aura rapporté 3'410'633 CHF.

6.4.2 Synthèse

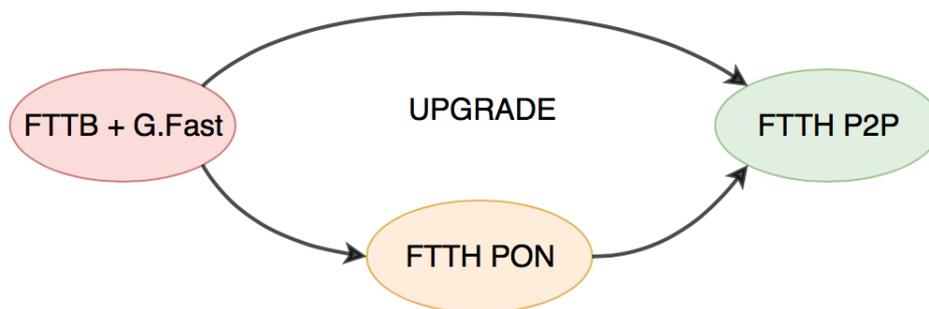
En comparaison avec le CAPEX total et par client d'un réseau d'accès FTTH P2P (figure 122 et 122), un réseau d'accès FTTB + G.Fast en zones urbaines est 21% meilleurs marchés et en zones rurales 6% meilleurs marchés.

Pour le segment Inhouse, cette réduction de coûts provient du fait qu'il n'y a plus besoin de tirer les fibres optiques dans les bâtiments. En effet, les équipements actifs permettant le G.Fast sont placés à l'introduction de la fibre dans les bâtiments (BEP) et le signal est distribué par les paires torsadées existantes vers les ménages. Les travaux dans les bâtiments sont énormément réduits.

Pour les segments Feeder et Drop, cette réduction de coûts, entre un réseau d'accès FTTB + G.Fast et FTTH P2P, provient principalement de la différence du nombre de ports actifs entre les deux types de réseaux dans le CO. En effet, pour un réseau d'accès FTTH P2P, un port actif par logements ou entreprises est compté, alors que pour un réseau d'accès FTTB + G.Fast, un port actif par bâtiment est compté. Au niveau du DP, les coûts sont réduits, car il y a beaucoup moins de connexion aux manchons.

En revanche, l'inconvénient avec un réseau d'accès FTTB + G.Fast, au niveau économique, est le fait que l'OPEX par année est beaucoup plus élevé. En effet, le l'OPEX, en zones urbaines, est 6 fois plus élevé que pour un réseau d'accès FTTH, et en zones rurales, il est 4% plus élevés. Cette différence provient des équipements actifs du réseau d'accès FTTB + G.Fast.

Ce réseau d'accès FTTB + G.Fast a été pensé pour être évolutif. En effet, les capacités au niveau des débits étant limitées, lorsque cette capacité n'est plus suffisante, ce réseau d'accès peut être transformé en réseau d'accès FTTH PON ou FTTH P2P.



Ce réseau d'accès FTTB + G.Fast peut être facilement transformé en réseau d'accès FTTH PON en plaçant des PON Splitter dans les BEP à la place des équipements actifs permettant le G.Fast, et en tirant des fibres optiques jusque dans les appartements, bien entendu, des travaux au niveau du segment d'accès Inhouse sont à prévoir. Le réseau d'accès FTTB + G.Fast peut aussi être transformé en réseau d'accès FTTH P2P, car les fibres optiques ont été posées en prévision dans réseau P2P, les fibres optiques étant déjà existantes, il ne reste plus qu'à les connecter aux ports actifs du CO et aux manchons des DP.

D'après une analyse réalisée par Juan Rendon, de la société Huawei, en moyenne, le coût d'une solution FTTB + G.Fast est 12,4% est moins élevé qu'une solution FTTH [7]. Des résultats plus ou moins semblables ont été atteints en comparant les coûts des réseaux d'accès précédents. Pour résumer, plus la fibre optique est loin de l'utilisateur final, moins le réseau d'accès est coûteux à déployer.

Avec la technologie G.Fast (FTTB et FTTS), la société Swisscom compte proposer un débit de 100 Mb/s pour 85% des ménages et commerces, en 2020. Ces débits pouvant atteindre jusqu'à 500 Mb/s.

6.5 Cas concret: liaison FSO entre Charmey et Cerniat

Cet exemple de liaison FSO (Free Space Optic) entre Charmey et Cerniat permet d'étudier les coûts et les avantages d'une telle réalisation. Avec cet exemple, dans un premier temps, uniquement les coûts au niveau du segment Feeder sont présentés, car seul ce segment est impacté par les choix des technologies d'accès, les segments Drop et Inhouse ne sont donc pas concernés. Et comme le montre le schéma suivant, une liaison entre un CO (Charmey) et un DP (Cerniat) est conceptualisée, ce qui correspond au segment Feeder.

Dans un second temps, une analyse économique avec Business Case est présentée afin de démontrer la rentabilité du projet avec les deux solutions abordées ci-dessous.

Il s'agit d'un exemple, les points cités et démontrés dans cette partie peuvent être reportés pour un autre lieu géographique.

Pour contextualiser cet exemple, voici un schéma:

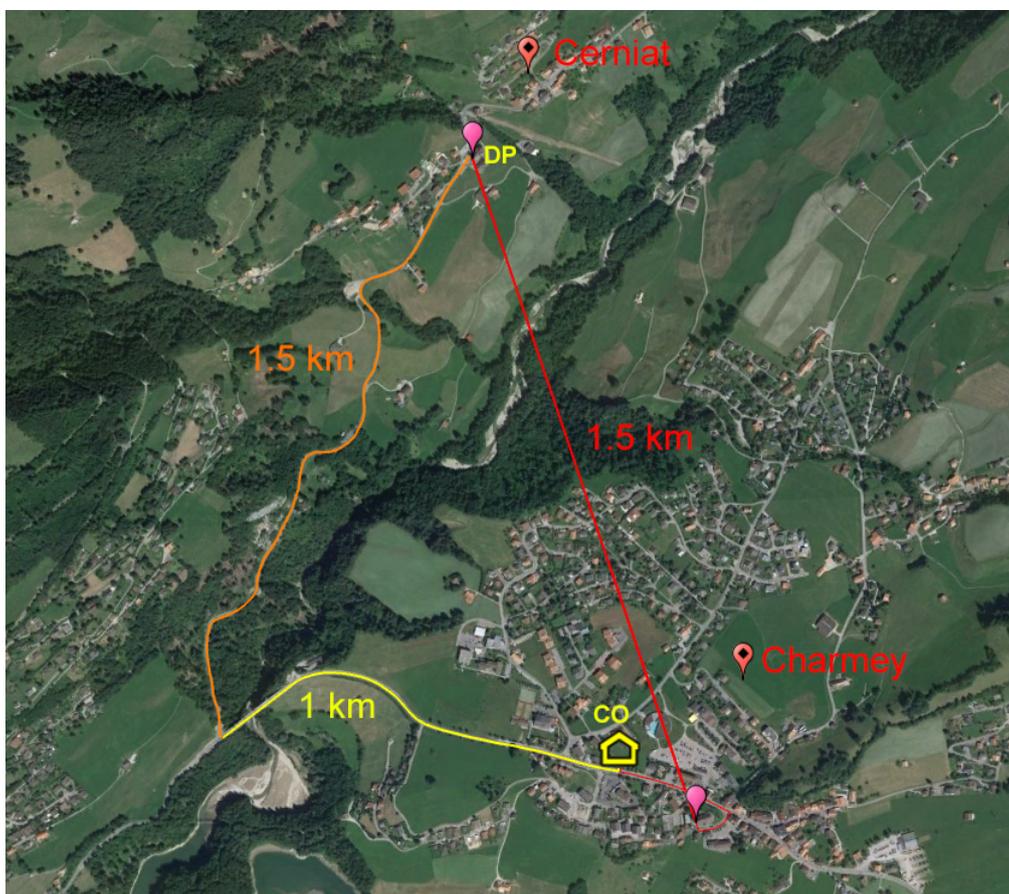


Figure 133 – Liaison câblée (fibrées) et FSO (Free Space Optic) entre Charmey et Cerniat

Les villages de Charmey et de Cerniat sont distants de 1.5 kilomètre à vol d'oiseau. Par la route, 2.5 kilomètre les séparent, dont 1 kilomètre sur une grande route cantonale et 1.5 kilomètre sur une petite route de montagnes.

Un CO est construit à Charmey afin de desservir toute la région en fibres optiques. Les villages de la vallée se trouvant au bord de la route cantonale (en jaune) (Châtel-sur-Montsalvens, Crésuz, Charmey, Im-Fang et Jaun) peuvent être assez facilement connectés, car les câbles de fibres optiques sont posés dans les canalisations électriques se trouvant sous la route cantonale. En revanche, le village de Cerniat est plus difficilement atteignable, car la route de montagnes (en orange) ne possède pas les canalisations adéquates pour accueillir les câbles de fibres optiques.

La commune de Cerniat compte 25 personnes intéressées par des services proposés avec la venue la fibre optique dans leurs appartements. Leur amener la fibre optique le plus rapidement est primordiale.

Creuser une tranchée de 1.5 kilomètre entre la route cantonale et le village de Cerniat a un certain coût. Cette route devant être refaite dans deux ans, il faudrait donc attendre deux ans afin de profiter d'y déposer les câbles lors des travaux, ce qui réduirait considérablement les coûts, mais le village doit être fibré le plus rapidement possible.

Il y a donc deux solutions possibles afin que le village de Cerniat soit fibré le plus rapidement possible, soit creuser cette tranchée de 1.5 kilomètre dans la route de montagnes, soit attendre ces deux ans pour déposer les câbles de fibres optiques lorsque la route sera en travaux et utiliser une alternative durant deux ans.

Une solution alternative à court terme intéressante est de mettre en place une liaison optique entre les villages de Charmey et Cerniat. En effet, avec des équipements FSO, une liaison de 30 Gb/s peut être assurée sur ces 1.5 kilomètre. Les 25 abonnés bénéficieront d'un débit symétrique de 1 Gb/s chacun. Puis, deux ans après, profiter de déposer les câbles de fibres optiques sous la route lors des travaux.

6.5.1 Liaison FTTH P2P

Pour la première solution, nous allons présenter les coûts d'une liaison fibrée entre Charmey et Cerniat FTTH P2P en creusant une tranchée dans la route de montagnes jusqu'à Cerniat. À noter que les équipements dans le CO (Charmey) et le DP (Cerniat) ne sont pas pris en compte, car dans tous les cas, ils restent les mêmes.

Un câble de 48 fibres optiques est posé entre le CO de Charmey et le DP de Cerniat afin d'assurer une connexion FTTH P2P aux habitants de la commune de Cerniat et fermes avoisinantes.

Câbles de fibres optiques		
Nombre de fibres	Longueur [m]	Prix (1.90 CHF/m) [CHF]
48	2'500	4'750

Pose des câbles de fibres optiques		
Méthode	Longueur [m]	Prix [CHF]
Dans les canalisations électriques (tirage et soufflage : 30 CHF/m)	1'000	30'000
Dans les tranchées (creusage, tirage et soufflage : 200 CHF/m)	1'500	300'000

Liaison FTTH P2P	Prix [CHF]
Charmey-Cerniat	334'750

Figure 134 – Coûts d'une liaison FTTH P2P entre le CO de Charmey et le DP de Cerniat

Les coûts d'une telle liaison entre le CO de Charmey et le DP de Cerniat sont de 334'750 CHF. Les travaux de génie civil étant la plus grosse part des coûts. À noter aussi que la mise en place de cette liaison câblée prend plusieurs mois avec les travaux.

6.5.2 Liaison FTTH (FSO)

Pour cette seconde solution, nous allons présenter, premièrement, les coûts de la mise en place d'une liaison FSO entre Charmey et Cerniat, puis deuxièmement, les coûts de la mise en place d'une liaison câblée entre ces deux villages en profitant des travaux réalisés sur la route de montagnes.

Pour rappel, 25 personnes sont intéressées à souscrire un service avec l'arrivée de la fibre optique sur la commune de Cerniat. Le fait de garantir un débit symétrique de 1 Gb/s pour ces abonnés est important.

Après contact avec Monsieur David Pehr, représentant de la société tchèque Eurocontracts, ce dernier nous assure qu'une liaison FSO est la meilleure solution pour économiser du temps et de l'argent. Cette entreprise vend des solutions FSO de haute qualité et de haute performance. Leur produit répondant le plus à nos attentes est l'équipement FSO offrant un débit symétrique de 30 Gb/s sur plusieurs kilomètres pour un coût de 45'900 \$.



Figure 135 – Équipements FSO proposés par la société tchèque Eurocontracts (débits symétriques de 30 Gb/s, jusqu'à 5 kilomètres, pour 45'900 \$), source: www.eurosro.cz

Cet équipement FSO offre les avantages suivants:

- Système très précis et fiable
- Stabilisation dans l'espace
- Faisceaux étroits avec une faible divergence
- Haute sécurité du canal optique sans fil
- Pas besoin d'obtenir des licences de fréquences
- Protection contre le rayonnement solaire
- Fiabilité dans des conditions climatiques extrêmes
- Suivi et management efficace via le réseau IP
- Installation rapide en 20 minutes et déploiement simple
- Transmission sur de longues distances, jusqu'à 7 kilomètres
- Haut débit symétrique, jusqu'à 40 Gb/s
- Faible taux d'erreur
- Immunité aux interférences électromagnétiques
- Protocole de communication transparent

Pour revenir à notre exemple, un déploiement rapide et simple est donc effectué avec cet équipement FSO afin de garantir une liaison haut débit pour le village de Cerniat et ces 25 habitants intéressés par un service.

Le terrain et les reliefs ont été analysés afin de confirmer qu'une liaison FSO est possible entre les deux villages sans obstacle pour le laser.



Figure 136 – Liaison FSO (Free Space Optic) entre Charmey et Cerniat avec analyse du relief

Les équipements FSO sont installés sur les clochers des églises de Charmey et Cerniat, entre les deux points, la vue est dégagée, il n'y a pas d'obstacles entre ces deux clochers.



Figure 137 – Églises de Charmey et Cerniat, source: www.randonnees-pedestres.ch)

Dans le CO de Charmey un routeur est installé afin de regrouper les fibres optiques en sortie des équipements actifs du CO vers l'équipement FSO à destination des abonnés de Cerniat. Du côté du DP de Cerniat, un routeur est aussi installé afin de repartir les flux en provenance de l'équipement FSO vers les fibres optiques à destination des abonnés.

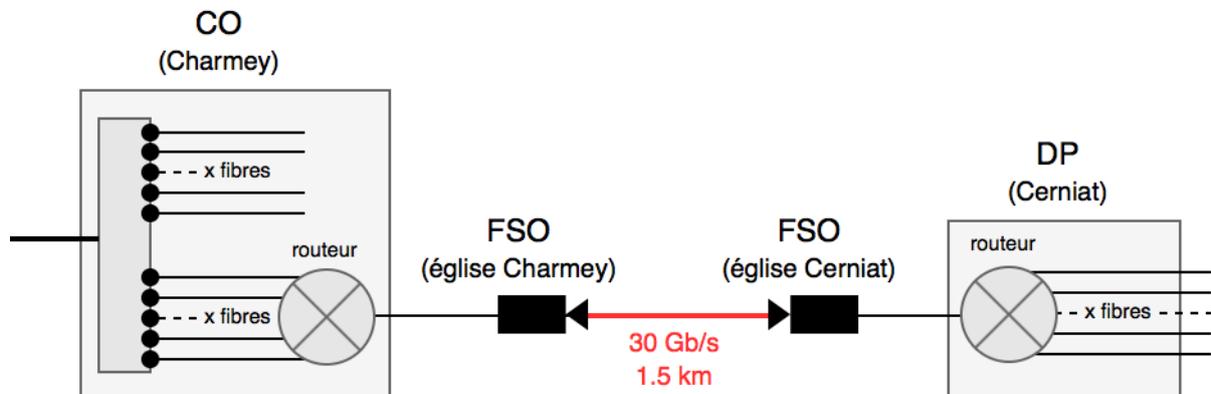


Figure 138 – Schéma physique de l'installation du réseau entre le CO de Charmey et le DP de Cerniat

Avec cette manière de faire, le CO et le DP sont prêts à la transition entre une liaison FSO et une liaison câblée entre Charmey et Cerniat, les x fibres optiques sont déjà en attente dans le CO et le DP pour la pose d'un câble entre les deux villages.

Au niveau des coûts de cette installation, il faut prendre en compte les équipements FSO, les deux routeurs et la pose d'une fibre optique jusque dans les deux clochers. Pour rappel, que les équipements dans le CO (Charmey) et le DP (Cerniat) ne sont pas pris en compte, car dans tous les cas, ils restent les mêmes.

Équipements FSO (Free Space Optic)		
Fournisseur	Capacité [Gb/s]	Prix [CHF]
Eurocontracts (CZ)	30	45'316

Routeurs		
Capacité [Gb/s]	Nombre de routeurs	Prix [CHF]
100	2	20'000

Divers coûts	
Installation	Prix [CHF]
Pose de la fibre optique jusqu'aux clochers et installation des équipements	5'000

Liaison FSO	Prix [CHF]
Charmey-Cerniat	70'316

Figure 139 – Coûts d'une liaison FSO entre le CO de Charmey et le DP de Cerniat

Les coûts d'une telle liaison entre le CO de Charmey et le DP de Cerniat sont de 70'316 CHF. Cette solution à court terme permet d'assurer la liaison entre les deux villages, en attendant la pose d'une liaison câblée.

Cette solution FSO assure une connexion fibrée et de hauts débits aux abonnés du village de Cerniat. Le déploiement de cette solution est très rapide, en quelques jours ce réseau est opérationnel, contrairement à la première solution. La première solution qui consistait à creuser une tranchée sur 1.5 kilomètre, le long de la route de montagnes, est très coûteuse et peut prendre plusieurs mois avant que le réseau soit opérationnel.

Il était préférable d'attendre que la route soit refaite, afin d'en profiter pour placer les câbles de fibres optiques dans les tranchées. En supposant que cette route doit être refaite dans deux ans, en attendant, cette solution FSO est une bonne alternative. Les coûts de la mise en place d'une connexion fibrée, en profitant des travaux sur la route, sont maintenant analysés.

Câbles de fibres optiques		
Nombre de fibres	Longueur [m]	Prix [CHF]
48 fibres	2'500	4'750

Pose des câbles de fibres optiques		
Capacité [Gb/s]	Longueur [m]	Prix [CHF]
Dans les canalisations électriques (tirage et soufflage : 30 CHF/m)	2'500	75'000

Liaison FTTH P2P	Prix [CHF]
Charmey-Cerniat	79'750

Figure 140 – Coûts d'une liaison FTTH P2P entre le CO de Charmey et le DP de Cerniat en profitant des travaux de la route de montagnes

En profitant des travaux de la route de montagnes pour poser les câbles de fibres optiques, les coûts sont extrêmement réduits. Nous passons de 334'750 CHF à 150'066 CHF.

6.5.3 Coûts de la liaison pour les deux solutions

Pour résumer, dans tous les cas vus précédemment, un débit symétrique de 1 Gb/s est assuré pour les abonnés du village de Cerniat. Pour la première solution qui permet de mettre en place un câble de fibres optiques entre le CO de Charmey et le DP de Cerniat, le déploiement peut durer plusieurs mois et les coûts de génie civil sont extrêmement élevés, environ 334'750 CHF. Pour la seconde solution, une liaison FSO est mise en place à court terme en quelques jours, et deux ans plus tard lorsque la route de montagnes est refaite, les câbles de fibres optiques sont posés entre le CO de Charmey et le DP de Cerniat, les coûts sont nettement réduits, 150'066 CHF.

Mise en place d'une connexion Charmey-Cerniat		
Solution 1	Solution 2	
Liaison fibrée FTTH P2P dès le départ	Liaison FSO dans un premier temps	2 ans après, liaison fibrée FTTH P2P
334'750 CHF	70'316 CHF	79'750 CHF
	150'066 CHF	

Figure 141 – Comparaison des coûts entre les deux solutions

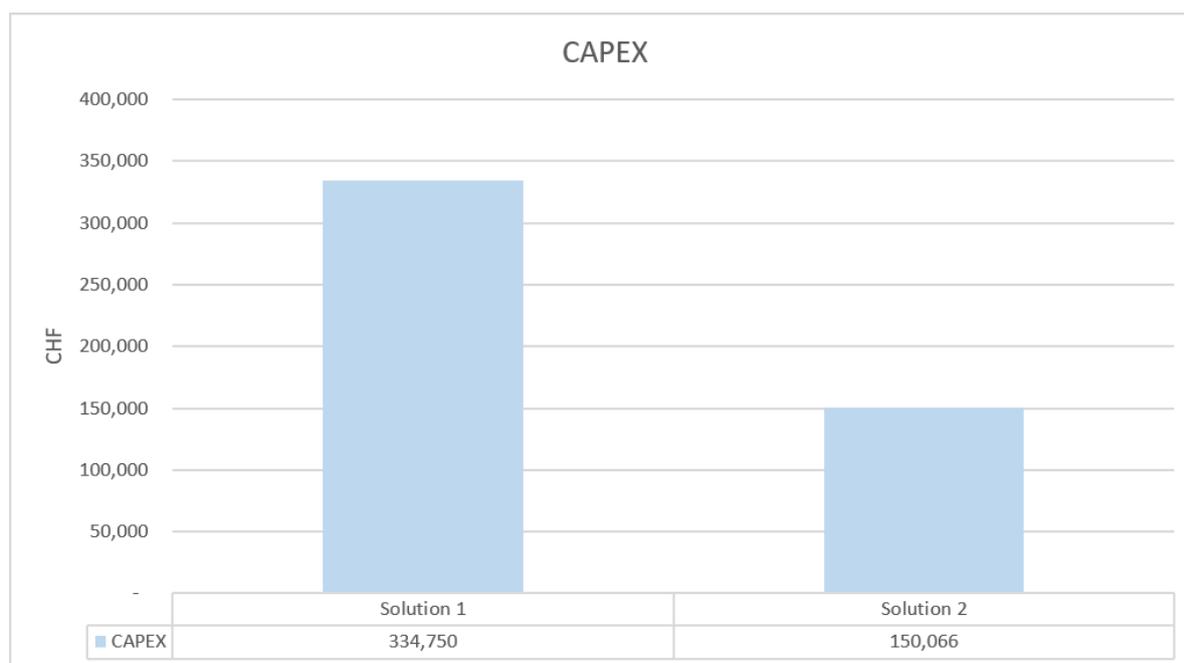


Figure 142 – CAPEX des deux solutions concernant uniquement la liaison entre Charmey et Cerniat

Le CAPEX des deux solutions est calculé en fonction des coûts précédemment obtenus. Le CAPEX présenté ci-dessus ne prend pas en compte les segmentations d'accès Drop et Inhouse, car dans les deux solutions, leurs coûts sont semblables. Il n'y a que les coûts de la liaison entre Charmey et Cerniat, les coûts des équipements du CO et du DP ne sont pas pris en compte.

Entre la première et la seconde solution, les coûts sont réduits de 184'684 CHF. Cette réduction est énorme pour, au final, avoir le même résultat, dans tous les cas, deux ans après, le village de Cerniat bénéficie d'une connexion fibrée P2P. En plus, avec la solution FSO, le réseau est plus rapidement déployé et opérationnel.

Un point intéressant est le fait que, pendant les deux ans, avec la solution alternative FSO, les fournisseurs d'accès louent les lignes pour les 25 abonnés aux services, ce qui crée une entrée d'argent assez rapidement vu que la mise en place d'un réseau FSO est réalisée en quelques jours. Admettons qu'une fibre optique est louée 26 CHF aux fournisseurs de services.

Location des fibres optiques Charmey-Cerniat (26 CHF/fibre/mois)		
Nombre des fibres	Temps [mois]	Prix [CHF]
25	24	15'600

Figure 143 – Revenu sur la location des fibres optiques sur 2 ans

Ces 15'600 CHF encaissés sur les deux ans, avec la solution à FSO mise en place, permettent de couvrir une partie des frais de la seconde étape où le câble de fibres optiques est mis en place entre Cerniat et Charmey.

Un autre point intéressant est que les équipements FSO et les routeurs sont achetés une seule fois et ils peuvent, ensuite, être réutilisés pour d'autres cas similaires à différents endroits. Donc économiquement parlant, c'est très intéressant, une première solution FSO à court terme et à coûts réduits permet une entrée d'argent pour, ensuite, financer la mise en place d'une connexion entièrement câblée, dans un second temps.

Comme nous l'a dit Monsieur David Pehr, représentant de la société tchèque Eurocontracts, la mise en place d'une solution FSO permet d'importantes économies et un gain de temps énormes.

6.5.4 Coûts du réseau d'accès total pour les deux solutions

Le fichier Excel contenant les tableaux et graphiques concernant cette partie est disponible en annexe sous le nom de "dufresne_bachelor_costCharmeyCerniat_130718.xlsx". Les coûts des segments d'accès sont définis afin d'y calculer le CAPEX, l'OPEX et le Business Case du réseau d'accès entier.

Ce point permet de présenter le CAPEX, l'OPEX et le Business Case du réseau d'accès total (Feeder, Drop et Inhouse) pour les deux solutions abordées ci-dessus, afin de définir quand le réseau d'accès fibré Charmey-Cerniat sera couvert et rapportera un bénéfice. Comme déjà cité, pour les deux solutions étudiées, les coûts des segments Drop et Inhouse restent les mêmes.

Pour le CAPEX total, les coûts des segments Drop et Inhouse, par client, sont repris de l'analyse technique réalisée pour un réseau FTTH P2P dans une zone rurale, et calculés pour 25 abonnés. Les coûts du CO et du DP sont ajoutés aux coûts calculés précédemment. Veuillez vous référer au point 6.3.2.

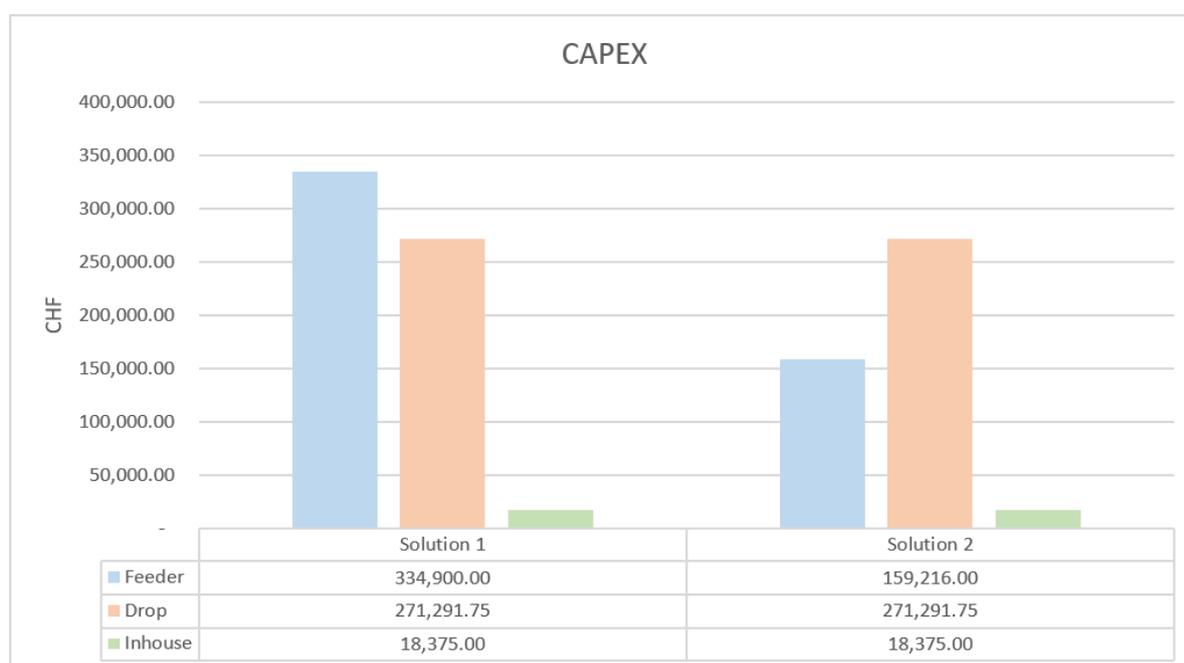


Figure 144 – CAPEX du réseau d'accès total des deux solutions

Les dépenses d'investissement des segments d'accès Drop et Inhouse sont identiques pour les deux solutions. Les technologies d'accès et le coût des travaux de génie civil varient pour le segment d'accès, comme nous l'avons déjà vu, la première solution est beaucoup plus coûteuse que la seconde solution.

Au total, pour la mise en place de ce réseau d'accès, les coûts sont de 624'567 CHF pour la première solution, contre 448'883 CHF pour la seconde solution.

Pour l'OPEX, nous comptons pour les deux solutions 150 CHF par année afin de couvrir les frais de maintenance et des consommations en électricité des équipements.

Pour créer le Business Case, les CAPEX et OPEX sont repris. Pour le revenu par année, les 25 fibres optiques sont louées au fournisseur de services, la location d'une ligne est fixée à 26 CHF par mois. Nous définissons que ces 25 abonnés n'augmentent pas durant les années, car cela engendrerait de nouveaux coûts au niveau des investissements. Le Business Case est donc réalisé en fonction de 25 abonnés fixes.

Solution 1

Ci-dessous, le Business Case pour la première solution sur 100 ans. Le Business Case est disponible en annexe, sur le CD ou la Forge, dans le document Excel "dufresne_bachelor_costCharmeyCerniat_130718.xlsx" pour une lecture plus fluide.

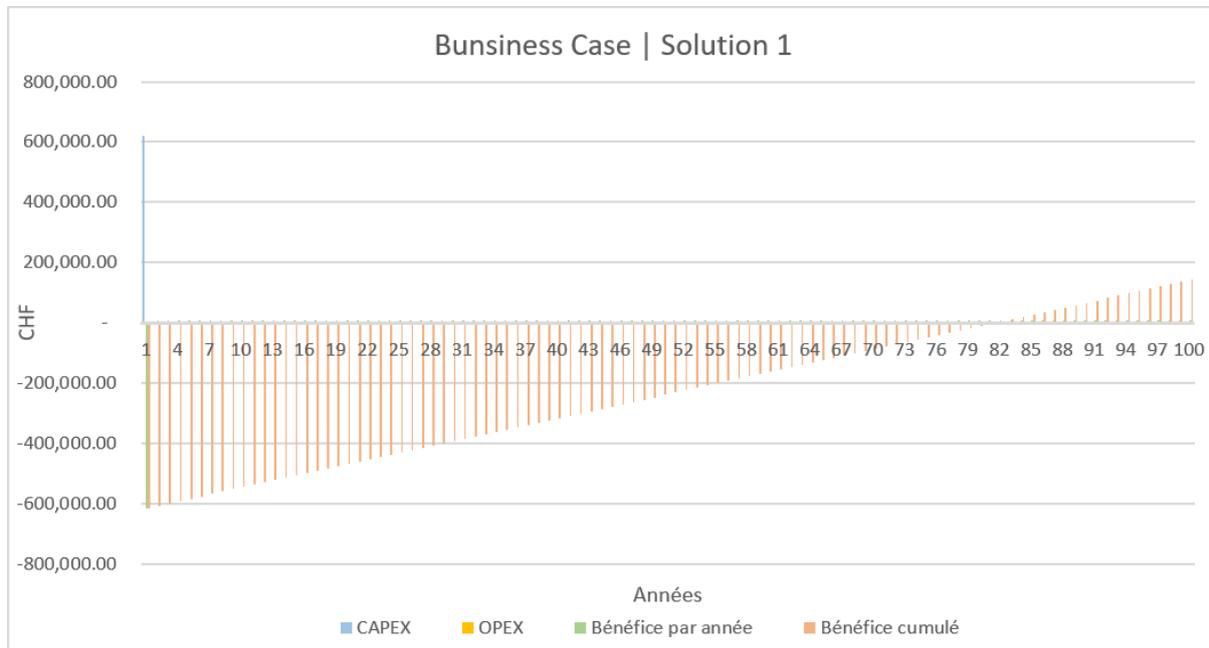


Figure 145 – Business Case de la première solution

En définissant le Business Case avec le CAPEX, l'OPEX et le bénéfice pour chacune des années, le bénéfice cumulé est calculé. Avec cette première solution, le bénéfice cumulé devient positif après 82 ans. Après 100 ans, ce réseau aura engendré 143'000 CHF de bénéfice.

Il faut donc 82 ans pour couvrir les frais d'investissement et d'exploitation de ce réseau fibré entre Charmey et Cerniat en optant directement par une solution câblée, les coûts de génie civil étant très élevés. Après 82 ans, ce réseau d'accès rapporte enfin du bénéfice.

Solution 2

Ci-dessous, le Business Case pour la seconde solution sur 100 ans. Le Business Case est disponible en annexe, sur le CD ou la Forge, dans le document Excel "dufresne_bachelor_costCharmeyCerniat_130718.xlsx" pour une lecture plus fluide.

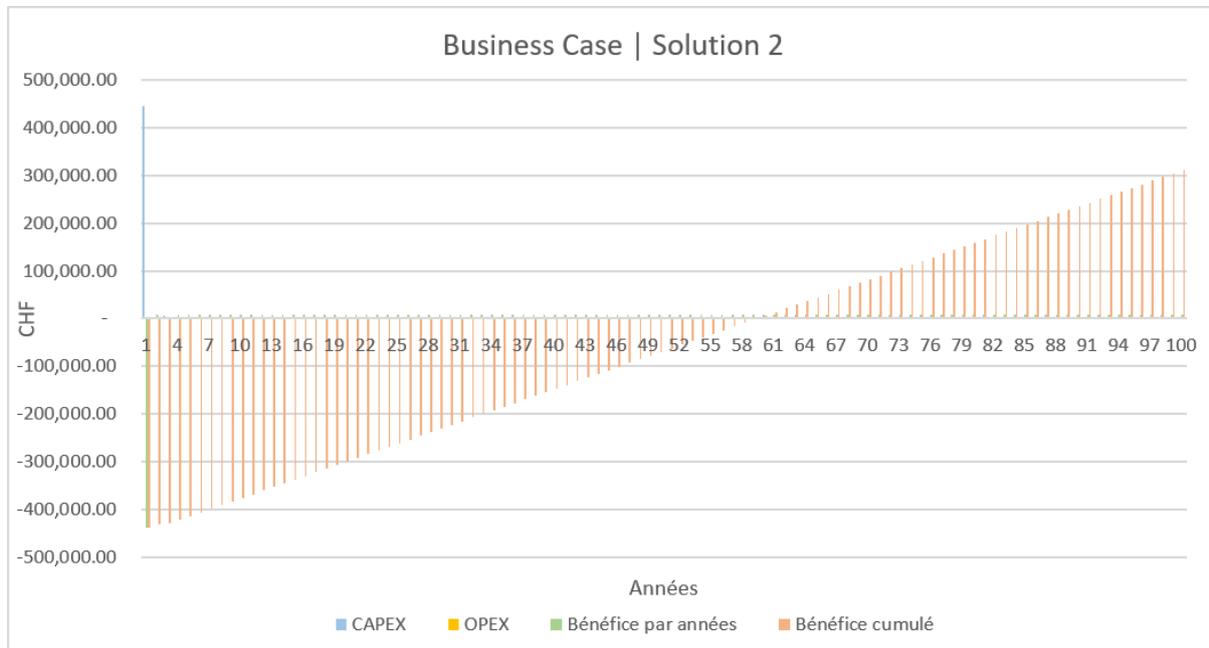


Figure 146 – Business Case de la seconde solution

En définissant le Business Case avec le CAPEX, l'OPEX et le bénéfice pour chacune des années, le bénéfice cumulé est calculé. Avec cette seconde solution, le bénéfice cumulé devient positif après 60 ans. Après 100 ans, ce réseau aura engendré 313'000 CHF de bénéfice.

Il faut donc 60 ans pour couvrir les frais d'investissement et d'exploitation de ce réseau fibré entre Charmey et Cerniat en optant durant les deux premières années pour une solution FSO, puis, après deux ans, par une solution câblée en profitant des travaux pour la pose des câbles de fibres optiques. Les coûts de génie civil sont drastiquement réduits. En comparant avec la première solution, ce réseau d'accès rapporte du bénéfice 20 ans plus vite, qui n'est pas négligeable et surtout pour un résultat final identique entre les deux solutions.

À noter qu'au début du Business Case, les coûts d'investissement des équipements FSO sont comptabilisés, et lors de la seconde année, les coûts de la pose de la liaison câblée, entre les deux villages, sont comptabilisés.

Lors de la réutilisation des équipements FSO, dans un cas similaire, ce frais d'investissement ne sera plus comptabilisé ce qui rendra le réseau d'accès rentable beaucoup plus rapidement.

6.6 Cas concret: Smartmetering en ville de Zurich

Un compteur intelligent ou Smartmeter est un compteur énergétique permettant au propriétaire de suivre en temps réel et en détail la consommation électrique dans son bâtiment. Les informations sont collectées et transmises aux gestionnaires de réseaux électriques. Ce concept peut aussi être appliqué dans d'autres domaines comme suivre la consommation de gaz ou d'eau.

Le fait de suivre la consommation électrique en temps réel, grâce aux compteurs intelligents, permet de connaître la consommation électrique afin de faire des économies, et permet la facturation de l'énergie en temps réel ou en différé en fonction de la demande en électricité et des pics de consommation. Cette technologie transforme les réseaux de distribution électriques classiques en réseaux intelligents (Smartgrids).

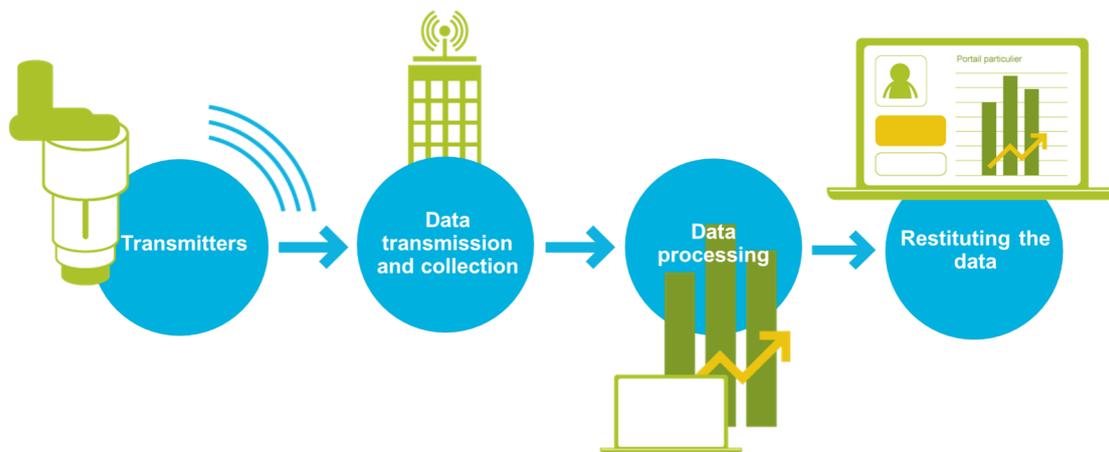


Figure 147 – Processus Smartmetering, source: www.ondeosystems.com

En février 2011, la société Realstone SA est la première société à mettre en place le Smartmetering en Suisse. Ce concept novateur a pour but de réduire la consommation énergétique d'un bâtiment de 10 à 15%.

"Le Smartmetering fait partie intégrante du premier volet de la stratégie énergétique 2050 acceptée par le peuple suisse le 21 mai 2017. À ce titre, de grands défis attendent les gestionnaires de réseaux électriques qui devront remplacer ces prochaines années l'ensemble de leurs compteurs par des compteurs communicants dits intelligents" [8].

La confidentialité des données est le point sensible avec le Smartmetering. En effet, les données transmises par les compteurs intelligents permettent de connaître, précisément, consommation et autres détails dans chaque pièce d'une habitation.

La société EWZ (Elektrizitätswerk der Stadt Zurich) est responsable de l'alimentation en électricité de la ville de Zurich, depuis sa fondation en 1890. À Zurich, une loi rendant obligatoire le Smartmetering, la société EWZ a dû mettre en place ce concept pour plus de 40'000 bâtiments en ville de Zurich. Les coûts n'étant pas négligeables, la société EWZ a dû analyser et concevoir son réseau de transmissions de données en cherchant des solutions afin de réduire ces coûts.



La société EWZ possédant déjà son réseau de fibres optiques dans la ville de Zurich, cette dernière a mis en place son réseau Smartmetering avec les fibres optiques de réserves afin de créer un réseau de transmissions de données Smartmetering indépendant du réseau Internet. Dans le but d'économiser au maximum les coûts, elle crée un réseau Smartmetering avec la technologie d'accès FTTH PON.

Les fibres optiques étant déjà existantes, les coûts à prendre en compte sont les équipements actifs et passifs. pour le CAPEX et la consommation d'électricité des équipements actifs pour l'OPEX.

Pour la mise en place d'un tel réseau Smartmetering desservant 40'000 bâtiments à Zurich, nous comparons sa mise en place avec une technologie d'accès FTTH P2P, puis avec une technologie d'accès FTTH PON. Ces deux comparaisons permettent d'analyser les coûts de réalisation de ces deux solutions pour la société EWZ, et définir quelle est la meilleure solution. Avant d'analyser ces deux solutions, nous définissons les capacités requises du réseau afin que le Smartmetering soit mis en place pour 40'000 bâtiments.

6.6.1 Volume de données

La société EWZ a à disposition 15 CO et son réseau de fibres optiques existant pour les 40'000 bâtiments de la ville de Zurich.

CO et bâtiments en ville de Zurich	
CO	Bâtiments
15	40'000
1	2'667

Figure 148 – Nombre de bâtiments par CO à desservir par Smartmetering

Le nombre de bâtiments à desservir par Smartmetering est réparti équitablement entre les 15 CO, ce qui donne 2'667 bâtiments par CO.

Nous partons dans l'optique que le Smartmetering récolte, pour un bâtiment, 50 kilo-octets à intervalle de 15 minutes.

Volume de données			
Bâtiments	CO	Données [Gb]	Intervalle [min]
1		0.0004	15
40'000	15	16	15
2'667	1	1.06	15

Bâtiments	CO	Données [Gb]	Intervalle [min]
1		0.00002	1
40'000	15	1.06	1
2'667	1	0.07	1

Bâtiments	CO	Débit [Mb/s]
1		0.0004
40'000	15	17.7
2'667	1	1.17

Figure 149 – Volume de données et débit par bâtiments et par CO

Un bâtiment sur le réseau Smartmetering génère 0.4 kb/s de données. Le trafic total pour les 40'000 bâtiments de la ville de Zurich génère 17.7 Mb/s de données, et pour un CO et ces 2'667 bâtiments, le trafic généré est de 1.17 Mb/s.

6.6.2 Réseau FTTH P2P

Mettre en place un réseau Smartmetering pour les 40'000 bâtiments de la ville de Zurich avec une technologie d'accès FTTH P2P à pour conséquence la mise en place de 40'000 ports actifs répartis dans les 15 CO à disposition. Chacun des CO dispose de plusieurs Rack contenant chacun 500 ports actifs.

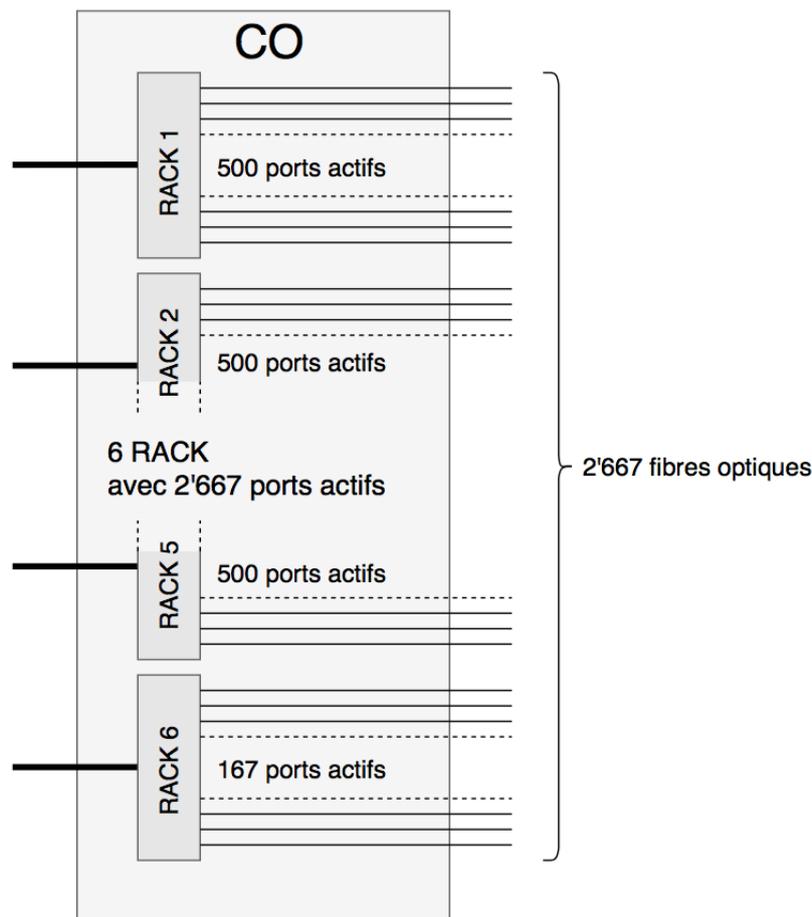


Figure 150 – Schéma d'un CO du réseau Smartmetering en mode FTTH P2P

Pour un CO, comme le montre le schéma ci-dessus, il y a 2'667 ports actifs, répartis sur 6 Rack. 5 Rack contenant 500 ports chacun et le dernier Rack contenant 167 ports actifs. Sans ajouter de Rack, par CO, il y a 333 ports actifs de réserve.

Avec cette manière de faire les 15 CO desservent bien les 40'000 bâtiments de la ville de Zurich pour le Smartmetering. Les 1.17 Mb/s générés par les 40'000 bâtiments peuvent être largement absorbés par le réseau FTTH P2P et ces 15 CO. Chacune des fibres optiques absorbe un débit de 0.4 kb/s en admettant qu'il soit constant. Avec ce système FTTH P2P le réseau est indépendant du reste du réseau Internet, la confidentialité et la sécurité y sont garanties.

Pour les coûts des équipements, seulement les ports actifs sont à prendre en compte, le réseau de fibres optiques et les CO étant déjà existants. Le coût du port actif est de 30 CHF, ce coût prend en compte le part du coût de l'équipement actif ou Rack pour ce port.

Prix des équipements			
Ports actifs	CO	Rack	Prix [CHF]
1			30
500		1	15'000
2'667	1	6	80'010
40'000	15	90	1'200'000

Smartmetering pour 40'000 bâtiments en FTTH P2P	Prix [CHF]
Prix total des équipements	1'200'000

Figure 151 – Coût total des équipements actifs

Le coût total d'une mise en place d'un réseau Smartmetering pour les 40'000 bâtiments de la ville de Zurich en mode FTTH P2P est de 1'200'000 CHF.

La consommation annuelle en électricité et son coût vont être calculés pour ce réseau Smartmetering en mode FTTH P2P. Nous partons dans l'optique qu'un port actif en FTTH P2P a besoin d'une puissance de 0.5 W toute l'année.

Consommation et coûts annuels des 40'000 ports actifs					
Ports actifs	Heures / jour	Jours / an	Puissance [W]	Consommation annuelle [kWh]	Coût annuel (0.15 CHF / kWh) [CHF]
1	24	365	0.5	4.38	0.657
40'000	24	365	20'000	175'200	26'280

Figure 152 – Coût et consommation annuelle des ports actifs en mode FTTH P2P

La consommation annuelle [kWh] est calculée ainsi: "Heures / jour" * "Jour / an" * ("Puissance [W]" / 1000), cette consommation annuelle est multipliée par le prix du kWh, ce qui donne le coût annuel.

La consommation annuelle du réseau Smartmetering construit en FTTH P2P est de 175'200 kWh et son coût annuel est de 26'280 CHF.

6.6.3 Réseau FTTH PON

Mettre en place un réseau Smartmetering pour les 40'000 bâtiments de la ville de Zurich avec une technologie d'accès FTTH PON réduit considérablement le nombre de ports actifs répartis dans les 15 CO à disposition.

Des PON Splitter de 256 ports passifs sont utilisés sur chacun des ports actifs sortant des Rack des 15 CO. Avec 256 ports passifs par PON Splitter, le nombre de ports actifs passe de 500 à 11 par CO et des 400'000 à 165 pour l'ensemble du réseau Smartmetering. Par CO, il a donc plus qu'un seul Rack contenant 11 ports actifs.

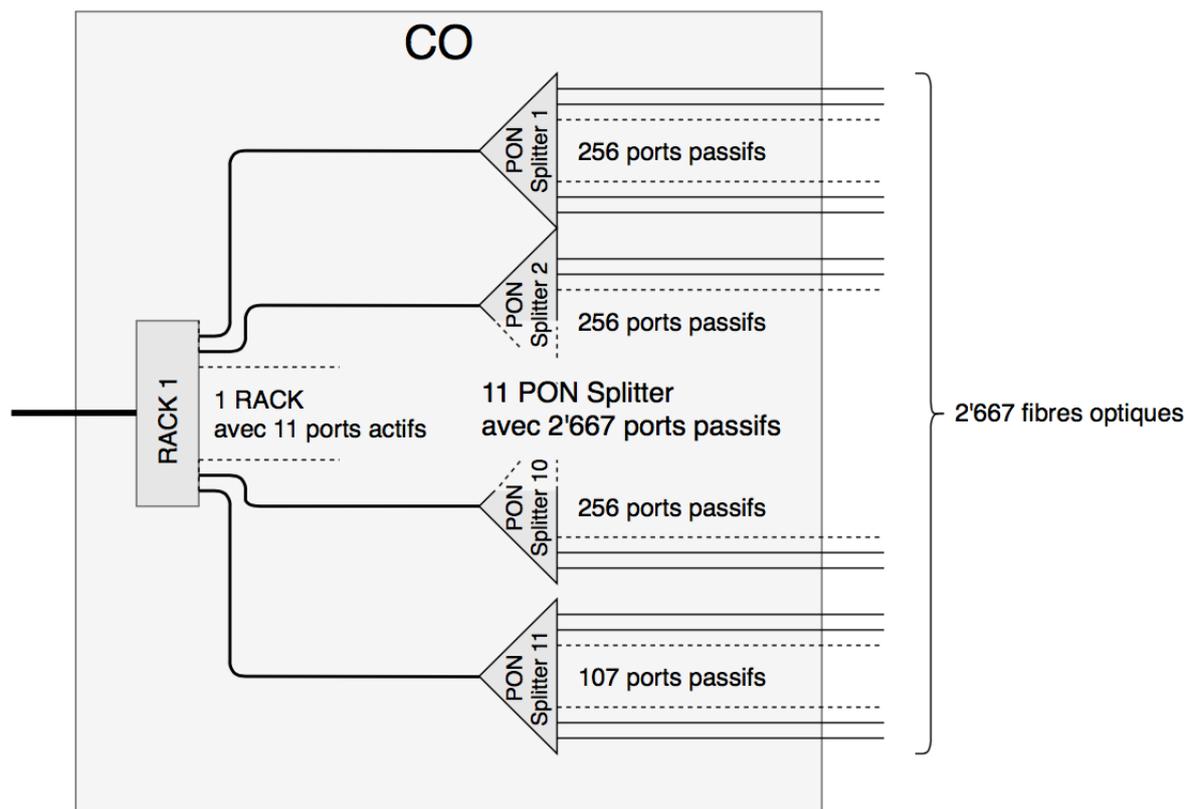


Figure 153 – Schéma d'un CO du réseau Smartmetering en mode FTTH PON

Pour un CO, comme le montre le schéma ci-dessus, il y a 11 ports actifs répartis sur 1 Rack. 11 Pon Splitter sont connectés à ces 11 ports actifs. 10 des PON Splitter contiennent 256 ports passifs et le dernier PON Splitter contient 107 ports passifs. Sans ajouter de Rack, de ports actifs ou des PON Splitter, par CO, il y a 149 ports passifs de réserve.

Le fait de placer les PON Splitter directement dans les CO facilite la maintenance des équipements. Les fibres optiques étant existantes, il est plus simple de les placer directement dans les CO.

Avec cette manière de faire, les 15 CO desservent bien les 40'000 bâtiments de la ville de Zurich pour le Smartmetering. Les fibres optiques placées entre les équipements actifs et les équipements passifs doivent supporter le trafic Smartmetering de 256 bâtiments, ce qui fait 102.4 kb/s en admettant que le débit soit constant, ce débit est largement absorbé pour ces fibres optiques. Avec ce système FTTH PON, le réseau est indépendant du reste du réseau Internet, la confidentialité et la sécurité y sont aussi garanties.

Pour les coûts des équipements, il faut prendre en compte les ports actifs les équipements passifs PON Splitter, le réseau de fibres optiques et les CO étant déjà existant. Le coût du port actif est de 80 CHF, car ils doivent avoir une plus grande capacité, ce coût prend en compte la part du coût de l'équipement actif ou Rack pour ce port. Le coût d'un PON Splitter (1:256) est estimé à 20 CHF, connecteurs compris.

Prix des équipements			
Ports actifs	CO	Rack	Prix [CHF]
1			80
11	1	1	880
165	15	15	13'200

PON Splitter	CO	Ports passifs	Prix [CHF]
1		256	20
11	1	2'667	220
165	15	40'000	3'300

Smartmetering pour 40'000 bâtiments en FTTH PON	Prix [CHF]
Prix total des équipements	16'500

Figure 154 – Coût total des équipements actifs et passifs

Le coût total d'une mise en place d'un réseau Smartmetering pour les 40'000 bâtiments de la ville de Zurich en mode FTTH PON est de 16'500 CHF.

La consommation annuelle en électricité et son coût vont être calculés pour ce réseau Smartmetering en mode FTTH PON. Nous partons dans l'optique qu'un port actif en FTTH PON a besoin d'une puissance de 1 W toute l'année.

Consommation et coûts annuels des 165 ports actifs					
Ports actifs	Heures / jour	Jours / an	Puissance [W]	Consommation annuelle [kWh]	Coût annuel (0.15 CHF / kWh) [CHF]
1	24	365	1	8.76	1.314
165	24	365	165	1'445.4	216.81

Figure 155 – Coût et consommation annuelle des ports actifs en mode FTTH PON

La consommation annuelle du réseau Smartmetering construit en FTTH PON est de 1'445.4 kWh et son coût annuel est de 216.81 CHF.

6.6.4 Coûts du réseau Smartmetering

Cette synthèse permet de comparer les deux solutions de mise en place d'un réseau Smartmetering en ville de Zurich afin de desservir ces 40'000 bâtiments. Les dépenses d'investissements (CAPEX) et les dépenses d'exploitation (OPEX) sont comparées entre ces réseaux FTTH P2P et FTTH PON.

Le document Excel contenant les tableaux et graphiques concernant cette partie est disponible en annexe, sur le CD ou la Forge, sous le nom de "dufresne_bachelor_costSmartmeteringZurich_130718.xlsx". Les coûts des segments d'accès sont définis afin d'y calculer le CAPEX, l'OPEX et le Business Case du réseau d'accès entier.

Pour le CAPEX, les coûts des équipements actifs et passifs ont été repris.

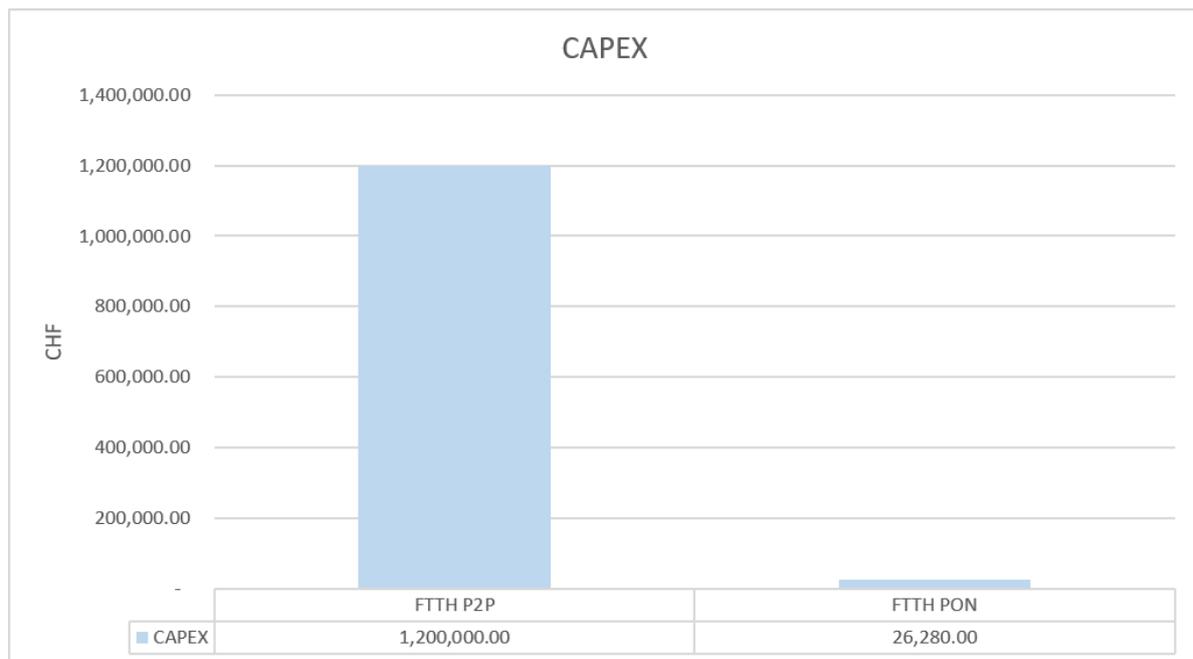


Figure 156 – CAPEX de la mise en place d'un réseau Smartmetering en mode FTTH P2P et FTTH PON pour 40'000 bâtiments

Entre une technologie d'accès FTTH P2P et une technologie d'accès FTTH PON, la différence des dépenses d'investissements est énorme. Le CAPEX d'un réseau Smartmetering en mode FTTH PON est beaucoup moins coûteux, cette différence de coûts provient essentiellement de la différence du nombre de ports actifs entre les deux technologies d'accès.

Pour l'OPEX, les coûts proviennent essentiellement de la consommation d'électricité des éléments actifs.

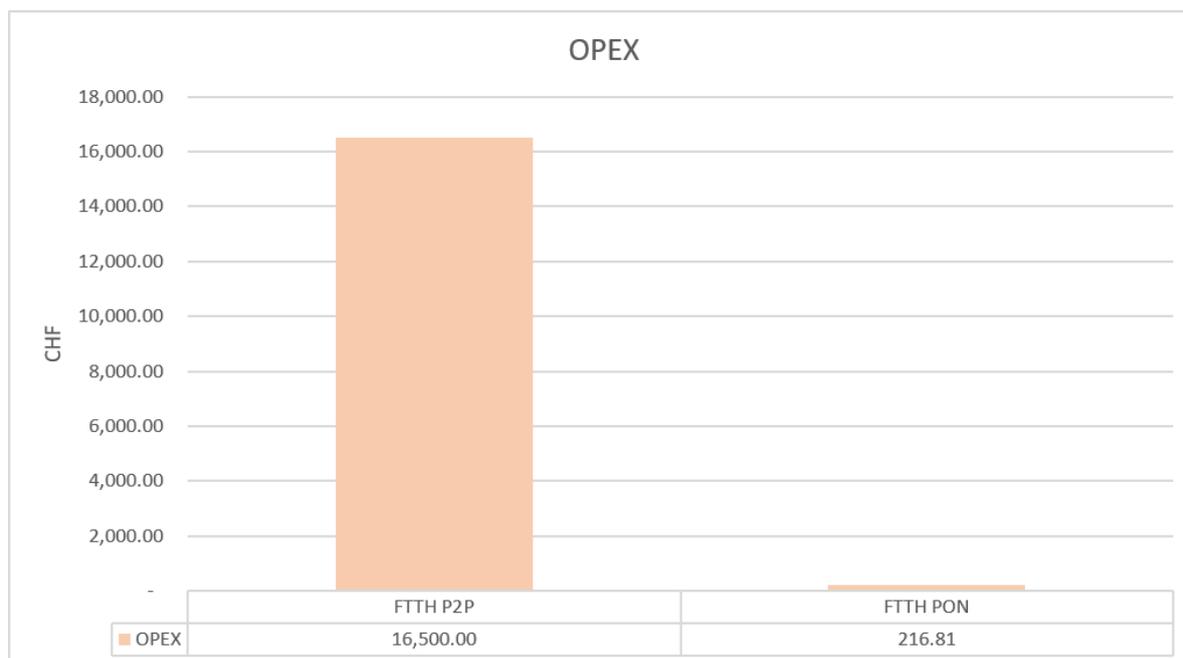


Figure 157 – OPEX par année d'un réseau Smartmetering en mode FTTH P2P et FTTH PON pour 40'000 bâtiments

Une fois encore, entre une technologie d'accès FTTH P2P et une technologie d'accès FTTH PON, la différence des dépenses d'exploitation est énorme. L'OPEX par année d'un réseau Smartmetering en mode FTTH PON est beaucoup moins coûteux, cette différence de coûts provient aussi de la différence du nombre de ports actifs entre les deux technologies d'accès. 40'000 ports actifs pour le FTTH P2P et 165 ports actifs pour le FTTH PON. La consommation en électricité explose lors que 40'000 ports actifs doivent être alimentés.

En ce qui concerne les coûts d'investissement et les coûts d'exploitation, nous comprenons le choix de la société EWZ de mettre en place un réseau Smartmetering en mode FTTH PON pour les 40'000 bâtiments de la ville de Zurich.

Dans les deux cas, les deux solutions répondent aux besoins en performance d'une technologie Smartmetering. La bande passante est largement suffisante dans tout le réseau pour une solution FTTH P2P ou FTTH PON. Au niveau de la sécurité, dans les deux cas, les réseaux sont indépendants et coupés du reste de l'Internet, et les données restent confidentielles.

Pour la maintenance d'un réseau FTTH P2P, il y a beaucoup plus de chance qu'un port actif tombe en panne que dans un réseau FTTH PON, vu le nombre de ports actifs en mode FTTH P2P, les pannes sont plus fréquentes. Encore une fois, il est plus avantageux d'opter pour une technologie d'accès FTTH PON.

Pour les ports passifs et les PON Splitter d'un réseau FTTH PON, ces derniers tombent très rarement en panne, il n'y a donc pas de soucis à se faire pour ces équipements.

Les avantages de la mise en place d'une technologie d'accès FTTH PON par rapport à une technologie d'accès FTTH P2P sont énormes. Au niveau des coûts d'investissement et d'exploitation, le choix de la technologie d'accès pour ce réseau Smartmetering ne se pose pas. Il n'y a que des avantages à mettre en place ce réseau Smartmetering avec une technologie d'accès FTTH PON.

Pour conclure, la mise en place d'un réseau Smartmetering en mode FTTH PON pour les 40'000 bâtiments de la ville de Zurich permet de desservir plus de 300'000 compteurs privés ou communs, à des coûts relativement bas.

6.6.5 Réseau Smartmetering avec location des lignes

Ce dernier point permet de comparer les coûts d'une dernière solution afin de mettre en place un réseau Smartmetering. Si la société EWZ ne possédait pas de lignes, elle aurait pu louer les lignes de Swisscom, par exemple, afin de mettre en place son réseau Smartmetering.

En gardant le même exemple, mettre en place un réseau Smartmetering en ville de Zurich pour 40'000 bâtiments, Swisscom possédant les lignes de fibres optiques raccordant tous ces bâtiments. Dans l'optique que Swisscom loue un lien fibré à 5 CHF par mois, le calcul pour 40'000 bâtiments va être effectué.

Dans ce cas, aucun CAPEX n'est calculé, mais le coût d'exploitation ou OPEX est calculé et il comprend ce coût de location des fibres optiques.

Coûts de la location des lignes		
Bâtiments	Durée	Prix [CHF]
1	1 mois	5
	1 an	60
	10 ans	600
40'000	1 mois	200'000
	1 an	2'400'000
	10 ans	24'000'000

Figure 158 – Coûts de la location des fibres optiques pour la mise en place d'un réseau Smartmetering

L'OPEX qui comprend uniquement les coûts de location des fibres optiques explose. Avec un coût de location par fibre de 5 CHF par mois, pour 40'000 bâtiments, l'OPEX est de 200'000 CHF par mois et de 24 millions après 10 ans.

EWZ à tout intérêt à mettre en place son propre réseau Smartmetering vu que la société possède déjà son propre réseau de fibres optiques en ville de Zurich.

6.7 Conclusion de la l'analyse économique

Les CAPEX, OPEX et Business Case présentés, dans cette partie d'analyse économique, pour les différents réseaux d'accès et solutions, sont des estimations en fonction des coûts et des hypothèses. Tous les calculs, afin de réaliser les différents graphiques, ont été réalisés dans des documents Excel disponibles annexes. Ces documents Excel prennent en entrée les différentes estimations de coûts et les hypothèses fixées, ces entrées sont facilement modifiables, et la génération des différents coûts et graphiques se fait de manière automatique. Ces documents sont de bons outils afin de définir les CAPEX, OPEX et Business Case des réseaux d'accès.

Lors de l'analyse technique des différents réseaux d'accès FTTH P2P, FTTH PON ou encore G.Fast, nous avons pu observer les éléments qui engendrent le plus de coûts pour les différents segments d'accès.

Pour le **segment d'accès Feeder**, ce qui engendre le plus de coûts est le nombre de ports actifs dans le CO. En effet, pour un réseau d'accès FTTH P2P, un port actif par logements/entreprises est requis. Pour ce segment d'accès, la meilleure solution est de réduire le nombre de ports actifs en utilisant des PON Splitter placés dans les CO, comme l'exemple du Smartmetering en ville de Zurich. Le fait de placer les PON Splitter dans les CO permet de faciliter la maintenance et l'accès à ces équipements passifs. Avec cette technique, le réseau d'accès passe en mode FTTH PON, cette solution peut être utilisée à court ou moyen terme. Les fibres optiques étant déjà existantes, une fibre optique par logements/entreprises à la sortie des CO (PON Splitter dans les CO), lorsque les capacités du réseau ne seront plus suffisantes, les PON Splitter peuvent être retiré et il suffit de connecter les fibres optiques aux ports actifs du CO, afin de passer en mode FTTH P2P.

Une autre solution intéressante est l'utilisation des technologies FSO, comme l'exemple de la liaison FSO entre Charmey et Cerniat. En effet, si la pose de câbles de fibres optiques est trop coûteuse, au niveau des travaux de génie civil (creusage de tranchées), la technologie FSO peut être utilisée comme solution alternative à court terme. Une fois que des travaux doivent être effectués sur une route, par exemple, et qu'une tranchée doit être creusée pour diverses raisons, les câbles de fibres optiques peuvent être posés à moindre coût. Les équipements FSO sont achetés une fois et peuvent être utilisés plusieurs fois, comme solutions alternatives à court terme.

Pour le **segment d'accès Drop**, ce qui engendre les plus de coût, est la longueur totale de ce segment. En effet, le nombre de kilomètres de câbles de fibres optiques explose, les travaux de génie civil sont plus importants et les coûts au niveau de l'achat des câbles de fibres optiques sont plus conséquents. Diminuer les longueurs du segment Drop n'est pas possible, mais des solutions comme des équipements FSO peuvent aussi être utilisées, en alternative à court terme. Tout se joue au niveau des coûts de génie civil, il faut profiter des travaux prévus par les communes afin de poser les câbles de fibres optiques. Une autre solution a été pensée pour une habitation isolée à plusieurs kilomètres, pourquoi ne pas fixer les câbles de fibres optiques aux pylônes électriques basse tension appartenant aux fournisseurs d'électricité, ou aux pylônes téléphoniques, s'il y en a. Cette technique permettrait d'éviter de nombreux coûts de génie civil.

Pour le **segment d'accès Inhouse**, le matériel et le travail dans les bâtiments sont relativement coûteux. Pour un réseau FTTH P2P, il est difficile de réduire les coûts de ce segment. Les technologies PLC peuvent réduire ces coûts, elle peut être utilisée à court terme, dans un bâtiment avec un seul appartement, en attendant que des travaux soient réalisés dans les bâtiments afin d'en profiter pour poser la fibre optique. La méthode d'accès FTTB + G.Fast est aussi intéressante, le fait de poser la fibre optique jusque dans les caves des bâtiments (BEP) et de terminer le réseau d'accès jusque dans les appartements avec les paires torsadées existantes, permet de réduire les coûts du segment Inhouse. Cette solution peut être utilisée à court ou moyen terme. Le réseau d'accès étant pensé en FTTH P2P, avec les fibres en attente dans les CO et les DP, lorsque les capacités ne sont plus suffisantes, ce réseau peut facilement être transformé en réseau d'accès FTTH P2P ou FTTH PON. Il faut penser un réseau d'accès pour qu'il soit évolutif.

Un réseau d'accès FTTH P2P est pensé de sorte qu'il n'y ait pas d'équipements actifs sur le réseau. Comme nous avons pu le voir, le CAPEX pour un réseau d'accès FTTH P2P est très élevé, mais le fait qu'il n'y ait pas d'équipements actifs réduit considérablement l'OPEX, l'OPEX peut être difficilement moins élevé avec une autre solution. Une solution FTTB + G.Fast, par exemple, réduit le CAPEX, mais l'OPEX annuel augmente beaucoup. Plus l'OPEX annuel est élevé, plus le nombre de fibres optiques actives sur le réseau doit être élevé, afin de couvrir les frais de ce réseau. Au final, il est presque préférable d'avoir un CAPEX plus élevé au départ pour, au final, avoir un OPEX moins élevé. Voilà pourquoi les solutions alternatives présentées sont considérées comme à court ou moyen terme.

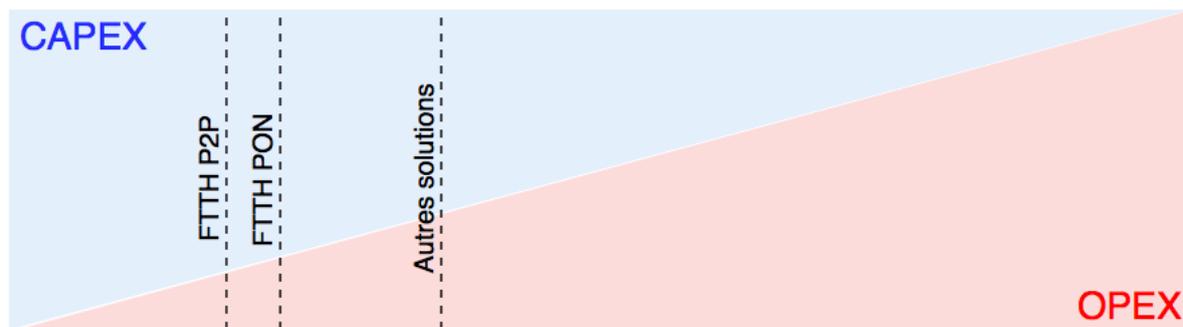


Figure 159 – CAPEX VS OPEX

Avec cette analyse technique, nous avons aussi pu observer qu'il est moins coûteux par client, et plus rapidement rentable, de mettre en place un réseau d'accès FTTH P2P en ville. Les grandes capacités étant plus importantes en zones urbaines, il est préférable de d'abord mettre en place ces réseaux dans ces zones afin d'avoir des entrées d'argent plus importantes. Puis, passer au déploiement de réseaux FTTH P2P en zones rurales en finançant les frais avec les entrées d'argent engendrées par les réseaux en zones urbaines.

D'autres idées au niveau des futurs abonnés ont été pensées. Afin de pousser les personnes à souscrire un abonnement chez les fournisseurs de services, le fait de leur offrir trois mois d'abonnement gratuit, ferait pencher plus de personnes à souscrire un abonnement, et dans tous les cas une bonne partie gardera le service si ce dernier est de qualité et répond à leurs attentes.

Un contrat de ce type peut être envisagé entre FTTH-FR et les fournisseurs d'accès. Les fournisseurs d'accès loueraient dans tous les cas les lignes à la société FTTH-FR, plus de clients veulent essayer les services des fournisseurs d'accès, plus de fibres optiques seront louées chez FTTH-FR, ce qui engendre une plus grande entrée d'argent.

Selon la politique de la société FTTH-FR, les personnes voulant la fibre optique chez eux ne paient pas l'introduction et la pose de la fibre dans leur habitation. Faire payer cette introduction créerait une rentrée d'argent supplémentaire pour la société FTTH-FR. Une seconde possibilité serait de laisser l'introduction et la pose de fibre optique dans la maison gratuite, pour les personnes souscrivant directement un abonnement chez les fournisseurs de services. Et faire payer l'introduction et la pose de fibre optique dans la maison, pour les personnes voulant la fibre optique à la maison, mais ne voulant pas souscrire directement un abonnement chez les fournisseurs de services. Pour finir, les personnes ne voulant pas de connexions fibrées sont mises de côté, en revanche si après un certain temps ils veulent la fibre optique chez eux, ils paieront l'introduction et la pose de fibre optique dans leur maison.

Concernant les appartements en location, si le propriétaire veut que son bâtiment ait une connexion fibrée, mais que les locataires n'en veulent pas, l'introduction sera réalisée dans le bâtiment, mais pas plus loin, la pose de fibres optiques jusque dans l'appartement ne sera pas réalisée.

Pour conclure, du point de vue marketing, dans les régions périphériques, il est préférable d'optimiser les collaborations entre acteurs/responsables locaux. En effet, le fait que les entreprises locales s'occupent des travaux en collaboration avec les responsables de communes permet de renforcer les liens locaux. Les grandes sociétés localisées dans de grandes villes voulant s'occuper de tout ne prennent pas part à la collectivité locale.

7 Problèmes

Cette partie de ce projet de Bachelor permet de décrire les différents problèmes rencontrés tout au long de ce travail.

7.1 FSO (Free Space Optic)

L'analyse technique nous a permis d'en découvrir d'avantages sur les équipements FSO. Cette technologie innovante permet de réduire les coûts d'un réseau d'accès en utilisant, à court terme, une liaison optique grâce à ces produits. Afin d'en connaître davantage sur cette technologie FSO, nous avons contacté la société suisse Black Box, la société russe Artolink et la société tchèque Eurocontract, ces trois sociétés nous ont renseignés sur plusieurs détails techniques. La société suisse Black Box nous a proposé un équipement FSO gratuitement afin de pouvoir effectuer des tests pendant plusieurs mois.

L'équipement FSO ayant été commandé le 6 juin 2018, un contact de la société Black Box, Monsieur George Corjin (george.corjin@blackbox.com) nous a proposé de venir amener l'équipement à la HEIA-FR le 19 juin 2018, et d'en profiter pour nous faire une présentation sur cette technologie. Malheureusement, cette rencontre fut annulée, car, au 19 juin 2018, le produit en provenance de l'Allemagne était bloqué à la frontière.

Malheureusement, au 27 juin 2018, n'ayant aucune nouvelle des équipements FSO, en accord avec l'expert et les superviseurs, les parties du projet conception, réalisation et tests concernant les équipements FSO ont été retirés du cahier des charges.

Le fait de ne pas pouvoir tester ces équipements FSO durant ce travail de Bachelor est dommage. En effet, cette technologie innovante offre une alternative à court terme aux liaisons fibrées vraiment intéressante et il s'agissait de l'élément clé du projet.

Malgré le fait que l'on ne puisse pas tester ces équipements durant ce projet, il serait quand même intéressant que la HEIA-FR puisse se procurer des produits FSO, pour un futur projet, afin de pouvoir y réaliser des tests.

7.2 Équipements, coûts et hypothèses

Lors de la partie analyse économique de ce projet, nous avons calculé les coûts (CAPEX et OPEX) et réalisé les Business Case, de différents réseaux d'accès, et solution alternatives.

Préalablement, en fonction de réseaux d'accès et des solutions, les équipements indispensables au déploiement ont été définis. Puis, il a fallu définir les coûts de ces équipements, ainsi que les différents coûts de génie civil, ces coûts n'ont pas été faciles à définir. En effet, nous avons dû contacter beaucoup de personnes ou sociétés afin d'obtenir le coût de certains équipements. C'est pourquoi, pour certains coûts, il s'agit d'estimation.

Les réseaux d'accès ont été conçus et analysés financièrement en fonction d'estimation de coûts et selon certaines hypothèses. En effet, nous avons dû définir certaines hypothèses pour les réseaux de tests conçus au niveau des zones urbaines et rurales, comme le nombre de logements/entreprises desservi ou le nombre de bâtiments. Les longueurs des différents segments d'accès ont aussi été fixées en fonction d'hypothèses. Pour fixer ces hypothèses, nous nous sommes renseignés auprès du service de la statistique du canton de Fribourg et de la société FTTH-FR.

Voilà pourquoi, dans tous les cas, les CAPEX, OPEX et Business Case présentés sont des estimations. Nous avons essayé d'être le plus précis possible, mais il peut toujours y avoir certaines marges.

Beaucoup de recherches ont dû être effectuées afin de réaliser cette partie d'analyse économique, et ça n'a pas été facile. Les documents Excel créés en annexe afin de créer les graphiques ont souvent dû être modifié, en fonction de nouvelles informations, afin que les résultats finaux soient le plus représentatifs et réels possibles.

8 Conclusion

Ce projet de Bachelor nous a permis de comprendre les enjeux du déploiement d'un réseau fibré, en général, et pour l'ensemble du canton de Fribourg par la société FTTH-FR. Le besoin en capacité actuel et futur, les facteurs stratégiques, politiques et commerciaux (ouverture à la concurrence, possibilités d'évolution et capacité d'innovation pour les services du futur) sont des enjeux motivant le choix de déployer un réseau FTTH P2P sur le territoire fribourgeois et sur l'ensemble de la Suisse.

Ces enjeux sont des bons arguments, afin de motiver le déploiement fibré, mais de tels réseaux d'accès ne se construisent pas en un claquement de doigts. En effet, le gros frein, à leurs déploiements, est leurs coûts. La mise en place d'un réseau fibré point à point a des coûts de déploiement exorbitant en comparaison aux autres techniques et méthodes d'accès. Plus la fibre est proche du client final, plus les performances sont élevées, mais plus les coûts sont importants. En revanche, une fois le réseau fibré achevé, les coûts d'exploitation sont relativement bas.

Durant ce projet, de nombreuses solutions alternatives ont été analysées techniquement et économiquement, afin de juger la faisabilité de leur mise en place en alternative à un réseau FTTH P2P, dans le but d'y réduire les coûts de déploiement. Un bon nombre de ces solutions alternatives ne respectaient pas les critères communiqués par la société FTTH-FR. Ces critères étant: un haut débit assuré, un débit symétrique, aucun élément actif sur le réseau d'accès, une fibre optique jusqu'à l'appartement et un accès complet et illimité à la couche physique pour les fournisseurs de services. En effet, la seule méthode d'accès respectant ces critères étant FTTH P2P.

Le but de la société FTTH-FR étant au final de déployer un réseau d'accès 100% jusqu'à l'appartement, certaines solutions alternatives analysées ont été retenues, afin de les définir comme solutions alternatives à court ou moyen terme, en attendant le réseau entièrement fibré. En effet, des solutions innovantes comme FSO peuvent assurer une connexion entre deux terminaisons fibrées, en attendant qu'une connexion fibrée soit réalisée. Ces solutions FSO permettent de réduire les coûts des segments Feeder et Drop. Nous avons pu tester en cas réel, les technologies PLC, ces dernières n'ont pas donné de résultats très concluants, mais pour un client dont les services tiennent à 15 Mb/s, cette solution peut s'avérer intéressante. Avec les technologies PLC, les coûts au niveau du segment Inhouse peuvent énormément baisser. Le tableau suivant présente les technologies et méthodes d'accès que nous proposons pour les différents segments d'accès afin de réduire les coûts de déploiement.

TECHNOLOGIES	FSO	PLC	PON	G.Fast
Central Office FEEDER	X		PON Splitter	
Rue DROP		X	X	
Bâtiment INHOUSE		X		X
Appartement				X
APPLICATIONS	Zones isolées	Bâtiments	Smart-metering	Swisscom

Figure 160 – Technologies d'accès permettant la réduction des coûts par segment d'accès

Un point important observé, lors de l'analyse économique, est le fait que les ports actifs au niveau du CO engendrent des coûts énormes dans les dépenses de déploiement. Le fait de réduire le nombre de ces ports actifs avec des solutions comme FTTH PON (exemple du Smartmetering en ville de Zurich avec PON Splitter dans les CO) permet de réduire considérablement ces coûts. Le technique du FTTB + G.Fast peut aussi être une alternative à court ou moyen terme en attendant de faire évoluer le réseau d'accès en mode FTTH PON ou FTTH P2P.

8.1 Atteinte des objectifs

L'objectif principal du projet de Bachelor "La Fibre à la maison bon marché: rendre l'impossible possible !" était d'analyser et décrire les technologies et méthodes d'accès à Internet. Plusieurs technologies et méthodes d'accès ont été techniquement et économiquement analysées. Des comparaisons de coûts sont fournies et des solutions afin de réduire les coûts de la mise en place d'un réseau d'accès FTTH sont proposées avec une analyse économique détaillée de ces dernières.

L'objectif secondaire était de fournir des comparaisons de coûts entre différentes technologies alternatives à un réseau d'accès FTTH (Fiber To The Home) en étudiant des cas de conception de réseaux réels. Des cas concrets de déploiement de réseaux d'accès ont été analysés économiquement (CAPEX, OPEX et Business Case), comme la comparaison du déploiement d'un réseau FTTH P2P et FTTB + G.Fast en zones urbaines et rurales en rapport avec le canton de Fribourg. La comparaison entre la pose d'une liaison FSO et fibrée entre Charmey et Cerniat, la comparaison de la mise en place d'un réseau Smartmetering FTTH PON et FTTH P2P en ville de Zurich afin de desservir 40'000 bâtiments. Ces comparaisons permettent d'analyser les différents coûts et surtout d'observer quels sont les équipements ou points augmentant les coûts de déploiement et d'exploitation.

À la base, le cahier des charges prévoyait aussi de concevoir, réaliser et tester un réseau de tests implémentant la technologie FSO. Malheureusement, les équipements FSO n'ont pas pu être acquis pour le projet, ce qui est dommage, car il s'agissait de la partie innovante du projet et surtout l'élément clé. Le cahier des charges a donc été modifié, et en contrepartie, des équipements PLC (Devolvo) ont été commandés afin de pouvoir tester cette technologie. Des réseaux de tests ont été conçus, réalisés et testés avec la technologie PLC, des tests poussés ont été réalisés avec le puissant générateur de trafic Spirent C1. Ce qui nous a permis d'avoir une bonne vue des limites de ces équipements.

Au final, les objectifs principaux et secondaires de ce travail de Bachelor ont été atteints, une analyse technique et une analyse économique détaillées ont été réalisées sur diverses technologies et méthodes d'accès. Une partie de conception et une partie de réalisation de plusieurs réseaux de tests conçus avec la technologie PLC ont été mis en place. Plusieurs scénarios de tests ont été pensés avec divers outils d'analyse de réseaux comme le générateur de trafic Spirent C1. Ces scénarios de tests ont été appliqués, et de nombreux résultats ont pu être analysés et documentés. Pour finir, plusieurs solutions alternatives à court ou moyen terme ont été présentées afin de réduire les coûts du déploiement d'un réseau FTTH P2P.

8.2 Perspectives futures

Concernant les perspectives futures de ce projet de Bachelor, il y en a plusieurs:

- **Free Space Optic:** comme nous l'avons cité, les équipements FSO représentaient la partie innovante et l'élément clé du projet. Nous avons pris contact avec plusieurs sociétés proposant ces solutions comme la société suisse Black Box, la société russe Artolink ou encore la société tchèque Eurocontract, ces dernières nous ont fait plusieurs offres intéressantes. Des équipements FSO de la société Black Box ont été commandés afin de pouvoir y réaliser des tests durant ce projet de Bachelor. Malheureusement, ces équipements ne sont jamais arrivés malgré de nombreuses prises de contact. Ces solutions innovantes méritent d'être testées, c'est pourquoi, dans le futur, un projet pourrait très bien se concentrer sur ces équipements afin d'en analyser leurs performances en cas réel.
- **Powerline Communication (PLC):** au cours de ce projet de Bachelor, des équipements PLC (Devolvo) ont été testés dans un bâtiment réel afin d'avoir un bon aperçu de leurs performances. Les performances atteintes n'étaient pas très concluantes et ne reflètent pas les performances théoriques mentionnées par la société Devolvo. C'est pourquoi une partie d'un futur projet pourrait très bien être orienté sur ces équipements Devolvo afin de pouvoir les tester dans un réseau de tests en collaboration avec la filière du génie électrique de la haute école d'ingénierie et d'architecture de Fribourg. D'autres équipements PLC, d'une autre marque, pourrait aussi être commandés et testés afin de découvrir si d'autres équipements PLC existent avec de plus hautes performances.
- **Analyse économique d'un réseau FTTH:** durant ce projet de Bachelor, des réseaux d'accès FTTH P2P ont été analysés financièrement en se basant sur des estimations et des hypothèses, ce qui n'est pas facile. Il serait intéressant de collaborer plus étroitement avec la société FTTH-FR, afin d'analyser financièrement un de leur futur projet réel. Un projet pourrait très bien être basé sur une future zone dont la société FTTH-FR voudrait fibrer. Dans ce cas, il n'y aurait plus d'estimations et d'hypothèses, mais des chiffres réels à prendre en compte pour une analyse financière.
- **Fibres optiques:** tout au long de ce projet de Bachelor, le travail était orienté sur de la fibre optique. En revanche, aucun réseau n'a pu être conceptualisé, réalisé et testé autour de la fibre optique. Pour un futur projet, il serait intéressant de travailler avec la fibre optique et mettre en place des réseaux de tests avec cette technologie afin d'en réaliser divers tests. Le fait de travailler avec la fibre optique est un point essentiel, car comme nous avons pu le voir dans ce projet, la fibre optique est l'avenir des réseaux d'accès.

Voici quelques idées pour les perspectives futures. Bien entendu, un tel projet peut créer un débouché sur de nombreux autres projets.

8.3 Conclusion personnelle

Ce travail de Bachelor, marquant la fin de mes études à la haute école d'ingénierie et d'architecture de Fribourg, a été pris comme un réel défi. Je me suis mis une certaine pression afin de fournir le plus d'efforts possible durant ces 7 semaines, et surtout pour essayer de rendre un travail complet et de qualité.

Le fait de réaliser ce projet pour une société du canton de Fribourg est un véritable challenge, et c'est une réelle motivation en plus. La matière abordée et analysée tout au long de ce travail, étant souvent nouvelle, a permis d'accentuer davantage mes connaissances concernant les réseaux d'accès.

Après avoir réalisé un projet de semestre sur la QoS, puis ce projet de Bachelor sur les réseaux d'accès, je me rends compte que j'éprouve un réel intérêt pour ce domaine des télécommunications. J'espère, dans un avenir proche, pouvoir continuer à travailler dans ce domaine.

Dans l'ensemble, j'ai éprouvé un réel plaisir à réaliser ce travail, je suis très satisfait du résultat obtenu et j'espère que le travail fourni sera utile pour la société FTTH-FR.

Déclaration d'honneur

Je, soussigné, Loïc Dufresne, déclare sur l'honneur que le travail rendu est le fruit d'un travail personnel. Je certifie ne pas avoir eu recours au plagiat ou à toutes autres formes de fraudes. Toutes les sources d'information utilisées et les citations d'auteur ont été clairement mentionnées.

Domdidier, le 13.07.2018

Loïc Dufresne

9 Figures

9.1 Liste des figures

1	État du réseau FTTH en juin 2018, source: www.ftth-fr.ch	5
2	Grand CO (Central Office), source: FTTH-FR"	6
3	Grand CO (Central Office), source: FTTH-FR	6
4	CO (Central Office) de taille moyenne, source: FTTH-FR	7
5	CO (Central Office) de rue (street cabinet), source: FTTH-FR	7
6	Zones urbaines et rurales du canton de Fribourg	8
7	Fibre optique monomode et multimode	9
8	Réseau de fibres optiques sous les océans, source: www.geek-officiel.com	10
9	Réseau d'accès fibrés (FTTH/FTTB) en Suisse, source: www.map.geo.admin.ch	11
10	Segmentation du réseau informatique	12
11	Segmentation du réseau d'accès	13
12	CO (Central Office)	14
13	Schéma d'un accès FTTH - P2P (Fiber To The Home - Point 2 Point)	17
14	Schéma d'un accès FTTH - P2P (Fiber To The Home - Point 2 Point) avec équipements	17
15	Schéma d'un accès FTTH - PON (Fiber To The Home - Passive Optical Network)	19
16	Schéma d'un accès FTTH - PON (Fiber To The Home - Passive Optical Network) avec équipements	19
17	Schéma d'un accès FTTH - PON (Fiber To The Home - Passive Optical Network) avec un système de couplage passif ou PON Splitter	20
18	Schéma d'un accès FTTx	21
19	Schéma d'un accès FTTB & G.Fast sur paires torsadées	22
20	Débits théoriques proposés avec une technique FTTx & G.Fast sur paires torsadées	23
21	Schéma d'un accès HFC	24
22	Schéma d'un accès HFC en mode FTTx et FTTLA (depuis le dernier amplificateur)	25
23	Schéma d'un accès réseau PLC à longue/moyenne distance (Feeder et Drop)	26
24	Schéma d'un accès réseau PLC à courte distance (Inhouse) pour 1 client	27
25	Équipements PLC Devolo "dLAN® 1200+ WiFi ac", source: www.devolo.ch	27
26	Connexion entre la fibre optique et le réseau électrique	28
27	Connexion entre le réseau électrique et les terminaux	28
28	Superposition du signal basse fréquence du courant électrique et du signal haute haute fréquence des équipements PLC	29
29	Schéma d'un accès réseau PLC à courte distance (Inhouse) pour 3 client	30
30	Schéma l'intégration d'un réseau PLC à d'autres technologies ou méthodes d'accès	31
31	Schéma d'un réseau WiMAX, source: www.ariase.com	32
32	Zone couverte WiMAX de kilomètres de rayon	34
33	Liaison FSO (Free Space Optic) haut débit entre deux points	35
34	Équipement FSO (Free Space Optic) de Black Box (Suisse), source: www.black-box.ch	36
35	Réseau FSO permettant d'atteindre les zones isolées	37
36	Comparaisons techniques et économiques entre fibres optiques et câbles en cuivre	40
37	Comparaisons des technologies et méthodes d'accès en fonction de critères techniques	42
38	Schéma d'un accès réseau PLC Inhouse	44
39	Réseau FSO entre buildings, source: www.slideshare.net	45
40	Connexion FSO travers le lac de Schiffenen	46
41	Équipements Devolo à disposition pour mettre en place un réseau de tests PLC	50
42	Générateur de trafic Spirent C1, source: www.spirent.com	51
43	Hôtes virtuels sur le générateur de trafic Spirent C1	52
44	Génération des flux de trafic	53
45	Classes de trafic et classification définies par Cisco, source: www.cisco.com	53
46	Schéma du bâtiment avec réseaux électriques 220 V et phases	55
47	Schéma du tableau électriques contenant les deux compteurs du bâtiment	56
48	Schéma du réseau de tests pour le scénario de tests 1.1	57
49	Schéma du réseau de tests pour le scénario de tests 1.2	58
50	Schéma du réseau de tests pour le scénario de tests 1.3	59

51	Schéma du réseau de tests pour le scénario de tests 2.1	60
52	Schéma du réseau de tests pour le scénario de tests 2.2	61
53	Schéma du réseau de tests pour le scénario de tests 2.3	62
54	Schéma du réseau de tests pour le scénario de tests 2.4	63
55	CPE (Swisscom) et équipement PLC (Devolvo 0) placés dans le bureau	65
56	Équipement PLC (Devolvo 1) placé dans le salon et câblé à la télévision	66
57	Équipement PLC (Devolvo 2) placé dans le bureau	66
58	Visualisation des trois équipements PLC (Devolvo) avec le software Cockpit	67
59	Visualisation des trois équipements PLC (Devolvo) avec le software Cockpit	68
60	Visualisation des trois équipements PLC (Devolvo) avec le software Cockpit	69
61	Répartition du signal PLC dans les deux paires de phases partant du tableau électrique	70
62	CPE (Swisscom), Spirent C1 et équipement PLC (Devolvo 0)	71
63	Configuration des hôtes virtuels A et B sur le Spirent C1	72
64	Configuration de la vitesse des ports sur le Spirent C1	73
65	Génération des flux de trafic sur l'hôte virtuel A à destination de l'hôte virtuel B	74
66	Configurations des flux de trafic	74
67	Flux de trafic définis sur le Spirent C1 avec une génération à 100 Mb/s	75
68	Configuration des flux de trafic UDP sur le Spirent C1 pour le trafic téléphonique	76
69	Configuration des flux de trafic TCP sur le Spirent C1 pour le trafic de télévision unicast	76
70	Classification des paquets de voix	77
71	Classification des paquets de télévision	77
72	Classification des paquets Internet	77
73	Classification des paquets de management	77
74	Catalogue des scénarios de tests effectués	79
75	Résultats des tests sur les SpeedTest Swisscom et CNLAB	81
76	Schéma de positionnement des ordinateurs sur le réseau pour le scénario de tests 1.1	82
77	Tableau des performances de débit depuis le CPE réalisé avec les SpeedTest	82
78	Tableau des performances de débit depuis le PLC (Devolvo 1) réalisé avec les SpeedTest (autre phase que le PLC branché au CPE)	83
79	Tableau des performances de débit depuis le PLC (Devolvo 2) réalisé avec les SpeedTest (même phase que le PLC branché au CPE)	83
80	Schéma de positionnement des ordinateurs sur le réseau pour le scénario de tests 1.2	84
81	Tableau des performances de débit depuis le CPE réalisé avec les SpeedTest	84
82	Tableau des performances de débit depuis le PLC (Devolvo 1) réalisé avec les SpeedTest (autre phase que le PLC branché au CPE)	85
83	Tableau des performances de débit depuis le PLC (Devolvo 2) réalisé avec les SpeedTest (autre phase que le PLC branché au CPE)	85
84	Schéma de positionnement des ordinateurs sur le réseau pour le scénario de tests 1.3	86
85	Tableau des performances de débit depuis le CPE réalisé avec les SpeedTest	86
86	Tableau des performances de débit depuis le PLC (Devolvo 1) réalisé avec les SpeedTest (autre phase que le PLC branché au CPE)	87
87	Tableau des performances de débit depuis le PLC (Devolvo 2) réalisé avec les SpeedTest (autre réseau électrique que le PLC branché au CPE)	87
88	Tableau des performances moyennes de débit depuis le CPE, sur les trois phases du premier réseau électrique et sur le second réseau électrique	88
89	Les deux compteurs dans le tableau électrique du bâtiment	89
90	Latence moyenne sur le réseau de tests PLC lors du scénario de tests 2.1	90
91	Perte de paquets sur le réseau de tests PLC lors du scénario de tests 2.1	91
92	Latence moyenne sur le réseau de tests PLC lors du scénario de tests 2.2	92
93	Perte de paquets sur le réseau de tests PLC lors du scénario de tests 2.2	93
94	Schéma du réseau de tests sur le CPE	94
95	Latence moyenne sur le CPE	95
96	Perte de paquets sur le CPE	96
97	Génération de trafic à différents débits depuis le Spirent C1	97
98	Flux de trafic définis sur le Spirent C1 avec une génération à 3 Mb/s	98
99	Schéma du réseau de tests PLC avec un génération de trafic à 3 Mb/s	98

100	Latence moyenne sur le réseau de tests PLC avec une génération de trafic à 3 Mb/s	99
101	Perte de paquets sur le réseau de tests PLC avec une génération de trafic à 3 Mb/s	100
102	Flux de trafic définis sur le Spirent C1 avec une génération à 4 Mb/s	101
103	Schéma du réseau de tests PLC avec un génération de trafic à 4 Mb/s	101
104	Latence moyenne sur le réseau de tests PLC avec une génération de trafic à 4 Mb/s	102
105	Perte de paquets sur le réseau de tests PLC avec une génération de trafic à 4 Mb/s	103
106	Flux de trafic définis sur le Spirent C1 avec une génération à 90 Mb/s	104
107	Schéma du réseau de tests CPE avec une génération de trafic à 90 Mb/s	104
108	Latence moyenne sur le CPE avec une génération de trafic à 90 Mb/s	105
109	Perte de paquets sur le CPE avec une génération de trafic à 90 Mb/s	106
110	Tableau de chiffres pour un CO (Central Office)	111
111	Tableau de chiffres pour un DP (Distribution Point)	111
112	Tableau de chiffres pour les longueurs de segments	111
113	Segments d'accès FTTH P2P	112
114	Coût unitaire des équipements du segment Feeder	112
115	Coût unitaire des équipements du segment Drop	113
116	Coût unitaire des équipements du segment Inhouse	113
117	Coût des câbles de fibres optiques selon la société Transfibres	114
118	Coût des câbles de fibres optiques selon Monsieur Frédéric Mauron	114
119	Coût de la pose des câbles de fibres optiques	115
120	Schéma du réseau d'accès FTTH P2P en zones urbaines dont les coûts sont calculés	117
121	Schéma du réseau d'accès FTTH P2P en zones rurales dont les coûts sont calculés	118
122	CAPEX des réseaux d'accès FTTH P2P en zones urbaines et rurales total	119
123	CAPEX des réseaux d'accès FTTH P2P en zones urbaines et rurales par client	120
124	Business Case d'un réseau FTTH P2P en zones urbaines	121
125	Business Case d'un réseau FTTH P2P en zones rurales	122
126	Comparaison d'un segment Inhouse FTTH P2P classique et FTTH P2P + PLC	123
127	CAPEX d'un segment Inhouse FTTH P2P classique et FTTH P2P + PLC	124
128	Segments d'accès G.Fast	126
129	CAPEX des réseaux d'accès FTTB + G.Fast en zones urbaines et rurales total	127
130	CAPEX des réseaux d'accès FTTB + G.Fast en zones urbaines et rurales par client	128
131	Business Case d'un réseau FTTB + G.Fast en zones urbaines	129
132	Business Case d'un réseau FTTB + G.Fast en zones rurales	130
133	Liaison câblée (fibrées) et FSO (Free Space Optic) entre Charmey et Cerniat	132
134	Coûts d'une liaison FTTH P2P entre le CO de Charmey et le DP de Cerniat	133
135	Équipements FSO proposés par la société tchèque Eurocontracts (débits symétriques de 30 Gb/s, jusqu'à 5 kilomètres, pour 45'900 \$), source: www.eurosro.cz	134
136	Liaison FSO (Free Space Optic) entre Charmey et Cerniat avec analyse du relief	135
137	Églises de Charmey et Cerniat, source: www.randonnees-pedestres.ch	135
138	Schéma physique de l'installation du réseau entre le CO de Charmey et le DP de Cerniat	136
139	Coûts d'une liaison FSO entre le CO de Charmey et le DP de Cerniat	136
140	Coûts d'une liaison FTTH P2P entre le CO de Charmey et le DP de Cerniat en profitant des travaux de la route de montagnes	137
141	Comparaison des coûts entre les deux solutions	138
142	CAPEX des deux solutions concernant uniquement la liaison entre Charmey et Cerniat	138
143	Revenu sur la location des fibres optiques sur 2 ans	139
144	CAPEX du réseau d'accès total des deux solutions	140
145	Business Case de la première solution	141
146	Business Case de la seconde solution	142
147	Processus Smartmetering, source: www.ondeosystems.com	143
148	Nombre de bâtiments par CO à desservir par Smartmetering	145
149	Volume de données et débit par bâtiments et par CO	145
150	Schéma d'un CO du réseau Smartmetering en mode FTTH P2P	146
151	Coût total des équipements actifs	147
152	Coût et consommation annuelle des ports actifs en mode FTTH P2P	147
153	Schéma d'un CO du réseau Smartmetering en mode FTTH PON	148

154	Coût total des équipements actifs et passifs	149
155	Coût et consommation annuelle des ports actifs en mode FTTH PON	149
156	CAPEX de la mise en place d'un réseau Smartmetering en mode FTTH P2P et FTTH PON pour 40'000 bâtiments	150
157	OPEX par année d'un réseau Smartmetering en mode FTTH P2P et FTTH PON pour 40'000 bâtiments	151
158	Coûts de la location des fibres optiques pour la mise en place d'un réseau Smartmetering	152
159	CAPEX VS OPEX	154
160	Technologies d'accès permettant la réduction des coûts par segment d'accès	157

10 Lexique

AES	Advanced Encryption Standard Standard de chiffrement avancé
BEP	Building Entry Point Point d'entrée du bâtiment
CAPEX	Capital Expenditure Dépenses d'investissement
CO	Central Office Office central
COMCO	Commission de la concurrence
CPE	Customer Premise Equipment Équipement du client (ex: modem)
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance Écoute d'un Support à Accès Multiple avec évitement de collision
CTO	Coaxial Telecommunication Outlet Sortie de télécommunication coaxial
DP	Distribution Point Point de distribution
DPU	Distribution Point Unit Unité de point de distribution
DSCP	Differentiated Services Code Point Point de code des services différenciés
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer Multiplexeur d'accès à la ligne d'abonné numérique
ESR	Énergie Sion Région
EWZ	Elektrizitätswerk der Stadt Zürich Centrale électrique de la ville de Zürich
FD	Floor Distribution Distributeur d'étage
FR	Fribourg
FSO	Free Space Optic Communications optiques en espace libre
FTTB	Fiber To The Building Fibre jusqu'au bâtiment
FTTC	Fiber To The Curb Fibre jusqu'au trottoir
FTTDP	Fiber To The Distribution Point Fibre jusqu'au point de distribution
FTTH	Fiber To The Home Fibre jusqu'à l'appartement
FTTLA	Fiber To The Last Amplifier Fibre jusqu'au dernier amplificateur
FTTN	Fiber To The Node Fibre jusqu'au noeud
FTTS	Fiber To The Street Fibre jusqu'à la rue
GPON	Gigabit Passive Optical Network Réseau optique passif en Gigabit
HEIA-FR	Haute école d'ingénierie et d'architecture de Fribourg
HES-SO	Haute École spécialisée de Suisse occidentale
HFC	Hybrid Fiber Coaxial Hybride fibre coaxial
IP	Internet Protocol Protocole Internet
IPv4	Internet Protocol version 4 Protocole Internet version 4
ITU	International Telecommunication Union Union internationale des télécommunications
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output Entrées multiples, sorties multiples
OFCOM	Office fédéral de la communication
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing Fréquence orthogonale-Multiplexage de division

OLT	Optical Line Termination Terminaison de ligne optique
ONT	Optical Network Termination Terminaison du réseau optique
OPEX	Operational Expenditure Dépenses d'exploitation
OTO	Optical Telecommunications Outlet Prise optique
P2M	Point to Multipoint Point à multi-point
P2P	Point to Point Point à point
PHB	Per-Hop Behaviour Comportement par saut
PLC	Powerline Communication Communication par ligne électrique
PON	Passive Optical Network Réseau optique passif
PT	Transfer Point Point de transfert
QoS	Quality of Service Qualité de service
SCS	Swisscom
SStat	Service de la statistique du canton de Fribourg
TCP	Transmission Control Protocol Protocole de contrôle de transmissions
TO	Telecommunication Outlet Sortie de télécommunication
UDP	User Datagram Protocol Protocole de datagramme utilisateur
UNIFR	Université de Fribourg
VoIP	Voice over IP Voix sur IP
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access Interopérabilité mondiale pour l'accès par hyperfréquences

11 Contacts

Ce chapitre permet de référencer toutes les personnes ayant été contactées durant ce projet de Bachelor dans le but d'obtenir des informations plus précises sur certains points abordés.

Monsieur Frédéric Mauron, FTTH-FR

Informations sur le réseau de fibres optiques (FTTH) du canton de Fribourg.

Contact:

Monsieur Frédéric Mauron
FTTH-FR SA
frederic.mauron@ftth-fr.ch
1763 Granges-Paccot (Suisse)
www.ftth-fr.ch
+41 26 352 65 65

Monsieur George Corjin, Black Box

Informations sur les produits FSO (Free Space Optic) proposés pour la société suisse Black Box et commande d'un équipement FSO.

Contact:

Monsieur George Corjin
Black Box Network Services
george.corjin@blackbox.com
8855 Wangen (Suisse)
www.black-box.ch
+41 55 451 70 70

Monsieur Oscar Dubois, Transfibres

Informations sur les câbles de fibres optiques proposés pour la société suisse Transfibres.

Contact:

Monsieur Oscar Dubois
Transfibres Sàrl
o.dubois@transfibres.com
1091 Grandvaux (Suisse)
www.transfibres.com
+41 21 799 10 91

Monsieur David Pehr, Eurocontract

Informations sur les produits FSO (Free Space Optic) proposés pour la société tchèque Eurocontract.

Contact:

Monsieur David Pehr
Eurocontract
david@eurosro.cz
14900 Prague (République Tchèque)
www.eurosro.cz
+420 296 371 265

Conseil vente, Artolink

Informations sur les produits FSO (Free Space Optic) proposés pour la société russe Artolink.

Contact:

Conseil vente Artolink
Artolink
sales@artolink.com
390046 Ryazan (Russie)
www.artolink.com
+7 (4912) 300-955

Conseil personnel, Devolo

Informations sur les produits PLC (Powerline Communication) proposés pour la société suisse Devolo.

Contact:

Conseil personnel Devolo
Devolo AG
support@devolo.ch
www.devolo.ch
+41 71 243 04 44

Service de la statistique du canton de Fribourg, SStat

Informations sur divers chiffres et statistiques relatifs au canton de Fribourg.

Contact:

SStat
Service de la statistique du canton de Fribourg
1700 Fribourg (Suisse)
www.fr.ch/sstat
+41 26 305 28 23

Monsieur Martial Clément, SStat

Informations sur divers chiffres et statistiques relatifs au canton de Fribourg.

Contact:

Monsieur Martial Clément
SStat
martial.clement@fr.ch
1700 Fribourg (Suisse)
www.fr.ch/sstat
+41 26 305 28 35

Monsieur Daniel Dufresne, maçon CFC

Informations sur les travaux de génie civile et réseaux électriques.

Contact:

Monsieur Daniel Dufresne
dufresnedaniel@bluewin.ch
1546 Domdidier (Suisse)
+41 26 675 27 45

Monsieur Jérôme Rito, installateur électricien CFC

Informations sur les réseaux électriques et aide à la réalisation de schémas.

Contact:

Monsieur Jérôme Rito
1470 Estavayer-le-Lac (Suisse)
+41 79 698 44 62

Monsieur Jérémy Athanasiadis, administration communale de Belmont-Broye

Informations sur divers chiffres et statistiques relatifs à la commune de Belmont-Broye.

Contact:

Monsieur Jérémy Athanasiadis
Administration communale de Belmont-Broye
j.athanasiadis@belmont-broye.ch
1546 Domdidier (Suisse)
+41 26 672 33 25

12 Bibliographie

- [1] FTTH-FR. Fthh-fr. *La fibre fribourgeoise*, 2017. [Fourni par les superviseurs; Document disponible le 4-juin-2018].
- [2] Maxime Raby. Record : 10 millions de gbits/s sur une fibre optique multimode. <https://www.universfreebox.com/article/40895/Record-10-millions-de-Gbits-s-sur-une-fibre-optique-multimode>, 2017. [En ligne; Page disponible le 2-juin-2018].
- [3] Confédération suisse. Wimax: l'ofcom ouvre une consultation publique. <https://www.admin.ch/gov/fr/accueil/documentation/communiques.msg-id-731.html>, 2005. [En ligne; Page disponible le 7-juin-2018].
- [4] Loïc Dufresne. Quel est l'effet de la qos sur des petits réseaux de labo ? *Projet de semestre 6*, 2018. [Sur les archives de projet de semestre; Document disponible le 1-juillet-2018].
- [5] Monsieur Simon Lièvre. *Projet de semestre 5*, 2018. [Sur le support Multidoc; Livre disponible le 3-juillet-2018].
- [6] Loïc Dufresne. *Projet de semestre 6. Quel est l'effet de la QoS sur des petits réseaux de labo ? - Mise en place réseau de tests & stratégies de QoS - Configuration Spirent C1 & routeur Cisco 2800 Series*, 2018. [Sur les archives de projet de semestre; Document disponible le 2-juillet-2018].
- [7] Juan Rendon. Costs of deploying ftt dp with g.fast. www.huawei.com/ilink/cn/download/HW_364805, 2014. [En ligne; Page disponible le 7-juillet-2018].
- [8] Romande Énergie. Smartmetering. <https://www.romande-energie.ch/distributeurs/smart-metering>, 2018. [En ligne; Page disponible le 27-juin-2018].
- [9] Antoine Delley et Patrick Gaillet. Technologies d'accès. *Accès à fibres optiques*, 2018. [Sur le support de cours; Document disponible le 29-mai-2018].
- [10] seb59. Fonctionnement du gpon. <https://lafibre.info/gpon/fonctionnement-du-gpon/>, 2016. [En ligne; Page disponible le 29-mai-2018].
- [11] État de Fribourg. Fthh fribourg sa / mise en place de la fibre optique cantonale : Quel avenir pour la fibre optique sur notre territoire après le désengagement de swisscom sa ? http://www.parlinfo.fr.ch/dl.php/fr/ax-599d71ad68822/fr_RCE_2017_CE_36_Rponse.pdf, 2016. [En ligne; Page disponible le 29-mai-2018].
- [12] Olivier Chicheportiche. Fibre : le ftt dp, une nouvelle alternative sur les rails. <http://www.zdnet.fr/actualites/fibre-le-fttdp-une-nouvelle-alternative-sur-les-rails-39819770.htm>, 2015. [En ligne; Page disponible le 29-mai-2018].
- [13] open ax. Lq fthh dans les zones rurales. http://www.openaxs.ch/wAssets/docs/broschueren/OAX_Info_Broschuere_FTTH_A4_F_def.pdf, 2012. [En ligne; Page disponible le 29-mai-2018].
- [14] Swisscom. Swisscom, premier opérateur de télécommunications européen à déployer g.fast. <https://www.swisscom.ch/fr/about/medien/press-releases/2016/10/20161018-MM-Gfast.html>, 2016. [En ligne; Page disponible le 29-mai-2018].
- [15] Frédéric Bergé. Télécoms: le très haut débit sur câble téléphonique aura sa norme en 2014. <https://www.01net.com/actualites/le-tres-haut-debit-sur-cable-de-cuivre-aura-sa-norme-en-2014-600075.html>, 2013. [En ligne; Page disponible le 29-mai-2018].
- [16] BLACK BOX Network Services AG. Optique sans fil (fso). <https://www.black-box.ch/chf-ch/1588/Free-Space-Optics/>, 2018. [En ligne; Page disponible le 29-mai-2018].
- [17] 4Gon Solutions. Free space optic. <https://www.4gon.co.uk/free-space-optics-c-148.html>, 2018. [En ligne; Page disponible le 29-mai-2018].
- [18] Artolink. Artolink. <http://artolink.com>, 2018. [En ligne; Page disponible le 29-mai-2018].

- [19] CableFree. Free space optics (fso). <http://www.cablefree.net/cablefree-free-space-optics-fso/>, 2018. [En ligne; Page disponible le 29-mai-2018].
- [20] CommConnect. Free space optics. <https://commconnect.com/free-space-optics.html>, 2018. [En ligne; Page disponible le 29-mai-2018].
- [21] SIL Citycable. Prescriptions techniques relatives au raccordement des bâtiments à la fibre optique et aux installations intérieures multimédia. https://citycable.ch/media/ul/tech/prescriptions_tech.pdf, 2014. [En ligne; Page disponible le 31-mai-2018].
- [22] Bernard Cousin et Yassine Hadjadj-Aoul. Réseau d'accès. <http://www.irisa.fr/prive/bcousin/Enseignement/2013-2014/Réseaux%20d%27accés.2P.pdf>, 2013. [En ligne; Page disponible le 1-juin-2018].
- [23] Wikipedia. Réseau ftth. https://fr.wikipedia.org/wiki/Réseau_FTTH, 2018. [En ligne; Page disponible le 2-juin-2018].
- [24] Swisscom. Internet. https://www.swisscom.ch/fr/clients-prives/internet-television-reseaufixe/internet.html?campID=SEA_GFI_DSL_LE&gclid=Cj0KCQjwgMnYBRDRARIsANC2dfn9CpB2kdwcfEA24FOiKOCe5EAR_ALGwSdj7QltZBCIjYz2E4wE-W0aAmpEEALw_wcB&gclsrc=aw.ds, 2018. [En ligne; Page disponible le 2-juin-2018].
- [25] Wikipedia. Fibre optique. https://fr.wikipedia.org/wiki/Fibre_optique, 2018. [En ligne; Page disponible le 2-juin-2018].
- [26] Sunrise. Sunrise smart tv. https://www.sunrise.ch/fr/clients-prives/pour-la-maison/configurateur.html?cid=SEA_201706BK02310&gclid=Cj0KCQjwgMnYBRDRARIsANC2dfnGk2AIQnzoWhWoQHdPGW5T3veXzLqvcicqXNNPUmb1cR2f3ldLieH8aAuf_EALw_wcB, 2018. [En ligne; Page disponible le 2-juin-2018].
- [27] Salt. Salt fiber. https://fiber.salt.ch/fr/?gclid=Cj0KCQjwgMnYBRDRARIsANC2df10cdjtmPrldx1Lu-beUzewb1NaYHLMq_uLFHvQOG2CF5BASCTqyAaAlouEALw_wcB#/, 2018. [En ligne; Page disponible le 2-juin-2018].
- [28] Jacques Robadey. Conception, déploiement et exploitation de réseaux. *Conception de l'accès*, 2018. [Sur le support de cours; Document disponible le 4-juin-2018].
- [29] Devolo. Produits devolo dlan®. <https://www.devolo.ch/fr/produits/dlan-1200-wifi-ac-starter-kit-cpl/>, 2018. [En ligne; Page disponible le 7-juin-2018].
- [30] Yves Maguer. La page d'explication wifi. http://yves.maguer.free.fr/WiFi/page_wifi_yves.html, 2003. [En ligne; Page disponible le 7-juin-2018].
- [31] François Le Gall. Wimax : tout savoir sur le haut-débit via les ondes hertziennes. <http://www.ariase.com/fr/guides/wimax.html>, -. [En ligne; Page disponible le 7-juin-2018].
- [32] Geek-Officiel. 885 000 kms de câbles internet sont enfouis dans les océans. <http://www.geek-officiel.com/885-000-kms-de-cables-internet-sont-enfouis-dans-les-océans>, 2015. [En ligne; Page disponible le 8-juin-2018].
- [33] Wikipedia. Communications optiques en espace libre. https://fr.wikipedia.org/wiki/Communications_optiques_en_espace_libre, 2018. [En ligne; Page disponible le 8-juin-2018].
- [34] Énergies Sion région. La fibre optique (ftth). <https://www.esr.ch/fr/simple/particuliers/portrait/detail/la-fibre-optique-ftth-788>, 2018. [En ligne; Page disponible le 8-juin-2018].
- [35] PhotonicsViews. World record in free-space optical communications. <http://www.photonicsviews.com/world-record-in-free-space-optical-communications/>, 2016. [En ligne; Page disponible le 8-juin-2018].
- [36] État de Fribourg. Service de la statistique. <http://www.fr.ch/sstat/fr/pub/index.cfm>, 2018. [En ligne; Page disponible le 8-juin-2018].

- [37] Le blog de moulin. Comparaison avec le cuivre. <http://lescontribuablesdesommières.over-blog.com/article-comparatif-fibre-de-verre-fibre-de-cuivre-70272719.html>, 2011. [En ligne; Page disponible le 10-juin-2018].
- [38] International Telecommunication Union. G.984.1 : Réseaux optiques passifs gigabitaires: caractéristiques générales. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.1-200803-I/fr>, 2012. [En ligne; Page disponible le 11-juin-2018].
- [39] Mayank Awasthi. Free space optics by mayank awasthi. <https://www.slideshare.net/mayankawasthi31/free-space-optics-by-mayank-awasthi>, 2012. [En ligne; Page disponible le 12-juin-2018].
- [40] Wikipedia. Haute fréquence. https://fr.wikipedia.org/wiki/Haute_fréquence, 2018. [En ligne; Page disponible le 16-juin-2018].
- [41] Judith Pellerin. Technologies cpl technologie par courant porteur. <http://slideplayer.fr/slide/11869506/>, 2017. [En ligne; Page disponible le 18-juin-2018].
- [42] Transfibres. Transfibres. <http://www.transfibres.com>, 2018. [En ligne; Page disponible le 19-juin-2018].
- [43] EC System. Ec system. <http://www.ecsystem.cz/en/>, 2018. [En ligne; Page disponible le 20-juin-2018].
- [44] Eurocontracts. Eurocontracts. <http://www.eurosro.cz/uvodni-stranka>, 2018. [En ligne; Page disponible le 20-juin-2018].
- [45] Sstat. Annuaire statistique du canton de fribourg. http://www.fr.ch/sstat/files/pdf90/annuaire_internet_2017.pdf, 2018. [En ligne; Page disponible le 21-juin-2018].
- [46] Juan Rendon Schneir et Yupeng Xiong. Cost analysis of network sharing in fttb/po. http://www.juanrendon.com/Papers/JRS_IEEE_ComMag_Network_Sharing_FTTH_PON_August_2014.pdf, 2014. [En ligne; Page disponible le 21-juin-2018].
- [47] Futura Sciences. Compteur intelligent. <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/developpement-durable-compteur-intelligent-6952/>, 2018. [En ligne; Page disponible le 27-juin-2018].
- [48] Realstone. Smart metering. <http://realstone.ch/fr/developpement-durable/smart-metering>, 2018. [En ligne; Page disponible le 27-juin-2018].
- [49] Groupe E. E-vision - l'application smart metering de groupe e. <https://www.groupe-e.ch/fr/particuliers/produits-services/energie/smart-metering>, 2018. [En ligne; Page disponible le 27-juin-2018].
- [50] Spirent. Spirent. <https://www.spirent.com>, 2018. [En ligne; Page disponible le 1-juillet-2018].
- [51] Cisco. The qos baseline. https://www.cisco.com/en/US/technologies/tk543/tk759/technologies_white_paper0900aecd80295a9b.pdf, 2005. [En ligne; Page disponible le 2-juillet-2018].
- [52] Keymile. G.fast/vdsl2 micro dslams for connecting fttb areas. https://www.keymile.com/en/g_fast_vdsl_micro_dslam, 2018. [En ligne; Page disponible le 7-juillet-2018].

13 Annexes

Les annexes citées ci-dessous sont imprimées à part du rapport et fournies avec la version papier du rapport. Pour la version PDF du rapport, les annexes citées ci-dessous sont disponibles sur la Forge ou sur le CD/DVD:

1. Le cahier des charges
2. Le flyers
3. Fournisseurs & produits FSO (Free Space Optic)
4. Fournisseurs & produits WiFi
5. Fournisseurs & produits Powerline (Devol)
6. Les mails échangés avec les différents contacts

Pour les personnes ayant participé au projet, tous les documents, PV, plannings, journal de bord, documents Excel de calculs de coûts des réseaux d'accès, autres annexes et informations relatives au projet, sont disponibles sur la Forge: https://forge.hefr.ch/projects/dufresne_bachelor_ftthfr

13.1 Versions des logiciels

Ces versions sont celles des logiciels avec lesquels nous avons réalisé ce projet:

- **Word:** version 16.10
- **Excel:** version 16.10
- **CNLAB SpeedTest:** version 1.5.2
- **Spirent TestCenter:** version 4.70.9706.0000

13.2 Contenu du CD/DVD

```
Projet de Bachelor - FTTH+
.
|-- annonce
|   '-- annonce_280518.pdf
|
|-- cahier_des_charges
|   '-- cahier_des_charges_270618.pdf
|
|-- flyers
|   '-- flyers_130718.pdf
|
|-- fournisseurs_produits
|   |-- fso_180618.pdf
|   |-- plc_180618.pdf
|   '-- wifi_180618.pdf
|
|-- journal_de_bord
|   '-- journal_de_bord_130718.pdf
|
|-- mails
|   |-- cyrilFerrari_sstat_250618.pdf
|   |-- davidPehr_eurocontracts_200618.pdf
|   '-- georgeCorjin_blackBox_060618.pdf
|
|-- planning
|   |-- heures_280518.png
|   '-- planning_final_130718.pdf
|
|-- pv
|   '-- *
|
|-- rapport
|   '-- rapport_final_130718.pdf
|
|-- README.txt
|
|-- spirent
|   |-- configurations_spirent_130708.tcc
|   '-- graphiques_tests_130708.xlsx
|
'-- tableaux_graphiques
    |-- cost_fttb_gfast_130718.xlsx
    |-- cost_ftth_p2p_130718.xlsx
    '-- cost_fso_charmeyCerniat_130718.xlsx
```

