

Université du Québec
Institut National de la Recherche Scientifique
Centre - Énergie, Matériaux et Télécommunications

**Évaluation et analyse du TCO et des risques des modèles
d'intégration collaborative des infrastructures de
communications du *Smart Grid***

Par
Ramzi Charni

Mémoire présenté
pour l'obtention
du grade de Maîtrise (MSc)
en Télécommunications

Jury d'évaluation

Président de jury et examinateur interne

Prof. Jean-Charles Grégoire

Examineur externe

Prof. Christine Tremblay

Directeur de recherche

Prof. Martin Maier

Remerciements

Je tiens à exprimer ma gratitude et mes respects les plus sincères à mon encadreur le Professeur Martin Maier pour l'aide qu'il a bien voulu m'accorder tout au long des différentes étapes de mes travaux de recherche, moyennant ses critiques constructives, ses suggestions pertinentes, je m'incline par-devant ses qualités humaines et morales dont j'étais toujours impressionné, sa volonté permanente d'aider et ses idées innovantes qui m'ont permis d'élaborer mes travaux de recherches. Son attitude rigoureuse m'a doté d'une meilleure clairvoyance quant à mon avenir professionnel.

Je voudrais souligner la qualité exceptionnelle des moyens informatiques et logistiques mis à la disposition des chercheurs du laboratoire « Optical Zeitgeist Laboratory » de l'institut national de la recherche scientifique et l'appui financier du NSERC mis en œuvre par le Professeur Martin Maier.

D'autre part, je voudrais exprimer ma reconnaissance à tous ceux qui m'ont aidé durant mes travaux de maîtrise et à tous les enseignants tout au long de mon parcours académique.

Je remercie mes parents pour leur soutien tout au long de mes études, notamment ma mère, la grandiose Aicha pour son amour et son engagement inconditionnel. J'espère qu'elle sera toujours fière de moi.

Résumé

La majorité des études technico-économiques antérieures donnent un aperçu de l'ensemble des coûts de la mise en place des infrastructures de communication pour différents scénarios. Mais, l'évaluation d'un projet de télécommunication est évidemment bien plus que cela. En fait, ces travaux ne prennent en considération que le modèle traditionnel d'intégration verticale. Cependant, en réalité, par exemple lors du déploiement du réseau Fiber To The Home (FTTH) à Stockholm ou Amsterdam, ces coûts ont été supportés par plusieurs acteurs. Par conséquent, il est nécessaire de considérer de plus près les gains réalisés grâce aux collaborations dans l'intégration.

Dans ce travail, nous développons un nouvel outil d'analyse de Total Cost of Ownership (TCO) générique et assez flexible permettant de calculer les coûts globaux liés au déploiement des technologies de communication pour différents scénarios. Notre outil d'analyse de TCO contient cinq éléments constitutifs : outil de dimensionnement de réseau, modèle des dépenses d'investissement de capital (CAPEX), modèle des dépenses d'exploitation (OPEX), et finalement deux outils d'analyse de sensibilité et des risques.

Nous comparons à la fois qualitativement et quantitativement les différents modèles d'intégration des infrastructure de communication du réseau électrique intelligent en nous basant sur notre outil développé d'analyse de TCO. Ce qui différencie notre travail des études précédentes est un nouveau modèle d'intégration collaborative, dans lequel nous considérons une infrastructure partagée pour les communication du réseau électrique intelligent et l'accès à large bande. De plus, les Housing

companies (HCs) peuvent collaborer en offrant les surplus d'énergie renouvelable aux opérateurs des réseaux à travers les Microgrids. Nous étudions l'impact de ce nouveau modèle proposé sur le TCO.

Nous effectuons également une analyse de sensibilité des paramètres d'entrée et nous analysons les risques liés à l'intermittence de l'énergie renouvelable (solaire, éolienne) ainsi que les coupures aléatoires des fibres en termes de pénalités et TCO.

Mots-clés

Analyse de sensibilité et des risques, Analyse de TCO, Bâtiments à énergie positive, Infrastructure de communication FiWi du réseau électrique intelligent, Intermittence des énergies renouvelables, Modèle d'intégration collaborative, Outil de dimensionnement.

Abstract

Most previous techno-economic studies give insight into the overall costs of various communications network architectures for different scenarios. However, evaluating a telecom deployment project is much more than just summing up all costs. They just consider the case of vertical integration model. However, in realistic network cases, e.g. Fiber To The Home (FTTH) deployments in Stockholm and Amsterdam, these costs are not carried by a single actor. Thus, it is necessary to take a closer look at the possibilities and gains achieved through collaboration.

In this work, we develop a flexible, generic yet comprehensive Total Cost of Ownership (TCO) framework, which calculates the overall costs related to the rollout of smart grid communications networks for different scenarios. Our TCO framework contains five building blocks : network dimensioning tool, Capital Expenditures (CAPEX) model, Operational Expenditures (OPEX) model, and finally two tools for sensitivity and risk analysis. This TCO framework will be our tool for the investigation of implementation models for our smart grid communications infrastructure.

We will also compare different implementation models for the Fiber-Wireless (FiWi) smart grid communications infrastructure both qualitatively and quantitatively by using our developed tool. Further, we contribute a novel collaborative implementation model for a shared infrastructure for both broadband access and smart grid communications. In addition, we take into account that buildings currently shift from a product to a service (i.e., renewable power supply) and exploit the idea that Housing Companies (HCs) may collaborate by offering the surplus renewable energy to commu-

nications network providers across interconnected smart microgrids. We study the impact of our implementation model on TCO and compare it with the traditionnal model.

We also conduct a sensitivity analysis for the key cost parameters and analyze the risks related to renewable power intermittency (e.g., solar, wind) and random fiber cuts in terms of power service penalty, fiber cut related costs, and TCO.

Keywords

Collaborative implementation model, Dimensionning tool, Integrated FiWi smart grid communications infrastructure, Positive energy buildings, Renewable energy intermittency, Sensitivity and risk analysis, TCO analysis.

Table des matières

1	<i>Introduction</i>	1
1.1	<i>Motivations</i>	1
1.2	<i>Contexte et contributions du mémoire</i>	2
1.3	<i>Structure du mémoire</i>	5
2	<i>Infrastructures de communication du réseau électrique intelligent</i>	7
2.1	<i>Introduction</i>	7
2.2	<i>Vision du réseau électrique intelligent</i>	8
2.2.1	<i>Concept du réseau électrique intelligent</i>	9
2.2.2	<i>Fonctions majeures du réseau électrique intelligent</i>	10
2.2.3	<i>Évolution du réseau électrique intelligent</i>	12
2.3	<i>Technologies de communication du réseau électrique intelligent</i>	14
2.3.1	<i>Réseaux d'accès optiques</i>	14
2.3.2	<i>Réseaux d'accès sans fil</i>	17
2.3.3	<i>Réseaux Über-FiWi</i>	19
2.4	<i>Conclusion</i>	21
3	<i>Dimensionnement et planification des réseaux</i>	22
3.1	<i>Introduction</i>	22

3.2	<i>Réseaux d'accès optiques</i>	23
3.3	<i>Réseaux d'accès sans fils</i>	26
3.3.1	<i>Dimensionnement de capacité</i>	27
3.3.2	<i>Dimensionnement de couverture</i>	28
3.4	<i>Conclusion</i>	30
4	<i>Outil d'analyse de TCO</i>	31
4.1	<i>Introduction</i>	31
4.2	<i>Variables d'entrée</i>	32
4.2.1	<i>Paramètres d'entrée du marché</i>	32
4.2.2	<i>Paramètres d'entrée de la technologie</i>	32
4.3	<i>Variables de sortie</i>	32
4.4	<i>Modèle CAPEX</i>	33
4.5	<i>Modèle OPEX</i>	35
4.6	<i>Analyse de sensibilité</i>	41
4.7	<i>Analyse des risques</i>	42
4.8	<i>Conclusion</i>	43
5	<i>Modèles d'intégration</i>	44
5.1	<i>Introduction</i>	44
5.2	<i>Couches, rôles, et acteurs du réseau</i>	45
5.2.1	<i>Couches du réseau</i>	45
5.2.2	<i>Rôles du réseau</i>	46
5.2.3	<i>Acteurs du réseau</i>	47
5.3	<i>Scénarios d'intégration</i>	48
5.3.1	<i>Modèle d'intégration verticale</i>	49

5.4	<i>Modèles Open Access</i>	49
5.4.1	<i>Concurrence au-dessus de la couche physique</i>	50
5.4.2	<i>Concurrence au-dessus de la couche active</i>	50
5.4.3	<i>Séparation totale</i>	50
5.5	<i>Notre modèle proposé d'intégration collaborative</i>	51
5.5.1	<i>Variation de l'énergie éolienne en termes de production</i>	54
5.5.2	<i>Variation de l'énergie photovoltaïque en termes de production</i>	54
5.6	<i>Conclusion</i>	55
6	<i>Résultats</i>	57
6.1	<i>Introduction</i>	57
6.2	<i>Scénario de base</i>	57
6.2.1	<i>Description du scénario</i>	57
6.2.2	<i>Résultats du scénario</i>	59
6.3	<i>Analyse de sensibilité</i>	61
6.3.1	<i>CAPEX par utilisateur</i>	62
6.3.2	<i>OPEX par utilisateur</i>	63
6.4	<i>Impact des schémas de protection des PONs sur les CAPEX et OPEX</i>	64
6.5	<i>Impact de notre modèle proposé d'intégration collaborative sur le TCO</i>	66
6.6	<i>Analyse des risques</i>	67
6.6.1	<i>Risques liés à la variation de l'énergie éolienne en termes de production.</i>	68
6.6.2	<i>Risques liés à la variation de l'énergie solaire en termes de production</i>	69
6.6.3	<i>Risques associés avec les coupures des fibres</i>	71
6.6.4	<i>Risques associés au déploiement du réseau Über-FiWi</i>	71
6.7	<i>Conclusions</i>	72

7	<i>Conclusions et perspectives futures</i>	74
7.1	<i>Conclusions</i>	74
7.2	<i>Perspectives futures</i>	76
8	<i>Publications</i>	86
8.1	<i>Article accepté dans la conférence IEEE SmartGridComm</i>	86
8.2	<i>Article accepté dans la conférence Asia Communications and Photonics</i>	93
8.3	<i>Article soumis dans IEEE Transactions on Smart Grid</i>	97

Table des figures

2.1	<i>Réseau d'électricité traditionnel.</i>	12
2.2	<i>Technologies et investissements liés au réseau électrique intelligent.</i>	13
2.3	<i>Architecture du réseau Über-FiWi.</i>	20
3.1	<i>Schémas de protection des PONs définis par ITU-T.</i>	24
3.2	<i>Les architectures simple et en cascade du EPON.</i>	25
3.3	<i>Quatre cellules couvrant une surface de forme carrée.</i>	29
4.1	<i>Modèle des CAPEX</i>	33
4.2	<i>Modèle des OPEX</i>	35
4.3	<i>Approches de protection d'un réseau d'accès</i>	36
4.4	<i>Durée totale de réparation.</i>	37
4.5	<i>Schéma en bloc de la station de base.</i>	40
5.1	<i>Couches du réseau.</i>	45
5.2	<i>Fonctions du réseau.</i>	46
5.3	<i>Modèles d'intégration.</i>	48
5.4	<i>Value Network de l'infrastructure de communication du réseau électrique intelligent.</i>	52
6.1	<i>TCO par utilisateur du réseau Über-FiWi pour les zones urbaines.</i>	60
6.2	<i>TCO par utilisateur du réseau Über-FiWi pour les zones rurales.</i>	61

6.3	<i>Variation (%) des CAPEX par utilisateur du EPON pour une variation de +20% and -20% des différents paramètres.</i>	62
6.4	<i>Variation (%) des OPEX par utilisateur du EPON pour une variation de +20% and -20% des différents paramètres.</i>	63
6.5	<i>TCO par utilisateur des schémas de protection du EPON pour les zones urbaines. .</i>	64
6.6	<i>TCO par utilisateur des schémas de protection du EPON pour les zones rurales. . .</i>	65
6.7	<i>TCO par utilisateur et par acteur du réseau Über-FiWi pour les zones urbaines. . .</i>	66
6.8	<i>TCO par utilisateur par acteur du réseau Über-FiWi pour les zones rurales. . . .</i>	67
6.9	<i>Risques associés avec l'intermittence de la production énergie éolienne.</i>	68
6.10	<i>Production d'énergie solaire photovoltaïque.</i>	69
6.11	<i>Distributions des PSPs du réseau Über-FiWi.</i>	70
6.12	<i>Distributions des FCCs du réseau Über-FiWi.</i>	71
6.13	<i>Distributions des TCOs du réseau Über-FiWi.</i>	72

Liste des tableaux

6.1	<i>Valeurs des paramètres d'entrée pour l'analyse des CAPEX</i>	58
6.2	<i>Valeurs des paramètres d'entrée pour l'analyse des OPEX</i>	59

Nomenclature

AON	<i>Active Optical Network</i>
AMI	<i>Advanced Metering Infrastructure</i>
AWG	<i>Arrayed Waveguide Grating</i>
AMR	<i>Automated Meter Reading</i>
BS	<i>Base Station</i>
CAPEX	<i>CAPital EXpenditures</i>
CA	<i>Cascaded Architecture</i>
CO	<i>Central Office</i>
CI	<i>Collaborative Implementation</i>
EPON	<i>Ethernet Passive Optical Network</i>
FTTH	<i>Fiber To The Home</i>
FiWi	<i>Fiber Wireless</i>
FIT	<i>Failures In Time</i>
FDM	<i>Frequency Division Multiplexing</i>
GPON	<i>Gigabit Passive Optical Network</i>
HRF	<i>Home Run Fiber</i>

HC	<i>Housing Company</i>
LOS	<i>Line Of Sight</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MAP	<i>Mesh Access Point</i>
MP	<i>Mesh Point</i>
MPP	<i>Mesh Portal Point</i>
NAN	<i>Neighborhood Area Network</i>
NP	<i>Network Provider</i>
NGOA	<i>Next Generation Optical Access</i>
OLT	<i>Optical Line Termination</i>
ONU	<i>Optical Network Unit</i>
OPEX	<i>OPital EXpenditures</i>
PEV	<i>Plug-in Electric Vehicle</i>
PIP	<i>Passive Infrastructure Provider</i>
PON	<i>Passive Optical Network</i>
P2MP	<i>Point-2-MultiPoint</i>
P2P	<i>Point-2-Point</i>
RNC	<i>Radio Network Controller</i>
RN	<i>Remote Node</i>
SLA	<i>Service Level Agreement</i>
SP	<i>Service Provider</i>
SA	<i>Single-stage Architecture</i>

SS	<i>Subscriber Station</i>
TIC	<i>Technologies de l'Information et de Communication</i>
TR	<i>Take Rate</i>
TU	<i>Terminal Unit</i>
TDM	<i>Time Division Multiplexing</i>
TCO	<i>Total Cost of Ownership</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
VI	<i>Vertical Integration</i>
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
WMN	<i>Wireless Mesh Network</i>
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i>
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>

Chapitre 1

Introduction

1.1 Motivations

Les exigences en matière de communication d'un large éventail d'applications potentielles du réseau électrique intelligent ont été récemment quantifiées [1]. Les auteurs concluent qu'une infrastructure évolutive, rapide et fiable est nécessaire pour les communications du réseau électrique intelligent. Bien que *IEEE P2030* ne précise pas une technologie préférée, il est favorable de s'appuyer sur les caractéristiques exceptionnelles des fibres optiques [2]. Il est également favorable d'exploiter les technologies sans fil dans le cas où la fibre n'est pas disponible pour certains points du système.

Une infrastructure de communication évolutive, omniprésente et fiable est cruciale pour le succès du réseau électrique intelligent. La plupart des études précédentes [3] [4] relatives aux communications du réseau électrique intelligent répondent aux besoins technologiques et défis permettant d'assurer la performance et la fiabilité. Par exemple, [5] compare les différentes technologies de communication filaires et sans fil en termes de bande passante, latence et portée de couverture.

La plupart des études antérieures [6] [7] ont mis l'accent sur les problèmes technologiques don-

nant ainsi des indications précieuses sur les avantages et les inconvénients d'un large éventail de technologies de communication réseau électrique intelligent. Cependant, le principal défi d'aujourd'hui est plutôt plus économique que technologique. Nous devons trouver des réponses à de nombreuses questions comme suit :

- Combien coûte le déploiement d'une infrastructure de communication du réseau électrique intelligent ?
- Quelle est la technologie de communication la plus rentable ?
- Comment mettre en place l'infrastructure de communication afin de réduire le TCO ?
- Quel est l'impact des modèles d'intégration des infrastructures sur les coûts ?
- Quel est l'impact de la collaboration sur le TCO tout en tenant compte des risques associés ?

1.2 Contexte et contributions du mémoire

Dans ce travail, nous développons un nouvel outil d'analyse de TCO générique et assez flexible permettant de calculer les coûts globaux liés au déploiement des architectures de communication pour de différents scénarios. La validité de cet outil sera démontrée par un exemple d'infrastructure FiWi de communication du réseau électrique intelligent. Notre outil TCO contient cinq éléments : outil de dimensionnement de réseau, modèle CAPEX, modèle OPEX, et finalement deux outils d'analyse de sensibilité et des risques. Il est utilisé pour évaluer les coûts associés aux différents scénarios définis et identifier les principaux paramètres affectant le TCO. L'outil de dimensionnement permet de fournir la quantité d'équipements et l'infrastructure nécessaires pour faire face à la demande en termes de trafic. De plus, un outil d'analyse de sensibilité est nécessaire en particulier au cas où nous sommes incertains de savoir si les paramètres d'entrée sont réalistes ou non. Cette analyse permet également d'identifier les facteurs clés des coûts qui devraient être considérés lors du déploiement de l'infrastructure de communication.

Notre outil développé d'analyse de TCO sera notre base pour l'investigation des modèles d'inté-

gration des infrastructures de communication du réseau électrique intelligent. De plus, nous considérons différents scénarios de déploiement (type de zone, population, *Take Rate* (TR), etc.). Un outil général d'analyse de TCO a été développé dans [8], dont la contribution principale était une analyse des dépenses en capital et des coûts opérationnels qui peut être appliquée à n'importe quel réseau d'accès à large bande. De nombreuses études technico-économiques précédentes existent. Par exemple, [9] [10] fournissent des modèles d'évaluation du coût des architectures *Next Generation Optical Access* (NGOA). La majorité de ce genre de travaux [11] [12] donnent un bon aperçu sur l'ensemble des coûts globaux de diverses architectures pour différents scénarios. Toutefois, l'évaluation d'un projet de déploiement d'une infrastructure de communication est bien plus que ça. En fait, la majorité des études précédentes ne considèrent que le cas du modèle traditionnel d'intégration verticale. Cependant, en réalité [13], ces coûts sont partagés par plusieurs acteurs. Par conséquent, il est nécessaire de jeter un coup d'œil de plus près sur les gains obtenus grâce à la collaboration, en particulier dans les situations où l'infrastructure ne serait pas naturellement être installée par un seul acteur.

L'idée est de comparer différents modèles d'intégration de l'infrastructure de communication du réseau électrique intelligent à la fois qualitativement et quantitativement en se basant sur notre outil développé d'analyse de TCO. La combinaison des trois dimensions (technologies, coûts et modèles d'intégration) pourrait être une bonne approche pour l'évaluation d'un projet de déploiement. Un premier pas dans cette direction a été fait dans des études récentes. Par exemple, [14] [15] comparent des architectures NGOA pour différents modèles d'intégration et alloue le TCO aux différents acteurs. En outre, [16] présente une approche de partage des coûts du déploiement des réseaux d'accès optiques et examine les gains résultants de la collaboration entre un fournisseur d'infrastructure de télécommunications et un fournisseur de réseau d'énergie.

Ce qui différencie notre travail des études précédentes c'est que nous contribuons par un nouveau modèle d'intégration collaborative, dans lequel nous traitons une infrastructure partagée pour

l'accès à large bande et les communications du réseau électrique intelligent. Nous avons commencé par étudier les modèles d'intégration déjà existants. Pour favoriser la concurrence et permettre la pénétration de la fibre à des prix acceptables surtout dans les zones rurales, nous étudions le concept des architectures NGOA, où l'infrastructure est divisée en termes de propriété. Nous étudions aussi le modèle *Open Access*, où l'infrastructure peut être déployée par un ou plusieurs fournisseurs d'infrastructure, gérée par plusieurs opérateurs de réseaux, et soutient une variété de fournisseurs de services. Les fournisseurs de services sont responsables de l'interaction avec les clients et la résolution des problèmes liés à la facturation, l'authentification, l'autorisation et la confidentialité. Dans ce mémoire, nous étudions également le modèle d'intégration verticale, où l'entreprise agit comme le propriétaire, l'opérateur du réseau et le fournisseur de services. Ce modèle est souvent appliqué par la grande majorité des entreprises de télécommunications depuis des décennies. Il sera notre scénario de référence afin d'identifier l'impact de notre nouveau modèle proposé d'intégration collaborative sur le TCO.

Aujourd'hui, nous avons une évolution du marché vers les bâtiments à énergie positive, qui produisent plus d'énergie qu'ils consomment. Par exemple, *Bouygue*, une société française leader en télécommunications et construction, a lancé le projet *Green Office* qui consiste à créer ce genre de bâtiments. Ainsi, les *Housing Companies* peuvent collaborer en offrant l'énergie positive vers les opérateurs de réseaux. Par conséquent, ce changement de paradigme va impliquer un nouveau modèle d'intégration pour les infrastructures de communication du réseau électrique intelligent.

Cependant, la plupart des sources renouvelables dépendent des conditions météorologiques ce qui implique des variations en termes de livraison. Ainsi, nous pourrions étudier l'impact de l'intermittence de la production des énergies renouvelables en termes de pénalités et TCO. Dans ce travail, nous analysons les risques liés à l'intermittence de l'énergie solaire ainsi que l'énergie éolienne. Nous analysons également les risques associés aux coupures aléatoires des fibres, ce qui représentent la cause la plus fréquente affectant la disponibilité des réseaux d'accès optiques.

1.3 Structure du mémoire

Afin de communiquer efficacement le travail accompli ainsi que les contributions de ce mémoire, nous avons structuré ce document comme suit :

- Le chapitre 2 présente un aperçu sur les infrastructures de communication du réseau électrique intelligent d'une manière générale. Le chapitre commence d'abord par donner une vision globale sur le réseau électrique intelligent. Nous décrivons son concept, ses fonctions majeures ainsi que son évolution. Ensuite, nous décrivons les spécifications techniques des différentes technologies de communication du réseau électrique intelligent proposées dans des études précédentes. Et finalement, nous présentons la solution récemment introduite ; le réseau *Über-FiWi*.
- Le chapitre 3 explique les principes de base relatifs au dimensionnement des réseaux d'accès. Nous disons les bases parce que la réalisation d'une planification complexe pourrait faire l'objet de toute une thèse de doctorat. Les résultats de cette phase vont être les pilotes des composants majeurs du TCO. Par conséquent, nous devons optimiser cette étape. Nous commençons par décrire les étapes de planification des réseaux d'accès optiques avec différentes architectures. Nous détaillons également les étapes de dimensionnement de capacité et de couverture des réseaux d'accès sans fil.
- Le chapitre 4 décrit notre nouvel outil développé d'analyse de TCO global, générique et flexible qui pourrait être adapté à n'importe quelle infrastructure de communication. Cet outil sera utilisé pour évaluer le coût total associé aux différents scénarios définis et identifier les principaux paramètres affectant ce coût. Nous commençons par présenter les différentes variables d'entrées et métriques de sortie. Ensuite, nous décrivons les modèles des CAPEX et OPEX. Finalement, nous détaillons les outils d'analyse de sensibilité et des risques.
- Le chapitre 5 présente d'abord les différentes couches, rôles et acteurs du réseau qui doivent être pris en charge lors de l'exploitation d'un projet de déploiement. Ensuite, nous décrivons

les scénarios de déploiement déjà existants. Finalement, nous introduisons un nouveau modèle d'intégration collaborative.

- Le chapitre 6 présente d'abord les résultats correspondants à notre scénario de référence d'intégration verticale. Nous présentons également une analyse de sensibilité de la partie *Ethernet Passive Optical Network* (EPON) de notre infrastructure ainsi que l'impact des schémas de protection sur les coûts. Ensuite, nous comparons notre modèle proposé d'intégration collaborative avec le scénario traditionnel en se basant sur le TCO. Finalement, nous analysons les risques liés au déploiement du réseau *Über-FiWi*.
- Le chapitre 7 conclut ce mémoire avec un résumé des travaux effectués ainsi que les résultats obtenus. Nous identifions également les travaux futurs possibles.

Chapitre 2

Infrastructures de communication du réseau électrique intelligent

2.1 Introduction

La hausse spectaculaire de la demande d'énergie et les effets du réchauffement climatique ont incité les scientifiques à consacrer leurs recherches à l'exploitation et le développement de ressources énergétiques renouvelables. En contre partie, les gouvernements s'engagent à un contrôle plus serré de la consommation d'énergie pour les clients commerciaux et résidentiels. Des études récentes [17][18][19][20] ont montré que le système traditionnel d'électricité avec ses communications à sens unique ne couvre plus les besoins d'aujourd'hui. En revanche, l'ajout d'un ensemble de fonctionnalités intelligentes avec un système de communication bidirectionnel peut répondre à un nombre assez important de défaillances.

Traditionnellement, le réseau électrique fournit de l'énergie aux locaux de consommation à partir d'un générateur d'énergie centralisé. Le processus de production d'énergie se base sur l'exploitation des sources d'énergie comme le gaz naturel et les combustibles fossiles. Comme indiqué dans [18][21],

les sections de transmission et distribution du réseau électrique contiennent des équipements critiques tels que les lignes de distribution et les sous-stations. Sur la base des statistiques fournies dans [22], 8% en moyenne de la puissance transmise est perdue lors de la distribution en raison des longues distances entre les sous-stations et les locaux des clients. L'un des principaux défis dans l'ancien système électrique est l'absence d'une infrastructure qui offre un approvisionnement sûr et fiable d'énergie ainsi que des mécanismes permettant de contrôler la consommation d'énergie. Par ailleurs, l'exploitation des technologies de l'information et de communication (TIC) peut avoir un rôle majeur dans la résolution des défis actuels des systèmes d'électricité [17][23].

2.2 Vision du réseau électrique intelligent

Le réseau électrique est primordial pour la qualité de vie, la stabilité sociale et la croissance économique tout en servant de base à pratiquement tous les secteurs d'activité. Il est nécessaire aujourd'hui de migrer d'une architecture essentiellement unidirectionnelle, centralisée et hiérarchique à une organisation distribuée, inter-connectée et automatisée. En fait, la consommation mondiale d'énergie devrait augmenter de 44% de 2006 à 2030 [24]. Actuellement, 62% de la production mondiale d'énergie provient du charbon et du gaz, 13% du nucléaire, 16% de l'hydro-électricité et moins de 4% de sources d'énergie renouvelables [24]. Par ailleurs, il y a un désir croissant des consommateurs pour jouer un rôle dans la gestion de l'énergie et de sa conservation. Nous avons été témoins de pannes générales. La majorité étaient dans les zones industrielles en raison du déséquilibre entre la demande et la production d'énergie.

A ce jour, la modernisation du système traditionnel d'électricité s'impose et que nous voyons plusieurs pays investir dans les projets d'évolution du réseau d'électricité. Ces facteurs entraînent la nécessité d'une migration vers le réseau électrique intelligent. En fait, le réseau électrique intelligent est la prochaine génération du réseau électrique qui permet d'améliorer l'efficacité de la production, l'approvisionnement et la consommation d'électricité. Cela sera basé surtout sur la contribution

des TIC. Ces technologies vont permettre aux clients de revendre leur propre énergie au réseau et profiter de la tarification variable en achetant de l'énergie quand elle est moins chère. De plus, ces technologies permettent de diminuer les émissions de carbone en choisissant des sources d'énergie propres. Les opérateurs de réseaux seront en mesure de surveiller automatiquement l'état du réseau et détecter les pannes instantanément. Ils peuvent également informer précisément les utilisateurs lorsque la livraison sera rétablie. Enfin, ils auront une meilleure compréhension de la demande d'énergie en temps quasi-réel.

2.2.1 Concept du réseau électrique intelligent

Il y a beaucoup de points de vue différents concernant le concept du réseau électrique intelligent. En se référant au *European Technology Platform* [25], ce concept est défini comme un réseau électrique qui intègre intelligemment les actions des fournisseurs et consommateurs afin de fournir efficacement une interconnexion durable, économique et sécurisée. *State Grid Corporation*, le plus grand fournisseur d'électricité en Chine [26], définit le réseau électrique intelligent comme un réseau d'électricité intelligent soutenu par les technologies de l'information et de la communication avec un contrôle intelligent de tous les aspects y compris la production, la transmission, la distribution et la consommation. Ainsi, le réseau électrique intelligent peut être résumé comme une intégration de l'infrastructure électrique, d'intelligence distribuée (logiciels, automatisation, traitement de l'information) ainsi que de moyens fiables de communication. Cette intelligence peut être déployée à différents niveaux du réseau (production, distribution, consommation, supervision et contrôle).

Il est envisagé de profiter de toutes les technologies modernes dans la migration du système traditionnel d'énergie vers un nouveau réseau incluant des fonctions plus intelligentes comme [27] :

- **Contrôles autonomes avancés** : amélioration de la fiabilité en augmentant la résilience contre les pannes du système et en réduisant la fréquence des pannes d'électricité.
- **Restaurations autonomes** : la possibilité de restaurer des sections du réseau après une

panne sans intervention des opérateurs, aussi connue sous le nom d'autoguérison.

- **Amélioration de la résilience contre les attaques** : cela est effectué grâce à une meilleure sécurité pour maintenir l'intégrité des données, la confidentialité et l'authenticité.
- **Supporter les sources d'énergie renouvelables** : capacité d'intégrer et d'exploiter tous les types de sources d'énergie renouvelables (solaire, éolienne, etc.) pour faire progresser la durabilité globale d'énergie.
- **Supporter les ressources distribuées** : intégration de tous les types de ressources distribuées (stockage, production, etc.) telles que les *Plug-in Electric Vehicles* (PEVs).
- **Communication bidirectionnelle** : activation de la communication à deux sens entre le consommateur et le fournisseur de réseau de sorte que les utilisateurs finaux puissent participer activement et adapter leur consommation d'énergie en fonction des préférences individuelles (prix, préoccupations environnementales, etc.).
- **Amélioration de la qualité de service** : capacité de superviser et contrôler la qualité de l'énergie fournie à un niveau qui répond aux besoins des clients.
- **Diminuer les coûts d'opération** : fournir un haut niveau de rentabilité du réseau d'énergie à travers l'innovation, la gestion avancée d'énergie, etc.

2.2.2 Fonctions majeures du réseau électrique intelligent

Contrôles autonomes avancés

L'architecture de contrôle de base d'un réseau électrique traditionnel est centralisée au niveau des sites de production. Les technologies de communication au niveau de la distribution et de l'utilisateur final sont presque inexistantes. Donc, il y a un flux d'information réalisé des centres de production vers les utilisateurs finaux. La plupart des réseaux électriques intelligents proposés ont des architectures de contrôle qui ajoutent des dispositifs de communication au niveau de la distribution et au niveau de l'utilisateur final permettant un flux bidirectionnel d'informations.

Toutefois, les actions de contrôle résident toujours à un emplacement centralisé. La disponibilité et la flexibilité d'opération du réseau électrique ne peuvent être améliorées qu'avec des contrôles locaux et autonomes des éléments actifs ajoutés aux parties de distribution. Le réseau électrique intelligent sera donc formé par de nombreux *Microgrids* qui sont contrôlés de manière indépendante et avec des sources de production locales. Avec le choix des technologies de production décentralisées, la restauration des catastrophes pourrait être significativement améliorée.

Stockage d'énergie

Un avantage évident de l'ajout des systèmes de stockage d'énergie dans un réseau électrique, en particulier dans ses parties de distribution, est l'amélioration de la disponibilité d'énergie. Un exemple important d'intégration des systèmes de stockage d'énergie est représenté par les interactions avec les PEVs. Les PEVs représentent à la fois une variation en temps et déplacement géographique d'une ressource de stockage d'énergie. Il y a deux aspects concernant l'intégration des systèmes de stockage d'énergie : la répartition géographique et le profil de la livraison d'énergie. Il existe différentes approches pour intégrer les systèmes de stockage dans le réseau. Une façon est d'ajouter ces systèmes du côté du réseau, habituellement au niveau des sous-stations. Cette solution permet au fournisseur du réseau de garder le contrôle sur les services de stockage d'énergie. L'autre approche consiste à localiser ces systèmes du côté de l'utilisateur. Cette approche implique généralement une faible quantité d'énergie stockée dans chaque site. Par contre, elle permet de répondre plus facilement aux besoins de livraison pour chaque utilisateur. L'autre aspect important de systèmes de stockage d'énergie est lié à la façon dont ils peuvent délivrer leur énergie stockée. Deux profils peuvent être identifiés dans le fonctionnement des dispositifs de stockage d'énergie : les profils de livraison de puissance caractérisés par des échanges d'énergie courts et fréquents et les profils caractérisés par des échanges d'énergie longs et non fréquents.

Production distribuée

La production distribuée donne l'une des différences technologiques fondamentales entre le réseau d'électricité traditionnel et le réseau intelligent. En fait, elle offre à la partie de distribution du réseau la possibilité d'être une partie active du système. Cette caractéristique permet d'être vraiment en mesure d'opérer la distribution d'une manière plus flexible. Elle permet également de fournir une meilleure disponibilité de la livraison locale d'électricité, en particulier en cas de catastrophe. L'utilisation de la production distribuée est fondamentale pour parvenir à une livraison plus résistante et fiable en cas de panne. Pour les sites importants tels qu'un centre de données ou campus, l'ajout de la production distribuée peut faciliter la résolution des problèmes de disponibilité et d'efficacité des systèmes de climatisation.

2.2.3 Évolution du réseau électrique intelligent

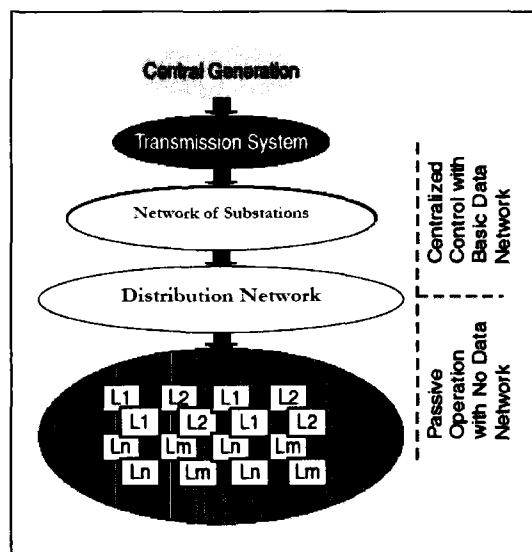


FIGURE 2.1 – Réseau d'électricité traditionnel.

Le réseau électrique traditionnel, comme le montre la figure 2.1 [28], est un système strictement hiérarchique dans lequel les centrales au sommet de l'architecture assurent la livraison d'énergie

aux clients au bas de la chaîne. Le système est essentiellement un *pipeline* à sens unique où la source n'a pas d'information en temps réel sur les paramètres de service des terminaux. La figure 2.2 illustre l'évolution des technologies du réseau électrique intelligent ainsi que leur impact sur

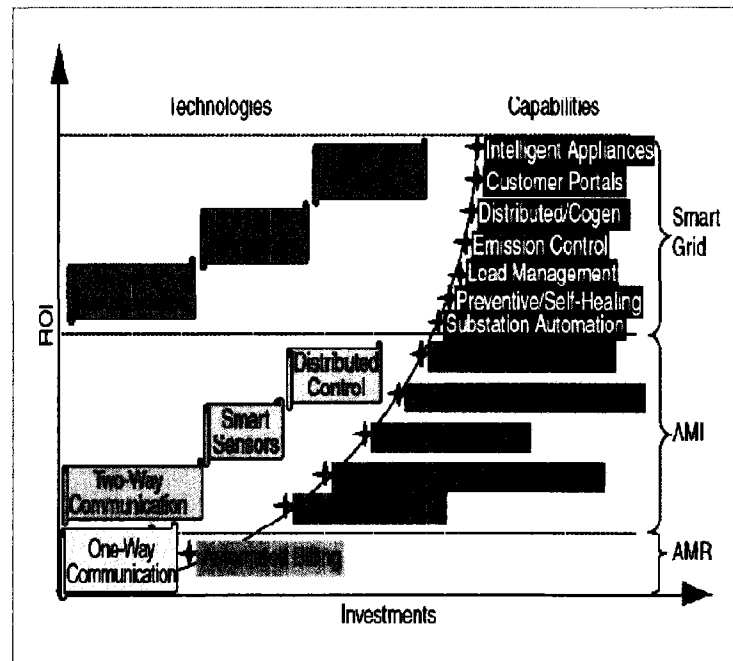


FIGURE 2.2 – Technologies et investissements liés au réseau électrique intelligent.

les investissements [28]. Vu que près de 90% de toutes les pannes d'électricité et des perturbations ont leurs racines dans la partie de distribution, l'évolution vers le réseau électrique intelligent doit commencer au bas de la chaîne, à partir du système de distribution. Plutôt que d'investir dans *Automated Meter Reading* (AMR), les services publics à travers le monde se sont dirigés vers *Advanced Metering Infrastructure* (AMI). AMI propose un système bidirectionnel ainsi que la possibilité de modifier les paramètres *Service Level Agreement* (SLA) des utilisateurs. Grâce à l'AMI, les fournisseurs de réseau peuvent atteindre leurs objectifs de base pour la gestion de la charge et la protection des revenus. Ils peuvent non seulement obtenir des informations instantanées sur la demande individuelle, mais aussi imposer certaines contraintes sur la consommation.

Production distribuée

La production distribuée donne l'une des différences technologiques fondamentales entre le réseau d'électricité traditionnel et le réseau intelligent. En fait, elle offre à la partie de distribution du réseau la possibilité d'être une partie active du système. Cette caractéristique permet d'être vraiment en mesure d'opérer la distribution d'une manière plus flexible. Elle permet également de fournir une meilleure disponibilité de la livraison locale d'électricité, en particulier en cas de catastrophe. L'utilisation de la production distribuée est fondamentale pour parvenir à une livraison plus résistante et fiable en cas de panne. Pour les sites importants tels qu'un centre de données ou campus, l'ajout de la production distribuée peut faciliter la résolution des problèmes de disponibilité et d'efficacité des systèmes de climatisation.

2.2.3 Évolution du réseau électrique intelligent

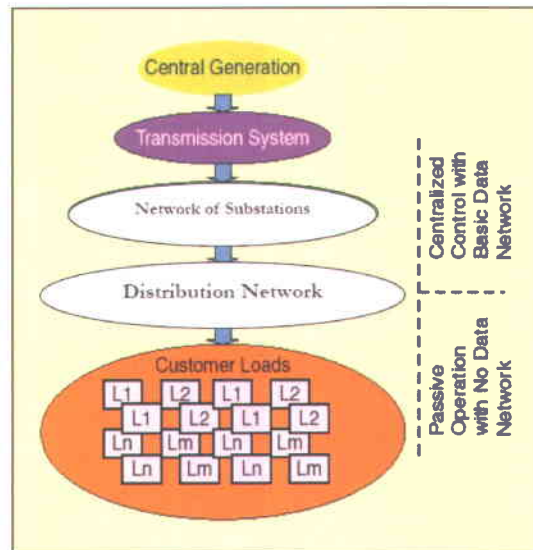


FIGURE 2.1 – Réseau d'électricité traditionnel.

Le réseau électrique traditionnel, comme le montre la figure 2.1 [28], est un système strictement hiérarchique dans lequel les centrales au sommet de l'architecture assurent la livraison d'énergie

aux clients au bas de la chaîne. Le système est essentiellement un *pipeline* à sens unique où la source n'a pas d'information en temps réel sur les paramètres de service des terminaux. La figure 2.2 illustre l'évolution des technologies du réseau électrique intelligent ainsi que leur impact sur

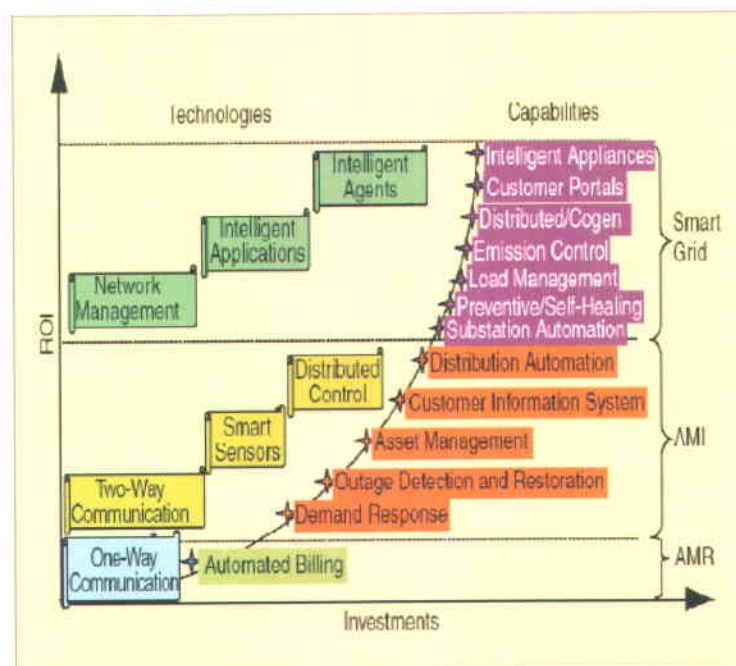


FIGURE 2.2 – Technologies et investissements liés au réseau électrique intelligent.

les investissements [28]. Vu que près de 90% de toutes les pannes d'électricité et des perturbations ont leurs racines dans la partie de distribution, l'évolution vers le réseau électrique intelligent doit commencer au bas de la chaîne, à partir du système de distribution. Plutôt que d'investir dans *Automated Meter Reading* (AMR), les services publics à travers le monde se sont dirigés vers *Advanced Metering Infrastructure* (AMI). AMI propose un système bidirectionnel ainsi que la possibilité de modifier les paramètres *Service Level Agreement* (SLA) des utilisateurs. Grâce à l'AMI, les fournisseurs de réseau peuvent atteindre leurs objectifs de base pour la gestion de la charge et la protection des revenus. Ils peuvent non seulement obtenir des informations instantanées sur la demande individuelle, mais aussi imposer certaines contraintes sur la consommation.

2.3 Technologies de communication du réseau électrique intelligent

Cette section présente un aperçu des différentes infrastructures permettant de satisfaire les besoins des communications du réseau électrique intelligent. Tel que discuté auparavant et en raison des défis abordés, l'exigence d'innovations fondamentales au réseau d'électricité d'aujourd'hui est indispensable. Selon des recherches antérieures [21][29], les technologies de communication peuvent améliorer les systèmes d'électricité et relever les défis pour les nouvelles exigences des prochaines années. Le développement des applications du réseau électrique intelligent exige une plate-forme de communication fiable et flexible permettant de contrôler le réseau et réagir en temps réel dans les situations critiques [30].

Aujourd'hui, une large variété de technologies de communication sont disponibles. Celles-ci comprennent les réseaux filaires et sans fil. Le choix de la meilleure solution exige une compréhension des forces et limitations techniques des différentes alternatives, ainsi que l'analyse des coûts de déploiement et d'exploitation. Pour les technologies filaires, nous considérons l'accès à fibre optique en raison de sa capacité d'offrir une bande passante énorme, sa capacité de transmission à longue distance, sa robustesse ainsi que son faible coût de maintenance. Un inconvénient majeur de cette technologie est qu'elle souffre des coûts élevés de déploiement [31] [32].

2.3.1 Réseaux d'accès optiques

La fibre optique présente un potentiel de bande passante sans précédent qui est bien au-delà de la radio et de tout autre médium de transmission. Pour mettre ce potentiel en perspective, il est intéressant de noter que la bande passante totale de la radio sur la planète Terre n'est pas plus que 25 GHz.

Une installation de fibre prend le plus souvent la forme d'un *Passive Optical Network* (PON),

dans lequel un *Optical Line Termination* (OLT) est situé au *Central Office* (CO) et serve un ensemble de *Optical Network Units* (ONUs) situés à chacun des sites des clients. La bande passante par client des réseaux PONs est déterminée par la capacité du *backhaul*, les débits moyens des ONUs ainsi que le nombre d'ONUs qui partagent la connexion avec l'OLT. Les PONs sont déployés [33] en raison de leur longévité, leur faible atténuation et leur énorme bande passante. Nous avons les *Time Division Multiplexing* (TDM) PONs, où l'infrastructure de fibre optique transmet un canal de longueur d'onde ascendant (des abonnés vers le CO) et un autre canal de longueur d'onde descendant (du CO vers les abonnés).

Les standards les plus déployés d'aujourd'hui sont le *IEEE 802.3ah Ethernet PON* (EPON) avec un débit symétrique de 1,25 Gbps ainsi que le *UIT-T G.984 Gigabit PON* (GPON) avec des débits de lignes ascendante et descendante de 1,244 Gbps et 2,488 Gbps, respectivement. D'autre part, le *Wavelength Division Multiplexing* (WDM)-PON a été activement étudié comme une technologie prometteuse pour les réseaux d'accès optiques de prochaines générations. Les WDM-PONs utilisent un (de)multiplexeur de longueur d'onde au niveau du *Remote Node* (RN). Cette technologie nécessite le remplacement du diviseur de puissance actuel installé par les TDM-PONs par un *Arrayed Waveguide Grating* (AWG). Cette approche de migration n'est pas souhaitable car elle nécessite des installations extérieures ce qui implique la perturbation des abonnés existants.

PON conventionnels

De façon générale, les PONs utilisent une topologie de réseau en arbre reliant l'OLT à sa racine et les ONU à ses feuilles. Un répartiteur passif est situé au niveau du RN. Les PONs utilisent la transmission en duplex, où les trafics descendant et ascendant sont acheminés sur des longueurs d'onde distinctes. Dans le sens descendant, le trafic est diffusé à tous les ONUs à travers le diviseur de puissance. Dans le sens montant, les transmissions provenant des ONUs sont rassemblées au niveau du diviseur de puissance.

TDM-PON haut débit

Des débits plus élevés sont nécessaires pour soutenir les applications émergentes gourmandes en bande passante. Cette solution maintient l'architecture classique du réseau TDM-PON, sauf que les canaux en sens montant et descendant fonctionnent à des débits de 10 Gbps ou plus [41].

WDM-PON avec radiodiffusion de Longueur d'onde

Ce type de réseau déploie de multiples canaux de longueur d'onde. Chacun de ces canaux est diffusé à tous les ONUs connectés et il est utilisé pour une transmission bidirectionnelle. Chaque WDM ONU sélectionne une longueur d'onde avec un filtre passe-bande et réutilise le signal provenant de l'OLT pour la transmission de données en sens montant. Cela est fait au moyen de techniques de démodulation. En plus d'augmenter la bande passante disponible, un avantage de WDM est l'utilisation de plusieurs canaux dans les deux sens.

WDM-PON multiple-étages avec routage de longueur d'onde

Dans cette architecture, le diviseur de puissance passif classique est remplacé par un (de)multiplexeur de longueur d'onde de telle sorte que chacun des canaux *feeder fiber* est acheminé vers une fibre de distribution dédiée. Une longueur d'onde peut être dédiée à une seule ONU ou partagé par plusieurs ONUs. Dans ce dernier cas, les fibres de distribution contiennent un ou plusieurs étages supplémentaires de sorte que chaque étage est constitué d'un diviseur de puissance.

PON à longue portée

Ce type de réseau augmente la portée des réseaux PONs de manière significative. Il offre d'importantes économies en réduisant le nombre de conversions optique-électrique-optique nécessaires.

2.3.2 Réseaux d'accès sans fil

Parmi les avantages des réseaux d'accès sans fil, nous pouvons citer le faible coût de déploiement ainsi que l'accessibilité quasi-universelle avec les fonctionnalités de mobilité et ubiquité. Cependant, cette technologie flexible a un débit de données limité qui va jusqu'à 1 Gbps. De plus, elle souffre d'un degré élevé d'interférences et d'une faible portée de transmission [34][35].

Alors que le monde sans fil est riche de différents technologies d'accès radio (réseaux cellulaires, *Wireless Personal Area Network* (WPAN), *Wireless Local Area Network* (WLAN), etc.), la recherche va de l'avant vers les systèmes de communication futurs avec des infrastructures à faible coût, faible puissance de calcul et haute sécurité. Actuellement, de nombreuses technologies d'accès radio sont disponibles telles que les réseaux cellulaires (GSM, UMTS, HSPA, etc.), DVB-T, WLAN (Hiperlan, IEEE 802.11, etc.) et WPAN (Bluetooth).

WiMAX

Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX) est une technologie sans fil à large bande. WiMAX a une topologie point-à-multipoint (P2MP), où la station de base (BS) serve les stations des abonnés (SSs). La performance des réseaux WiMAX dépend des bandes de fréquences disponibles [36]. Le WiMAX fixe est basé sur la norme *IEEE 802.16-2004* fonctionnant dans la bande 2-11 GHz ; le WiMAX mobile est basé sur la norme *IEEE 802.16e* fonctionnant dans la bande 2-6 GHz. Le WiMAX fixe utilise OFMDA alors que le WiMAX mobile utilise la technique SOFDMA dérivée de l'OFDMA mais qui supporte une large gamme de bandes passantes afin de répondre avec souplesse aux exigences des applications. La première norme de WiMAX a été créée dans la bande de fréquence 10-66 GHz fournissant jusqu'à 75 Mbps en connexion *Line Of Sight* (LOS) avec une portée de plus de 48 km [37]. Cependant, les interférences dans les zones urbaines limitent les débits à environ 22 Mbps et les distances à moins de 7 km, quoique nous pouvons avoir des débits plus élevées en réduisant la distance. La couche physique de WiMAX transfère les

données bidirectionnelles au moyen du TDD ou FDD. Par ailleurs, WiMAX est orienté connexion, c'est-à-dire que les connexions doivent être établies avant de transmettre des données entre la station de base et les clients. Chaque connexion est identifiée par un identifiant de 16 bits. La couche MAC est responsable de l'attribution de cet identifiant ainsi que l'allocation de bande passante pour les SSs.

Réseaux maillés sans fil

Les réseaux maillés sans fil (WMNs) utilisent des communications multi-sauts pour acheminer le trafic vers et à partir des nœuds d'entrée. Contrairement aux WLANs classiques et aux réseaux mobiles ad hoc, les WMNs fournissent une plus grande souplesse ainsi que meilleure fiabilité et performance [38]. Les WMNs peuvent être classés en WMNs d'infrastructures, clients, et hybrides. Pour un WMN d'infrastructure, un routeur n'a pas de mobilité et a plus de fonctions qu'un routeur normal. Entre autres, un routeur exécute des fonctions de maillage et agit comme une passerelle. Dans un WMN client, les clients exercent ces fonctions par eux-mêmes.

Réseaux mobiles cellulaires

Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) a été développé par l'ETSI et opère dans la bande 2.1 GHz. UMTS a été défini comme une solution intégrée pour la voix et les données mobiles. Ce système offre aux opérateurs mobiles des capacités à large bande pour leurs consommateurs, en particulier dans les zones urbaines. UMTS utilise la technique d'accès multiple W-CDMA. La station de base est souvent située à distance du contrôleur d'accès au réseau et utilise des fibres ou bien des liaisons sans fil point-à-point (P2P) pour se connecter au contrôleur. La capacité de l'UMTS peut être considérablement augmentée par l'utilisation de secteurs multiples.

L'efficacité spectrale des réseaux mobiles a été fortement augmentée avec l'introduction du HSDPA, HSUPA et plus récemment le HSPA+. HSPA est le réseau cellulaire successeur de l'UMTS.

Il promet des débits de données plus élevés, des capacités de cellule plus grandes ainsi qu'un délai réduit comparé à l'UMTS. HSPA+ permet des vitesses théoriques des liaisons descendante et montante de 42 Mbps et 11 Mbps, respectivement. Cependant, les interférences, en particulier dans les zones urbaines, limitent les débits en liaison descendante à environ 30 Mbps et en liaison montante à environ 6 Mbps.

Long Term Evolution (LTE) est la technologie mobile cellulaire la plus récente. LTE est commercialisée sous le nom des technologies radio de quatrième génération (4G). Ce réseau utilise SOFDMA comme technique d'accès multiple et supporte des largeurs de bande variables de 1,4 à 20 MHz. LTE utilise la bande de 2,6 GHz. À l'avenir, LTE va probablement utiliser la bande des 800 MHz.

2.3.3 Réseaux *Über-FiWi*

Les réseaux d'accès *FiWi* combinent la fiabilité, la robustesse et la haute capacité des réseaux optiques ainsi que la flexibilité, l'ubiquité et les économies en termes de coûts des réseaux sans fil. Pour offrir des débits allant jusqu'à 200 Mbps par utilisateur, il est essentiel de remplacer les architectures d'aujourd'hui avec des réseaux *FiWi* intégrés d'accès à large bande. Toute solution viable de communication du réseau électrique intelligent doit répondre à un certain nombre d'exigences clés. Les fibres sont bien adaptées pour transporter la quantité volumineuse de données recueillies à chaque station de puissance et de la transmettre au centre de contrôle du réseau intelligent. De plus, l'infrastructure de communication doit permettre des mesures en temps réel.

Pour répondre aux exigences rigoureuses du réseau électrique intelligent, un large éventail de technologies de communication filaires et sans fil possibles ont été proposées [39] telles que xDSL, câble modem, PLC, WiFi, etc. Chaque solution a ses propres avantages et inconvénients ce qui fait que les entreprises ont du mal à trouver une ou un groupe de technologies qui s'adapte à toutes les exigences des communication du réseau électrique intelligent. Après avoir discuté en

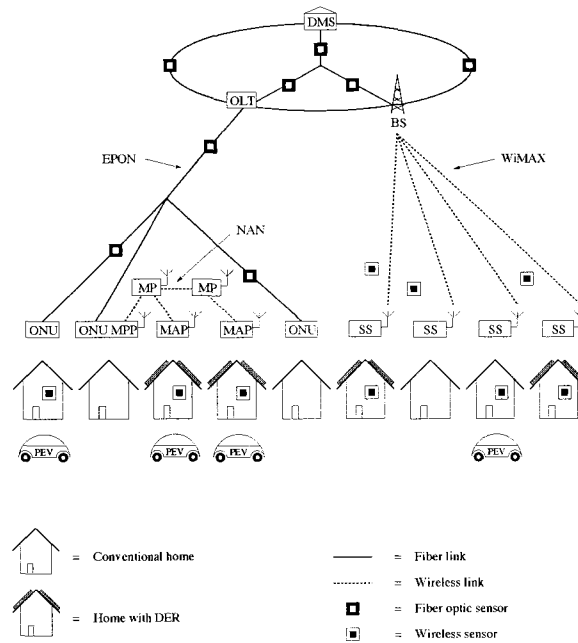


FIGURE 2.3 – Architecture du réseau *Über-FiWi*.

détail les avantages et les inconvénients d'une variété de technologies disponibles, l'étude récente [40] a élaboré une justification des choix de quelques technologies. Elle a également présenté leurs capacités à construire des infrastructures de communication simples, efficaces et à faibles coûts. Deux technologies importantes qui vont jouer des rôles clés sont IEEE 802.3ah EPON et IEEE 802.16 WiMAX. EPON et WiMAX peuvent être montés en cascade. Toutefois, étant donné les similitudes de ces deux technologies (topologie P2MP), ils sont plus susceptibles de cibler le même segment plutôt que de couvrir différents segments du réseau. En d'autres termes, les opérateurs de réseaux doivent faire un choix entre EPON et WiMAX en fonction d'un certain nombre de facteurs.

Tandis que la fibre est le moyen de communication préféré pour les zones urbaines, WiMAX, avec sa faible latence, peut être utilisé dans les zones rurales, où la fibre n'est pas disponible ou disponible pour certains mais pas tous les points de distribution d'énergie. Bien que la majorité aient parié sur LTE pour devenir la technologie sans fil dominante, nous nous attendons à ce que

WiMAX joue un rôle majeur dans les nouvelles applications du réseau électrique intelligent [41].

La figure 2.3 illustre l'architecture de réseau *Über-FiWi* proposée dans [42], une infrastructure partagée pour les communications du réseau électrique intelligent et l'accès à large bande. Un réseau optique avec topologie en anneau est utilisé pour interconnecter le système de gestion de distribution avec une ou plusieurs BSs et OLTs. Un ensemble d'abonnés se connecte à une station de base via des SSs. Dans les milieux densément peuplés ou riches en fibres, les abonnés se connectent à un EPON OLT via ONUs. Notons qu'un ONU installé dans le local d'un abonné peut être partagé par les abonnés à proximité à travers un réseau *WLAN-based mesh neighborhood area network* (NAN), ce qui permet de réduire considérablement la quantité requise d'infrastructure de fibre. Ce réseau se compose des trois types de nœud :

- (i) *Mesh Portal Point* (MPP), qui est situé au site de l'ONU et agit comme l'interface de NAN ;
- (ii) *Mesh Access Point* (MAP), qui donnent l'accès à la NAN aux abonnés ;
- (iii) *Mesh Point* (MP), qui sont les nœuds intermédiaires de NAN.

Pour surveiller l'état des composants du réseau de distribution d'énergie tels que les interrupteurs, régulateurs ou transformateurs, des capteurs à fibre optique et sans fil devraient être placés. Nous pouvons citer par exemple les capteurs électriques de courant.

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par présenter une vision globale du réseau électrique intelligent. Nous avons décrit son concept ainsi que ses fonctions majeures telles que les contrôles avancés autonomes, le stockage d'énergie, la production distribuée, etc. De plus, nous avons introduit l'approche d'évolution du réseau traditionnel d'électricité vers le réseau électrique intelligent.

Nous avons également présenté les spécifications techniques des différentes technologies de communication optiques et sans fil du réseau électrique intelligent proposées dans des études précédentes. Finalement, nous avons introduit le réseau *Über-FiWi*.

Chapitre 3

Dimensionnement et planification des réseaux

3.1 Introduction

Le dimensionnement du réseau consiste à estimer la quantité nécessaire d'équipements et infrastructure afin de satisfaire à la demande en termes de trafic tout en tenant compte des particularités du réseau ainsi que de sa topologie. Les métriques de sortie de cet outil vont être des pilotes importants pour les composantes majeurs du coût total. Par conséquent, nous devons optimiser cette étape dans le but de diminuer les coûts.

Le dimensionnement du réseau est une phase très importante dans une étude technico-économique. Dans ce travail, nous considérons les bases de la planification du réseau. Nous disons les bases parce que la réalisation d'une planification complexe pourrait faire l'objet de toute une thèse. La planification d'un réseau n'est pas une chose facile vu que beaucoup de choses doivent être prises en considération. Par exemple, la zone géographique doit être prise en compte, vu que le signal se comporte différemment dans un environnement avec des immeubles de grande hauteur, avec des

montagnes ou de l'eau, etc. Par conséquent, les effets de propagation diffèrent selon la région : urbaine, suburbaine, ou rurale. En outre, chaque station de base doit avoir un nombre suffisant de canaux pour gérer les abonnés dans une région spécifique. Tout cela doit être fait afin d'obtenir la meilleure couverture possible. La position de la station de base peut varier selon la région. En milieu urbain, il est préférable de les placer sur les toits des bâtiments. De cette façon, nous les traitons comme des points d'accès pour les utilisateurs à l'intérieur de la maison.

3.2 Réseaux d'accès optiques

Il existe deux catégories principales : les réseaux optiques passifs et actifs. Les réseaux optiques actifs (AONs) peuvent être aussi divisés en deux catégories. La première architecture est un réseau P2P qui propose une fibre dédiée pour chaque utilisateur. Pour la deuxième architecture, un commutateur actif est déployé au niveau du RN à côté des utilisateurs finaux, et une seule fibre est nécessaire pour la connexion entre le CO et le commutateur actif. Les PONs sont des réseaux P2MP basé sur des diviseurs de puissance passifs. Les deux systèmes TDM-PON les plus importants sont : IEEE 802.3ah EPON et l'UIT-T G.984.1 GPON. La nouvelle génération des PONs comprend les PONs avec longue portée ainsi que les WDM-PONs.

Il est également important de réaliser des réseaux PONs avec une grande fiabilité tout en tenant compte des contraintes économiques. Le coût et la disponibilité d'un réseau PON avec protection dépendent fortement de ce qui est protégé. Les schémas de protection des PONs sont définis dans la recommandation ITU-T G.983.1, appelés type A, B, C, et D, comme présenté dans la figure 3.1 :

- **Type A** : Seul le *feeder fiber* est redondant. En case de détection d'une coupure de cette fibre, le système de protection passe à automatiquement la fibre de rechange.
- **Type B** : Duplication de la partie commune de la PON, c'est-à-dire le *feeder fiber* et la OLT.
- **Type C** : Duplication totale des ressources du PON.
- **Type D** : C'est la plus fiable des quatre schémas de protection des PONs. Cette configuration

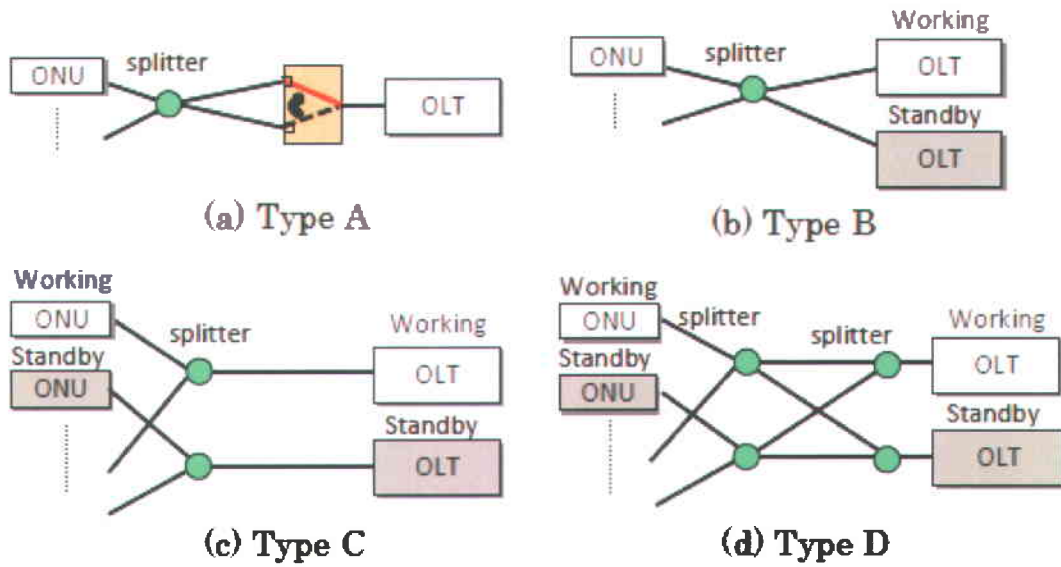


FIGURE 3.1 – Schémas de protection des PONs définis par ITU-T.

est rarement déployée en raison de sa complexité.

Les réseaux optiques ont une limitation de portée de la fibre entre l'OLT et les ONUs. Par exemple, pour un réseau EPON, chaque OLT peut servir les clients dans une zone d'environ 1200 km². En effet, la portée maximale de la fibre entre l'OLT et les ONUs est réduite à 20 km, afin de garantir un signal optique reçu au-dessus de la sensibilité des récepteurs [43]. De plus, l'OLT a également une limitation sur le nombre de ports connectés au réseau de distribution optique, qui sont regroupés dans des cartes avec généralement 2, 4, ou 8 ports par carte.

La première étape consiste à calculer le nombre de diviseurs de puissance, $N_{Splitter}$, en divisant le nombre de maisons dans la région par le ratio de répartition. Ensuite, nous pouvons calculer le nombre des OLTs, N_{OLT} , par la formule suivante [44] :

$$N_{OLT} = \frac{N_{Splitter}}{N_{Card} \cdot N_{Port}}, \quad (3.1)$$

Où N_{Card} et N_{Port} représentent le nombre de cartes par OLT et le nombre de ports par carte.

L'étape suivante consiste à estimer la longueur de tranchées et de fibres requise en se basant sur des modèles géométriques. Cette tâche peut être effectuée avec un niveau variable de détail, en tenant à la description du scénario géographique, la distribution de la population, la topologie ainsi que l'infrastructure existante. Comme illustré dans la figure 3.2, EPON peut être intégré avec deux

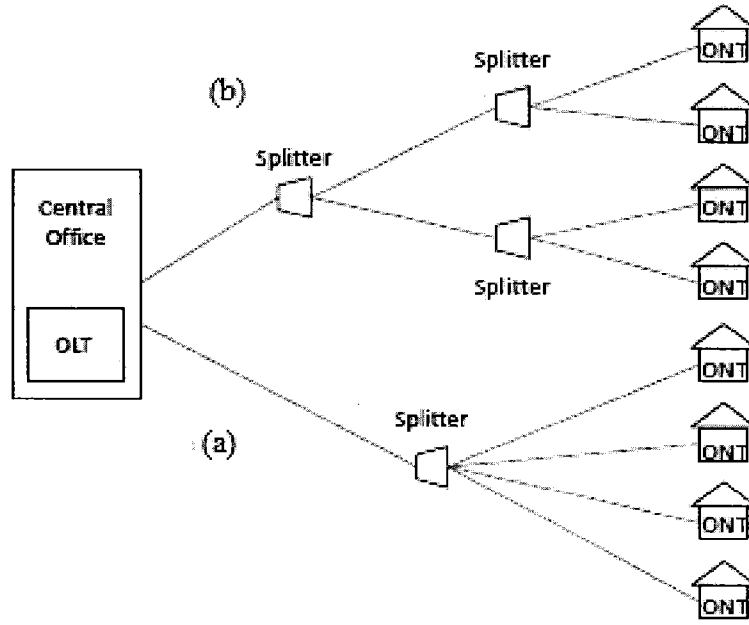


FIGURE 3.2 – Les architectures simple et en cascade du EPON.

différentes topologies : (a) l'architecture simple et (b) en cascade.

Dans le cas d'une architecture simple, la longueur de la fibre est donnée par [44] :

$$L = \beta \cdot \bar{d} + N_{df} \cdot (1 - \beta) \cdot \bar{d}, \quad (3.2)$$

où $\beta \in [0,1]$ est un paramètre important qui représente la position du diviseur de puissance dans le réseau d'accès, $\bar{d}$ désigne la distance moyenne entre OLT et les ONUs, et N_{df} désigne le nombre de fibres de distribution. Au début, nous devons estimer la distance moyenne $\bar{d}$. Nous pouvons estimer ce paramètre en supposant qu'à l'intérieur de la portée d'un OLT, les clients suivent une

distribution uniforme. Ainsi, $\bar{d}$ est donné par la formule suivante :

$$\bar{d} = \frac{2 \cdot R}{3}, \quad (3.3)$$

où R est le rayon moyen de la zone de couverture du OLT. Par exemple, lorsque nous avons une superficie de 300 km², qui est desservie par 8 OLT, donc en moyenne chaque OLT couvre une superficie de 37,5 km². Cela rend le rayon R de chaque cercle d'environ 3,45 km et $\bar{d}$ de 2.3 km.

Dans le cas d'une architecture en cascade avec deux étages, le *feeder fiber* relie l'OLT au premier RN ; la fibre de distribution relie ces RNs aux seconds RNs, et finalement le *drop fiber* relie les seconds RNs aux ONUs. Par conséquent, L peut être calculé comme suit [44] :

$$L = \sum_{k=1}^n (F_e(k) + D_i(k) + D_r(k)), \quad (3.4)$$

où n est le nombre de régions de la zone de couverture, F_e est la longueur du *feeder fiber*, D_i est la longueur de la fibre de distribution, et D_r est la longueur du *drop fiber*.

3.3 Réseaux d'accès sans fils

Les topologies des réseaux d'accès sans fil peuvent être divisées principalement en trois catégories : P2P, P2MP et les réseaux maillés. Les réseaux P2P consistent à une ou plusieurs liaisons fixes utilisant des antennes à chaque extrémité d'une liaison. Un réseau P2MP se compose d'un certain nombre de stations de base, chacune est reliée à plusieurs utilisateurs. Dans une topologie maillée, les terminaux des utilisateurs finaux agissent également comme des routeurs. Les réseaux maillés permettent d'améliorer la couverture d'un réseau d'accès sans fil. Chaque abonné peut effectivement être considéré comme une station de base desservant les abonnés à proximité. De nos jours, WLAN est la technologie sans fil la plus largement déployée. Un WLAN typique se compose d'un point

d'accès et des stations sans fil qui lui sont connectées. Une autre technologie sans fil bien connue est WiMAX qui a généralement une topologie P2MP, où chaque station de base sert plusieurs SSs. D'autre part, le réseau d'accès radio mobile est constitué d'un contrôleur de réseau radio (RNC) contrôlant plusieurs stations de base. Nous pouvons citer, par exemple, le système 3G UMTS.

Afin de procéder à des analyses technico-économiques réelles pour notre infrastructure de communication, les concepts et principes généraux de dimensionnement des réseaux sans fil doivent être compris. Tout d'abord, la sélection de la bande de fréquences à utiliser doit être effectuée. Ensuite, nous présentons les phases de planification de capacité et de couverture. Enfin, nous déterminons le nombre de stations de bases et de secteurs nécessaires pour les différentes zones définies. Le dimensionnement d'un réseau d'accès inclut deux phases : dimensionnement de couverture et dimensionnement de capacité. Dans la première phase, le but est de satisfaire la demande en termes de trafic de tous les clients. Par contre, la deuxième phase consiste à couvrir la plus grande surface avec le plus petit nombre d'équipements.

3.3.1 Dimensionnement de capacité

L'objectif est de calculer le nombre de stations de base et des secteurs nécessaires pour satisfaire les demandes en termes de trafic de tous les utilisateurs pour une zone bien définie. Chaque station de base se compose d'un certain nombre de secteurs. Les capacités de trafic de ces secteurs dépendent en grande partie des méthodes de modulation et codage ainsi que la bande passante du canal radio utilisé. La capacité du secteur est divisée entre tous les utilisateurs dans la zone de couverture du secteur. Dans un système TDM, la même fréquence est utilisée pour les transmissions descendante et ascendante. La capacité d'un secteur de la station de base dépend des conditions de distance ainsi que la liaison entre la station de base et les clients. Les connexions aux clients situés près de la station de base peuvent être fournies en utilisant des schémas de modulation plus efficaces qu'avec les clients qui sont plus loin.

La première étape de planification de capacité est la prédiction du trafic agrégé des utilisateurs dans la zone. Cette métrique dépend du nombre total des maisons ainsi que de la demande de trafic estimée par utilisateur. En outre, une décision importante doit être faite concernant la concentration du trafic. Les utilisateurs ne sont pas susceptibles de transmettre tous avec un maximum de débit en même temps. Par exemple, pour un facteur de concentration du trafic de valeur 10, un secteur avec un débit net maximum de 15 Mbps pourrait être utilisé pour servir 150 abonnés qui souscrivent à un service 512/512 kbps. Le facteur de concentration doit être assez élevé pour minimiser le nombre de secteurs de station de base et suffisamment bas pour garder les clients satisfaits aux services fournis. Le choix d'un facteur de concentration approprié dépend des applications utilisées.

Le nombre maximum d'utilisateurs connectés à un seul secteur, $N_{subs/sector}$, est donné par la formule suivante [45] :

$$N_{subs/sector} = \frac{T_{sector} \cdot C}{T_{AVG}}, \quad (3.5)$$

Avec T_{sector} , T_{AVG} et C représentent le capacité du secteur, le trafic moyen par utilisateur, et le facteur de concentration, respectivement. Le nombre de secteurs est le rapport entre le nombre prévu d'abonnés dans la zone définie et le nombre maximum d'abonnés dans un secteur. Ensuite, par exemple s'il s'agit de 6 secteurs par station de base, le nombre de stations peut alors être déduit en tant que 1/6 de la quantité des secteurs. D'une façon générale, le nombre de BSs pour cette phase est déterminé par la formule suivante :

$$N_{BSs} = \frac{N_{Households}}{N_{subs/sector} \cdot N_{sectors/BS}}. \quad (3.6)$$

3.3.2 Dimensionnement de couverture

La tâche de planification d'un réseau sans fil est liée principalement au processus de dimensionnement de la couverture. Le dimensionnement d'une zone quelconque nécessite en premier lieu l'analyse du bilan de liaison afin d'estimer l'affaiblissement maximal du parcours entre l'abonné

et la station de base. Ensuite, nous devons calculer la portée maximale ou le rayon de couverture maximal en utilisant les modèles de propagation conformément au type de terrain d'étude. Enfin, nous pouvons déterminer le nombre de stations de base et secteurs nécessaires pour la zone donnée.

L'objectif de cette phase est d'assurer que la quantité de stations de base déterminée par la phase de dimensionnement de capacité est suffisante pour atteindre tous les utilisateurs de la zone étudiée. Le nombre de stations de base à déployer est le maximum des résultats des deux phases. La façon optimale de couvrir une zone de service de forme carrée avec 4 cellules identiques est présentée dans la figure 3.3. D'une façon plus générale, le rayon de couverture, $range_{BS}$, pour n

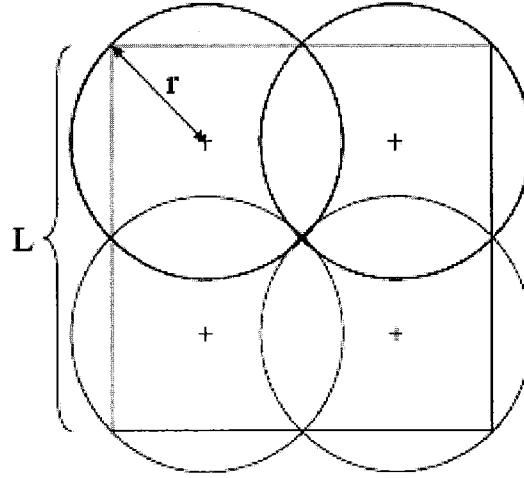


FIGURE 3.3 – Quatre cellules couvrant une surface de forme carrée.

BSs et une surface de L^2 va être égale à $\frac{1}{2^n} \cdot \sqrt{2} \cdot L$ [45]. Par conséquent, le nombre de stations de base est calculé par la formule suivante :

$$N_{BSs} = \frac{1}{2 \cdot range_{BS}} \cdot \sqrt{2} \cdot L. \quad (3.7)$$

En se basant sur les calculs des études précédentes [45] [46], $range_{BS}$ est estimé par : 0.5 km pour les zones urbaines en utilisant les antennes *indoor CPE*, 1.5 km pour les antennes *outdoor CPE* et

10 km pour les zones rurales en utilisant les antennes *outdoor CPE*.

Habituellement, la station de base doit être positionnée de telle manière à ne pas avoir d'interférence. Si nous avons des interférences, l'efficacité spectrale est abaissée, ainsi la capacité du canal est réduite ce qui fait que nous aurons besoin d'un nombre de stations de base plus grand.

Cette section donne un bref aperçu sur le dimensionnement des réseaux sans fil. Dans des cas plus réels, des méthodes de planification plus sophistiquées seraient nécessaires. Les méthodes introduites sont toutefois suffisantes pour les scénarios géographiques théoriques traités dans notre mémoire.

3.4 Conclusion

Ce chapitre explique les principes de base relatifs au dimensionnement des réseaux d'accès. Le dimensionnement du réseau consiste à estimer la quantité nécessaire d'équipements et d'infrastructure afin de satisfaire la demande en termes de trafic tout en tenant compte des particularités du réseau ainsi que de la topologie. Nous devons optimiser cette étape afin de diminuer le TCO.

Nous avons commencé par décrire les phases de dimensionnement des réseaux d'accès optiques avec différents schémas de protection et topologies. Ensuite, nous avons détaillé les différentes étapes de dimensionnement de capacité et couverture des réseaux d'accès sans fil.

Chapitre 4

Outil d'analyse de TCO

4.1 Introduction

Le TCO est défini comme une estimation financière du coût total au cours de la durée de vie d'un système en tenant compte du coût d'acquisition, déploiement, gestion, exploitation et support. Le TCO est divisé en deux catégories : les dépenses d'investissement de capital (CAPEX) et les dépenses d'opération (OPEX). Les dépenses en capital comprennent les coûts liés à l'acquisition, le déploiement, ainsi que la mise à niveau des parties physiques du système. Les dépenses d'exploitation comprennent les coûts de gestion, exploitation, et maintenance du système. Les OPEX peuvent être aussi subdivisées en deux catégories : les éléments contrôlés qui peuvent être calculés en détail et les éléments incontrôlés qui sont influencés par la probabilité que quelque chose se passe mal au cours de la durée de vie du système.

Une approche prometteuse pour réduire les dépenses d'exploitation est d'estimer les facteurs de risque (probabilité de panne, coûts de réparation, pénalités) des différents types de pannes qui peuvent survenir. À cette fin, nous devons trouver des solutions pour réduire les risques les plus élevés en réduisant la probabilité qu'une panne se produise ou en implémentant des schémas de

protection.

4.2 Variables d'entrée

Un scénario est défini comme la description de l'environnement d'intégration d'un système. Chaque scénario complet consiste à définir des valeurs aux différentes variables d'entrée. Cette section présente les paramètres d'entrée de notre outil d'analyse de TCO appliqué à l'infrastructure de communication du réseau électrique intelligent.

4.2.1 Paramètres d'entrée du marché

- Durée de vie du projet ;
- Population de la zone ;
- Taux d'augmentation de la population ;
- Nombre moyen d'habitants par maison ;
- *Take Rate* : Le pourcentage des maisons qui vont s'inscrire au service, etc.

4.2.2 Paramètres d'entrée de la technologie

- Architecture et topologie du réseau ;
- Coûts liés aux équipements (achat, installation, consommation d'énergie) ;
- Coûts d'opération, d'administration, et de maintenance de l'infrastructure, etc.

4.3 Variables de sortie

Nous présentons les métriques de sortie de notre outil d'analyse de TCO appliqué à l'infrastructure de communication du réseau électrique intelligent : *CAPEX*, *OPEX*, *TCO*, etc.

4.4 Modèle CAPEX

Dans cette section, les principaux composants des dépenses en capital sont identifiés pour le déploiement d'un réseau d'accès filaire ou sans fil. Les coûts liés aux phases d'acquisition et de déploiement correspondent principalement à des dépenses d'investissement. Dans certaines études antérieures, les CAPEX comprennent également les coûts des équipements de rechange utilisés pour les réparations des pannes ainsi que les mises à jour du système. La figure 4.1 présente les différentes

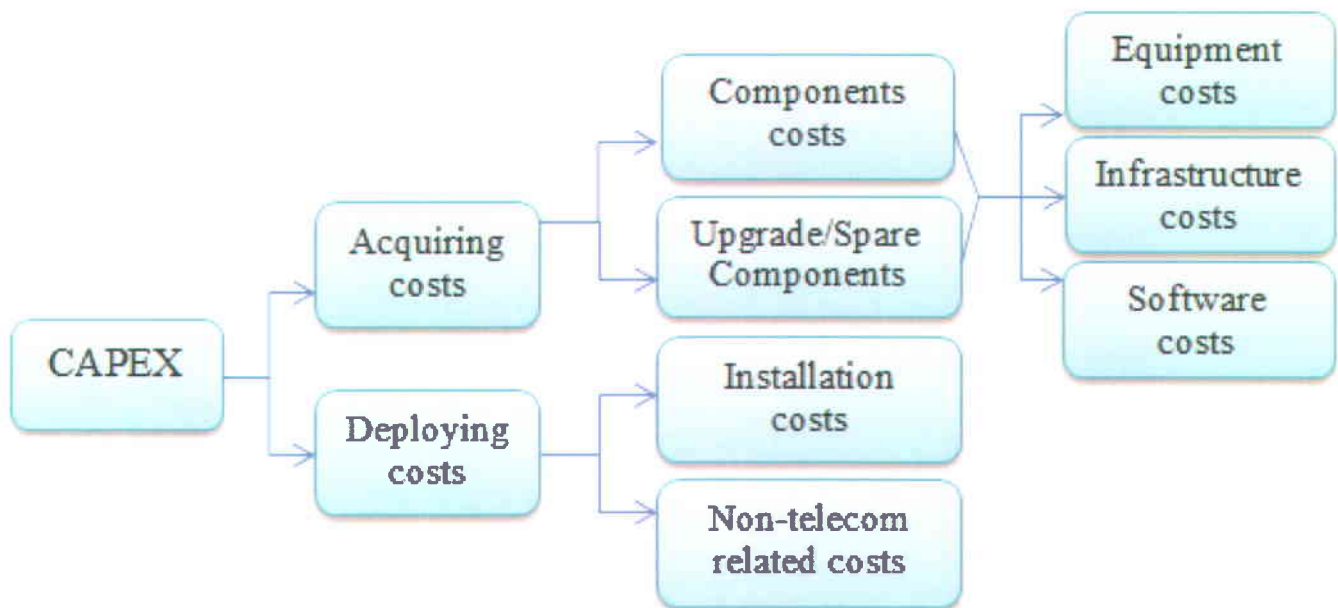


FIGURE 4.1 – Modèle des CAPEX

composantes d'un modèle typique de CAPEX.

Coût des équipements

Le coût des équipements, $Cost_{Equip}$, est donné par :

$$Cost_{Equip} = \sum_c d_c \cdot p_c, \quad (4.1)$$

où c est le type d'équipement. d_c et p_c représentent la quantité nécessaire ainsi que le prix de cet équipement c , respectivement.

Coût d'infrastructure

Cette composante de CAPEX inclut les coûts de câbles (fibre, câble), $Cost_{ca}$ ainsi que les coûts liés aux travaux de génie civil (creuser les tranchées et installer des conduits dans les tranchées), $Cost_{cw}$. Nous devons commencer par calculer la longueur de fibre, L , en utilisant Equ. (3.2) ou Equ. (3.4). Ensuite, nous pouvons calculer le coût d'infrastructure, $Cost_{Infra}$, par la formule suivante :

$$Cost_{Infra} = L \cdot (Cost_{ca} + Cost_{cw}). \quad (4.2)$$

Coût d'installation

Cette composante est le produit du temps d'installation et du salaire des techniciens (TS). Pour les équipements distants (RN, ONU, etc.), il faut aussi prendre en considération le temps de déplacement dans la durée totale d'installation. Nous assumons que la vitesse de déplacement est 20 kmph pour les zones urbaines et 50 kmph pour les zones rurales. Par conséquent, $Cost_{Insta}$ est donnée par la formule suivante [47] :

$$Cost_{Insta} = \sum_i (IT_i + 2 \cdot T_i) \cdot TS \cdot NT_i, \quad (4.3)$$

où IT_i , T_i et NT_i représentent la durée d'installation, la durée de déplacement du CO vers l'équipement défaillant i ainsi que le nombre des techniciens, respectivement.

Coût non-télécom

La principale composante des coûts non-télécom est les frais de licence. Ces frais dépendent généralement de la quantité d'équipements utilisés (par exemple : BS pour WiMAX).

4.5 Modèle OPEX

Dans cette section, les principaux composants des dépenses d'exploitation sont identifiés pour le déploiement d'un réseau d'accès filaire ou sans fil. En général, les dépenses d'exploitation incluent trois parties : les coûts d'opération, administration et maintenance (OAM), les coûts récurrents (consommation d'énergie, refroidissement, location, etc.) ainsi que les coûts de gestion des relations

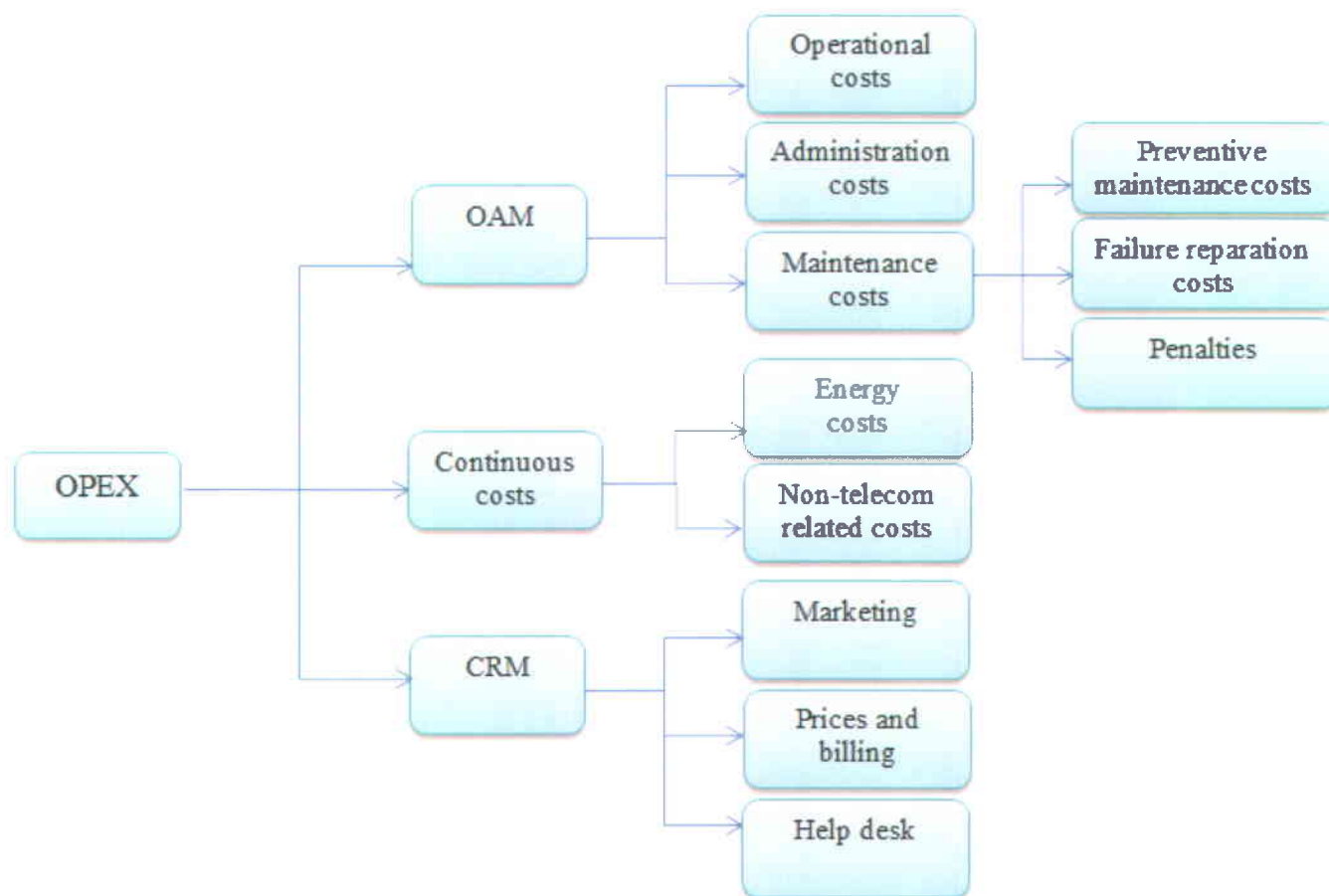


FIGURE 4.2 – Modèle des OPEX

avec les clients (CRM). La figure 4.2 présente les différentes composantes d'un modèle typique d'OPEX.

Les coûts d'opération, administration et maintenance

L'opération consiste à toute planification exécutée sur une base à court terme. Par exemple, nous pouvons citer les aspects de configuration à distance du réseau tels que la gestion des bases de données, le routage réseau, les mises à jour logicielles, etc. L'administration assure le niveau de service une fois qu'il a été mis en place par les éléments du réseau. Et enfin, la maintenance comprend la réalisation de mesures de prévention ainsi que la réparation des pannes. Des études précédentes [45] et [48] estiment que les coûts OAM des réseaux WiMAX sont égaux à 20% des dépenses en capital. Cependant, pour EPON, les processus OAM qui ont été analysés dans les études précédentes [49] [50] sont ceux liés aux pannes du réseau, c'est-à-dire les coûts de maintenance préventive, les coûts de réparation, FR ainsi que les pénalités, P , associées aux interruptions de service.

Nous commençons par discuter les coûts de maintenance préventive. Cette composante OPEX dépend du type de protection implémenté ainsi que de l'approche de protection adoptée. Comme

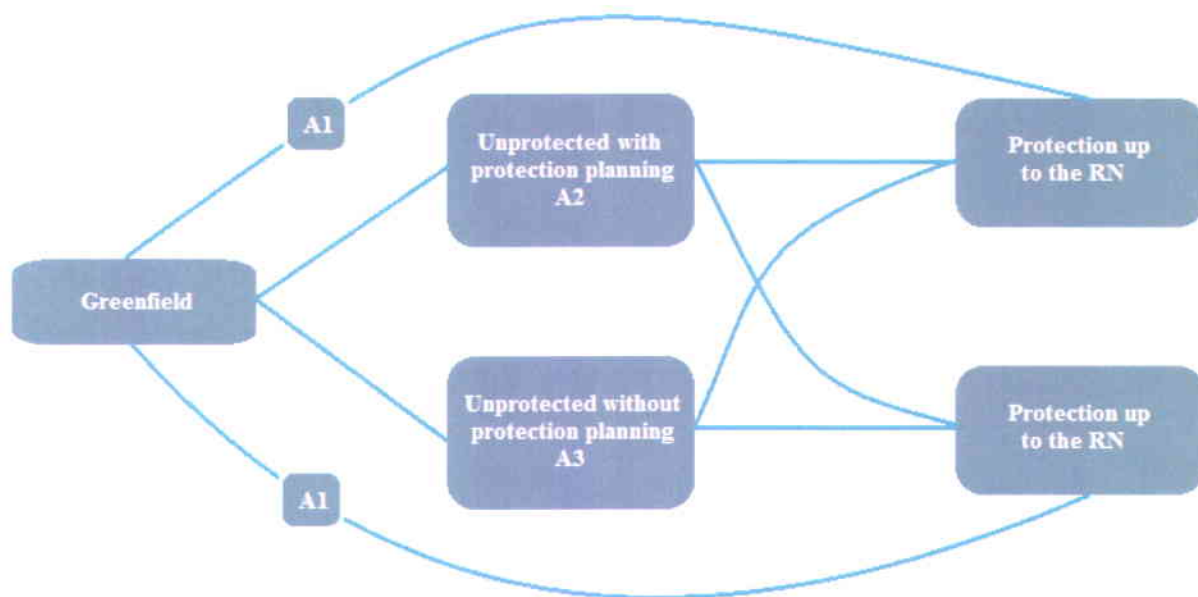


FIGURE 4.3 – Approches de protection d'un réseau d'accès

présenté dans la figure 4.3, trois approches différentes de protection ont été étudiées [51] :

- **A1** : du *Greenfield* directement au scénario avec protection ;
- **A2** : du *Greenfield* au scénario avec protection en passant d'abord par une architecture intermédiaire sans protection sous l'hypothèse que la planification a prévu une protection future et, par conséquent, l'installation comprend des *dark fibers* ;
- **A3** : du *Greenfield* au scénario avec protection en passant d'abord par une architecture intermédiaire sans protection sous l'hypothèse que la planification ne prévoyait pas de protection. Par conséquent, tout matériel nécessaire pour la protection n'a été ni acheté ni installé.

FR dépend globalement de la durée de vie du réseau, du nombre total d'équipements et du salaire des techniciens TS . Pour chaque équipement, il dépend également du nombre de pannes prévu dans le temps FIT , du nombre de techniciens nécessaires NTR_f ainsi que du temps moyen de réparation $MTTR_f$ qui est la valeur moyenne du temps total de réparation ($TTTR$), y compris le

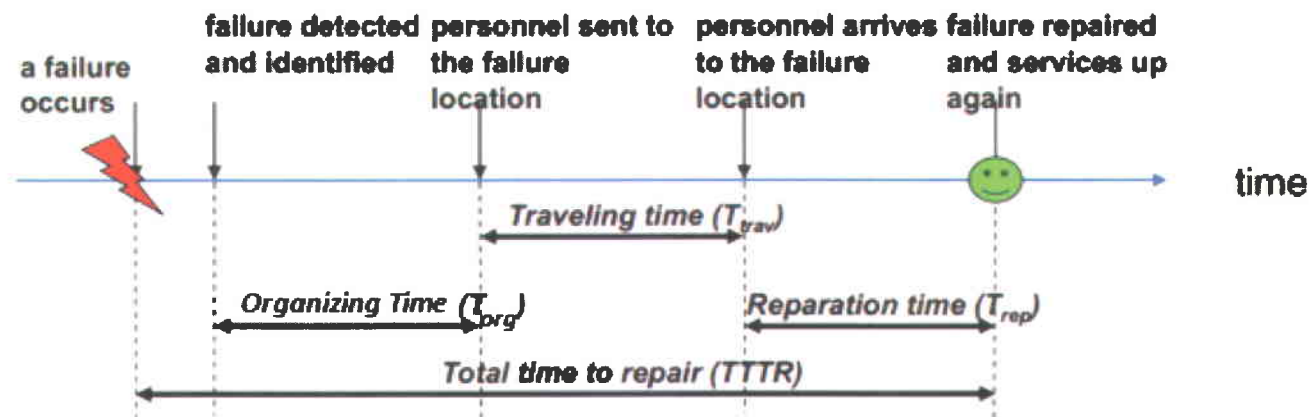


FIGURE 4.4 – Durée totale de réparation.

temps d'attente pour les ressources disponibles, le temps de déplacement, et le temps de réparation. Cela est illustré en détail dans la figure 4.4 [4]. Par conséquent, FR est donnée par [52] :

$$FR = TS \cdot \sum_f (MTTR_f \cdot NTR_f). \quad (4.4)$$

Dans les réseaux d'accès optiques, le facteur le plus important affectant les pannes du système est la coupure de fibre. Ainsi, il est essentiel de prendre clairement en considération cette composante par un modèle probabiliste approprié. Quelques coupures ont été signalées en raison de la perte de résistance de la fibre elle-même. Cependant, malgré la faible probabilité des coupures de fibre, le risque économique associé est appréciable en raison du coût élevé de réparation. La probabilité de coupure de fibre est généralement spécifiée par la distribution *Weibull* à deux paramètres [53]. Cette distribution est largement utilisée dans l'ingénierie de la fiabilité, car elle fournit une analyse de panne précise et des prévisions de risque avec un taux minimal d'erreurs. La probabilité de coupure de fibre, P_F , est exprimée par la formule suivante [53] :

$$P_f(s, l) = 1 - e^{-(\frac{l}{l_0})(\frac{s}{s_0})^m}, \quad (4.5)$$

où l , l_0 , s , s_0 et m représentent la longueur de la fibre, le facteur de normalisation de longueur, la résistance aux pannes, ainsi que les paramètres *Weibull scale* et *Weibull slope*, respectivement. m est l'un des descripteurs primaires de la fiabilité de la fibre à long terme. Ce paramètre indique la façon dont le taux de pannes évolue dans le temps. Lorsque $m = 1$, la distribution de *Weibull* est égale à la distribution exponentielle et nous observons un taux de pannes constant dans le temps. Lorsque $m > 1$, nous avons un taux plus grand dans le temps. Lorsque $m < 1$, le taux de pannes est plus bas. s_0 provoque la variation de la forme de distribution. En modifiant cette valeur, nous pouvons générer un ensemble de courbes très variables modélisant les distributions des pannes. s_0 donne des indications sur les modes de pannes. $s_0 < 1$ indique les coupures dues à la mauvaise qualité de production ou son insuffisance. $s_0 = 1$ indique les pannes aléatoires qui sont indépendants du temps (erreurs humaines, événements naturels). $1 < s_0 < 4$ indique les débuts d'usure (érosion, fatigue). $s_0 > 4$ indique l'usure rapide.

Par ailleurs, une autre métrique importante est *MTBF* qui peut être exprimé comme suit :

$$MTBF = s_0 \cdot \Gamma \left(1 + \frac{1}{m} \right), \quad (4.6)$$

avec :

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} e^{-t} dt. \quad (4.7)$$

Le processus de réparation des pannes est déclenché par des alarmes reçues par le système de gestion de réseau (NMS) ou par le contact de la ligne de service par les clients. Après la détection de panne, un ticket d'incident est créé. Ensuite, un diagnostic de défaut et un isolement est effectué afin de localiser le panne. Selon le type de panne spécifique, les travaux de réparation nécessaires peuvent avoir lieu et des tests seront effectués. Une fois la panne réglée avec succès, le ticket d'incident est fermé.

D'autre part, P peut être exprimé comme le produit de la durée d'interruption de la connexion et l'unité de pénalité conformément à l'accord du SLA. Par conséquent, P est calculé par [54] :

$$P = P_u \cdot \sum_f (MTTR_f \cdot IC_f), \quad (4.8)$$

où P_u et IC_f représentent la pénalité d'une heure d'interruption de connexion et le nombre de connections interrompues associées avec la panne f , respectivement.

Les coûts récurrents

Ils comprennent la location des sites d'antennes et équipements. En fait, ce coût est la multiplication du nombre de sites avec le coût de location par site. Le coût de location par site dépend de la hauteur, de la taille et de la disponibilité. D'autre part, le composant de coût majeur d'un réseau d'accès est sa consommation d'énergie. La consommation d'énergie par utilisateur d'un réseau

d'accès filaire ou sans fil peut être obtenu par la formule suivante :

$$P_{user} = \frac{\alpha \cdot P_{TU}}{N_{TU}} + \frac{\beta \cdot P_{RN}}{N_{RN}} + P_{CPE}, \quad (4.9)$$

où (α, β) peuvent être fixés à (1.5,1) [55] ou (2,1) [56]. Ces facteurs expliquent les frais additionnels tels que les fournitures d'alimentation externes, les pertes de distribution d'électricité et de refroidissement pour le *Terminal Unit* (TU) (OLT pour EPON, MPP pour NAN) et RN (Diviseur de puissance pour EPON, BS pour WiMAX, MP pour NAN), respectivement. En revanche, un CPE (ONU pour EPON, SS pour WiMAX, MAP pour NAN) est refroidi naturellement par l'environnement. P_{TU} , P_{RN} et P_{CPE} désignent les puissances consommées par un TU, RN, et CPE, respectivement. N_{RN} et N_{TU} représentent le nombre d'abonnés qui partagent un RN et un TU, respectivement. La figure 4.5 représente les différentes composantes de la consommation d'énergie

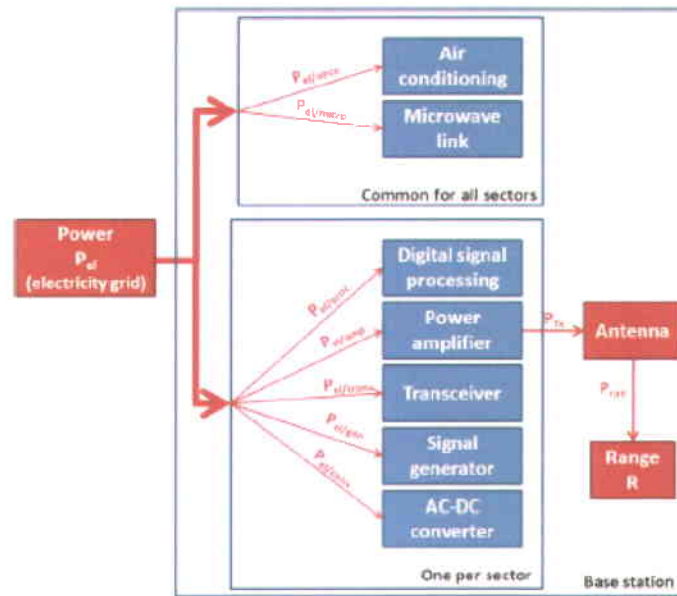


FIGURE 4.5 – Schéma en bloc de la station de base.

d'une station de base. Une station de base contient différents types de matériel par secteur, telles

que le traitement du signal numérique (responsable du traitement et codage du système), amplificateur de puissance, générateur de signaux, émetteur-récepteur, ou convertisseur AC-DC. D'autre part, la station de base contient du matériel commun pour tous les secteurs, telles que la climatisation et les liaisons hertziennes. Par conséquent, la consommation d'énergie de la station de base est donnée par la formule suivante :

$$E_{BS} = n_{sector} \cdot (n_{tx} \cdot (E_{el/amp} + E_{el/trans}) + E_{el/proc} + E_{el/conv} + E_{el/gen}) + E_{el/micro} + E_{el/airco}, \quad (4.10)$$

où n_{sector} est le nombre de secteurs dans la cellule. $E_{el/amp}$, $E_{el/trans}$, $E_{el/proc}$, $E_{el/conv}$, $E_{el/gen}$, $E_{el/micro}$ et $E_{el/airco}$, représentent la consommation d'énergie de l'amplificateur de puissance, émetteur-récepteur, traitement du signal numérique, convertisseur AC-DC, générateur de signaux, liaison hertzienne, et climatisation, respectivement. De plus, n_{tx} est le nombre d'antennes d'émission par secteur. Dans le simple scénario d'un système à une seule entrée-sortie (SISO), la station de base utilise une seule antenne pour la transmission et la station mobile utilise une seule antenne pour recevoir. Dans ce cas, la valeur de n_{tx} est égale à 1. Quand un système à entrées-sorties multiples (MIMO) est considéré dont la station de base utilise deux antennes d'émission et la station mobile d'une ou deux antennes de réception, n_{tx} est égal à 2.

4.6 Analyse de sensibilité

Dans l'analyse de sensibilité, le point principal est de savoir comment le changement de certains paramètres affecte l'ensemble du projet. Les résultats présentés sur les CAPEX et OPEX sont basées sur des paramètres d'entrée qui varient selon les pays, le temps, etc. Les valeurs utilisées ne sont pas nécessairement précises. Ainsi, des variations possibles doivent être prises en compte. Les variations dans les paramètres d'entrée sont modélisées à l'aide de distributions de probabilité.

L'analyse de sensibilité est utilisée dans l'évaluation de l'effet de la variation des paramètres

d'entrée sur la rentabilité globale du projet. Un paramètre qui a une grande influence sur la production est un facteur de risque. Ce facteur est important à reconnaître pour pouvoir suivre son évolution et connaître son effet sur la rentabilité globale du projet. L'analyse de sensibilité est également utilisée pour définir les valeurs optimales de certains facteurs qui peuvent être prédéfinis.

Dans une analyse de sensibilité de base, nous étudions l'impact de la variation d'un seul paramètre d'entrée à la fois tout en gardant les autres paramètres fixes. Le résultat est la variance des métriques de sortie en fonction de la variation donnée du paramètre d'entrée. Une fois exécuté pour tous les paramètres d'entrée, une variance normalisée peut être calculée pour chaque paramètre en divisant sa propre variance par la variance totale (somme des variances de tous les paramètres). Les résultats de ce type d'analyse peuvent être présentés dans un graphe d'analyse de sensibilité qui offre une vue illustrant la sensibilité des coûts aux différents paramètres d'entrée.

4.7 Analyse des risques

La méthode d'analyse de sensibilité est assez simple et ne donne pas forcément une image globale de la rentabilité du projet vu qu'un seul paramètre est modifié à la fois. Une méthode plus efficace est basée sur l'analyse du scénario où plusieurs éléments sont pris en compte en même temps.

L'analyse des risques utilisant la simulation *Monte-Carlo* est une extension de l'analyse de sensibilité. Cette simulation consiste à générer des centaines ou des milliers de scénarios possibles, c'est-à-dire des combinaisons de variables d'entrée sont générées selon des fonctions prédéfinies de densité de probabilité, par exemple au moyen d'une gaussienne, une distribution triangulaire, uniforme, etc. Clairement, le choix de la fonction de densité de probabilité et la plage dans laquelle chaque paramètre va varier (l'écart type dans le cas d'une distribution gaussienne) sera très important. Le type de la distribution de probabilité est choisi selon la nature du paramètre examiné. Par exemple, la distribution triangulaire est utile si les valeurs maximum et minimum sont connues en plus de la valeur la plus probable.

Chaque scénario donne des métriques de sortie. Les résultats de tous les scénarios produisent ensemble une distribution de probabilité de toutes les métriques de sortie possibles, qui est le résultat de la simulation. Cette analyse peut donner des informations détaillées sur l'impact des principaux paramètres d'entrée ainsi que la fiabilité des résultats. Pour être utile, la simulation *Monte-Carlo* nécessite des distributions de probabilités spécifiées pour toutes les variables d'entrée, ce qui est souvent très difficile. Les outils de simulation de *Monte-Carlo* sont nombreux. Nous pouvons citer par exemple les outils *Crystal Ball*, *ModelRisk*, etc.

4.8 Conclusion

Nous avons proposé dans ce chapitre notre nouvel outil développé d'analyse de TCO. Cet outil est global, générique et flexible vu qu'il pourrait être adapté à n'importe quelle infrastructure de communication. Il sera utilisé pour évaluer le coût total associé aux différents scénarios définis et permet d'identifier les principaux paramètres affectant les coûts. Notre outil d'analyse de TCO sera également la base de l'investigation des modèles d'intégration des infrastructures de communication du réseau électrique intelligent.

Nous avons commencé par présenter les différents variables d'entrée ainsi que les métriques de sortie. Ensuite, nous avons détaillé les modèles des CAPEX et OPEX. Finalement, nous avons présenté des techniques d'analyse de sensibilité et des risques.

Chapitre 5

Modèles d'intégration

5.1 Introduction

Les modèles technico-économiques précédents fournissent des indications sur les coûts globaux des architectures pour différents scénarios. Toutefois, l'évaluation d'un projet de déploiement est beaucoup plus complexe que de sommer simplement l'ensemble des coûts. En effet, la plupart des analyses précédentes traite le modèle traditionnel d'intégration verticale. Cependant, dans les déploiements réalistes des réseaux, ces coûts ne sont pas portés par un seul acteur. Par conséquent, il est très important d'analyser les gains obtenus grâce à la collaboration.

Dans ce mémoire, nous allons nous concentrer sur l'impact des multiples acteurs sur le résultat global du projet. Pour ce faire, nous présentons d'abord les différentes couches du réseau. Ensuite, nous examinons les différents rôles qui doivent être pris en charge lors de l'exploitation d'un projet d'intégration de l'infrastructure de communication du réseau électrique intelligent. Ensuite, nous allons chercher des acteurs réels sur le marché (*Housing companies*, opérateur de télécommunications, fournisseur de service, fournisseur d'énergie, etc.). La combinaison des rôles et des acteurs formera le *Value Network* de notre infrastructure de communication. Ensuite, nous présentons les

scénarios de déploiement déjà adoptés dans des études précédentes. Finalement, nous proposons notre nouveau modèle d'intégration collaborative.

5.2 Couches, rôles, et acteurs du réseau

5.2.1 Couches du réseau

Comme présenté dans la figure 5.1, un réseau d'accès peut être considéré comme ayant quatre

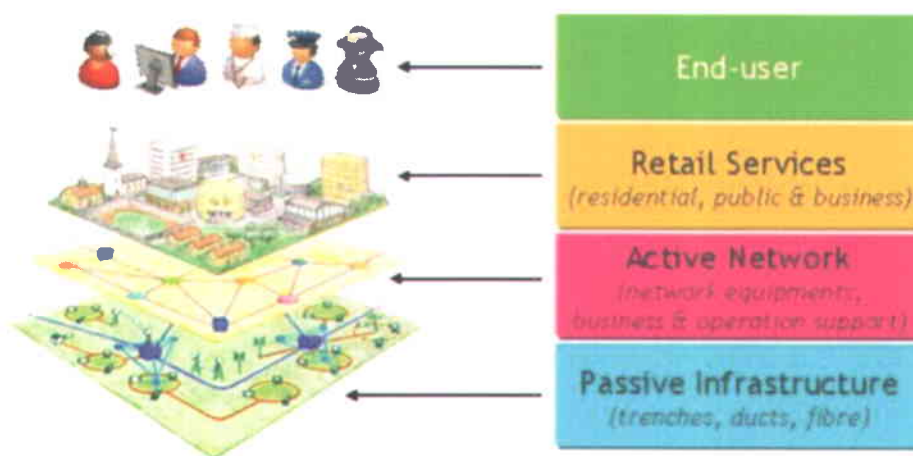


FIGURE 5.1 – Couches du réseau.

couches : l'infrastructure passive comprenant les fibres, conduits, tranchées ainsi que d'autres installations extérieures, le réseau actif comprenant le matériel électrique permettant de rendre l'infrastructure en vie, les services qui fournissent la connectivité aux applications, et bien sûr les utilisateurs finaux. Certaines personnes ont aussi visualisé une couche supplémentaire, la couche de contenu, qui est située au-dessus de la couche de services et peut également être exploitée commercialement.

- **Infrastructure passive** : La couche d'infrastructure passive comprend tous les éléments physiques nécessaires à la construction du réseau d'accès. Cela inclut les fibres, tranchées,

boîtiers de fibres, répartiteurs optiques, etc. L'acteur en charge de cette couche sera normalement responsable de la planification du réseau, des négociations des licences ainsi que les travaux de génie civil.

- **Couche active** : La couche active du réseau se réfère aux équipements électriques nécessaires pour amener l'infrastructure passive en vie ainsi que les systèmes d'opération et maintenance requis pour commercialiser la connectivité. L'acteur en charge de cette couche va concevoir, construire et opérer la partie active du réseau.
- **Couches des services** : Une fois que les couches active et passive sont en place, des services entre en jeu. C'est la couche où la connectivité est structurée en service pour les consommateurs et les entreprises. La société responsable de cette couche est également en charge de la commercialisation, du marketing, de l'administration et du service à la clientèle.

5.2.2 Rôles du réseau

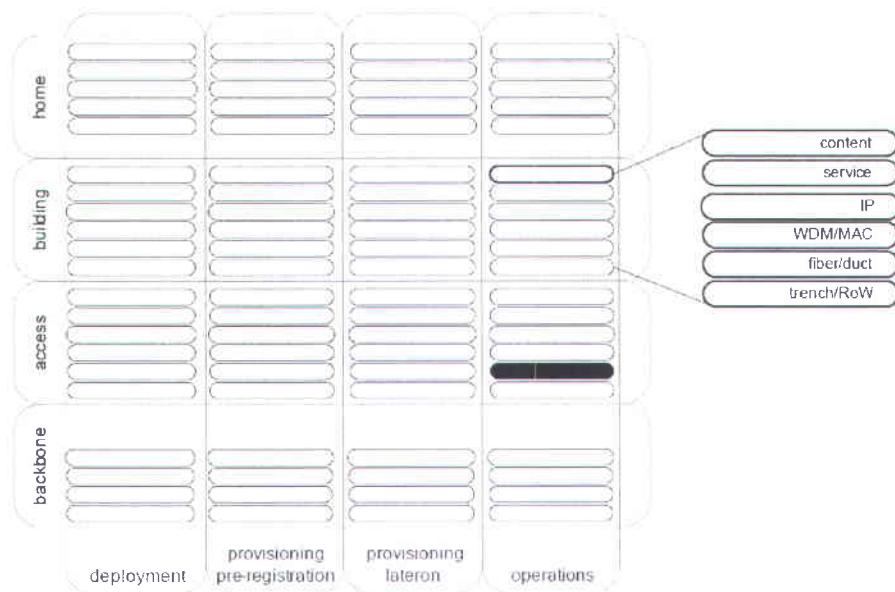


FIGURE 5.2 – Fonctions du réseau.

Les responsabilités dans le réseau peuvent être segmentées en fonction des phases du cycle de vie considérées comme le déploiement, approvisionnement des clients et opération. De plus, nous pouvons distinguer les différentes parties du réseau comme cœur, accès, immeuble et local. Nous pouvons également utiliser la vue en couches du réseau distinguant les 3 couches présentées ci-dessus. Cette meilleure combinaison de granularité des couches réseaux, phases du cycle de vie et parties de réseau permet de définir les rôles comme indiqué dans la figure 5.2.

5.2.3 Acteurs du réseau

Les acteurs du réseau sont définies sans ambiguïté en précisant les rôles qu'ils vont assumer. Nous avons identifié les acteurs suivants :

- **Opérateur de télécommunications** : un opérateur de télécommunications exploite les réseaux nécessaires pour les données, la voix et le transport vidéo sur IP. Il prend essentiellement les fonctions des réseaux d'accès et de cœur ainsi que toutes les phases du cycle de vie et les couches du réseau.
- **Cablo-Opérateur** : Un Cablo-Opérateur entretient et exploite la télévision par câble et l'accès Internet. Il prend des fonctions similaires aux opérateurs de télécommunications.
- **Fournisseur d'infrastructure municipale** : un fournisseur d'infrastructure municipal construit, gère et exploite la fibre optique à l'intérieur des immeubles dans les villes.
- **Housing Companies (HCs)** : les HCs construisent, gèrent et exploitent la fibre optique pour les réseaux domestiques limités à l'intérieur de la maison.
- **Fournisseur de service applicatif** : un fournisseur de service applicatif développe et offre des services. Nous pouvons citer par exemple Netflix, Apple, OnLive, Google, etc.
- **Fournisseur de service de contenu** : un fournisseur de service de contenu produit, possède, regroupe et revend le contenu. Il a souvent ces propres plates-formes de services (Warner Music Group, EMI, Sony BMG, etc.).

5.3 Scénarios d'intégration

Une fois que les acteurs ont été identifiés ainsi que leurs rôles, les chaînes de valeur peuvent être ajoutées entre les différents rôles afin de définir entièrement le *Value Network*. Les flux de valeur indiquent les relations entre les rôles qui peuvent être de l'argent, des informations, des biens, de la bande passante, etc. Au sein de ce *Value Network*, nous pouvons sélectionner des situations spécifiques (combinaisons de rôles). Pour les réseaux NGOA, les anciennes études ont traité les différents niveaux d'ouverture dans les réseaux d'accès, ce qui permet d'indiquer où la concurrence est possible. Par conséquent, nous identifions les modèles d'intégration pertinents suivants, comme présentés dans la figure 5.3 [13] : le modèle d'intégration verticale, la concurrence au-dessus de la

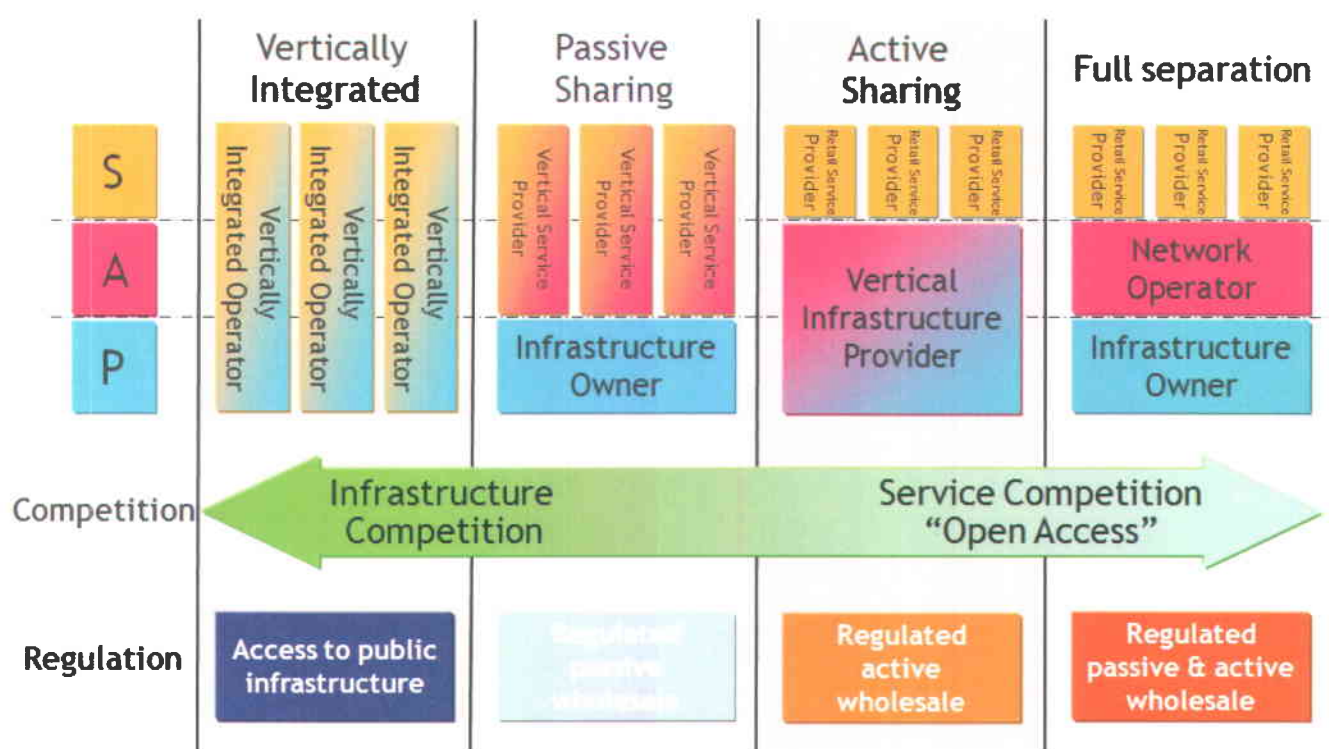


FIGURE 5.3 – Modèles d'intégration.

couche physique, la concurrence au-dessus de la couche active et le modèle totalement séparé.

5.3.1 Modèle d'intégration verticale

Dans ce modèle traditionnel, un acteur s'occupe de la plupart (sinon tous) des rôles de toutes les phases du cycle de vie et les différentes couches du réseau . Il y a juste un seul acteur qui fournit le service, possède et exploite le réseau. Par conséquent, si un second acteur souhaite offrir également des services dans la même zone, il devra construire sa propre infrastructure, l'exploiter et vendre ses propres services directement aux utilisateurs finaux. Il s'agit d'une forme claire de concurrence des infrastructures. Cependant, aujourd'hui, la quantité de services disponibles est en pleine augmentation et le modèle traditionnel est devenu inefficace. De plus, dans les cas réalistes de déploiement, les coûts ne sont pas portés par un seul acteur. Ce modèle sera notre scénario de référence, afin d'identifier l'impact d'autres modèles d'intégration collaboratives sur le TCO.

5.4 Modèles *Open Access*

Ce modèle est utilisé pour définir les réseaux où les différents acteurs sont autorisés à offrir leurs services sur une infrastructure unique avec une base équitable et non discriminatoire. Le réseau peut être ouvert à la couche passive. Dans ce cas, l'infrastructure passive est déployée et exploitée par un seul propriétaire qui ouvre cette infrastructure aux opérateurs de réseaux ainsi qu'aux fournisseurs de services. La concurrence au dessus de cette couche est censée conduire à un *Take Rate* plus élevé. Dans un modèle d'accès entièrement ouvert, le réseau est ouvert à des niveaux différents. Chaque couche appartient à un acteur différent. Les propriétaires de l'infrastructure passive génèrent des revenus en fournissant l'accès aux infrastructures passives aux opérateurs du réseau, qui vont à leur tour fournir l'accès de bande passante aux fournisseurs de services.

5.4.1 Concurrence au-dessus de la couche physique

Ici, nous allons examiner le scénario où l'infrastructure passive a été déployée et exploitée par un seul acteur qui ouvre cette infrastructure à tous les opérateurs de réseaux ainsi qu'aux fournisseurs de services (Figure 5.3). Bien que ce modèle peut être considéré comme une forme de concurrence des infrastructures, il s'appuie sur une seule infrastructure passive, qui est construite et exploitée par un seul acteur. Les couches supérieures appartiennent à des organisations différentes. Un deuxième fournisseur de services peut partager la même infrastructure passive avec le premier fournisseur de services, mais il devra encore investir dans les équipements actifs et les travaux d'opération. Ce scénario est valable dans les zones où il n'y a pas suffisamment de motivation pour déployer un réseau d'accès à plus qu'un opérateur privé. Cette intégration coopérative de l'infrastructure passive pourrait se révéler comme le cas unique permettant de déployer le réseau d'accès avec un délai court. La concurrence aux niveaux des couches supérieures pourrait conduire à un meilleur *Take Rate*.

5.4.2 Concurrence au-dessus de la couche active

Dans ce modèle, un seul acteur est propriétaire de l'infrastructure passive et exploite le réseau actif. Cet acteur fournit l'accès aux divers fournisseurs de services qui s'affronteront ensuite pour les clients. Le cadre réglementaire associée avec ce modèle cherche à encourager la concurrence entre les fournisseurs de services.

5.4.3 Séparation totale

Un pas plus loin que le modèle d'intégration mentionné ci-dessus est le cas d'un réseau d'accès totalement ouvert à différents niveaux. Pour permettre cela, une séparation est introduite entre l'infrastructure physique passive (fournie et détenue généralement par un seul acteur), l'équipement

de connectivité réseau, les couches IP ainsi que la couche des services (Figure 5.3). Ce scénario permet d’avoir un meilleur *Take Rate*. la première raison est le fait que les coûts irrécupérables sont pris par des organismes qui peuvent accepter des retours d’investissement à long terme. La deuxième raison est que, en séparant les couches active et des services, les clients pourraient obtenir un plus grand nombre de services fournis par les petites entreprises avec une grande flexibilité et degré d’innovation. Dans ce modèle, chaque couche appartient à un acteur différent, et le propriétaire d’infrastructure passive génère des revenus en fournissant l’accès à l’opérateur du réseau, qui à son tour fournit l’accès de la bande passante aux fournisseurs de services. Ce modèle stimule la concurrence au niveau des services.

Les modèles d’intégration décrits ci-dessus seront évalués à l’aide de notre outil d’analyse de TCO. L’adaptation de cet outil aux modèles d’intégration permet de calculer la répartition des coûts entre les différents acteurs.

5.5 Notre modèle proposé d’intégration collaborative

La figure 5.4 donne une représentation visuelle de notre *Value Network* proposé pour l’infrastructure *FiWi* intégrée de communication du réseau électrique intelligent. La chaîne de valeur montre les rôles pris par les différents acteurs ainsi que la façon dont ils interagissent. De plus, les flux de valeurs entre les différents acteurs sont identifiés. Nous considérons un seul fournisseur d’infrastructure passive commun (PIP) qui possède et exploite l’infrastructure passive. D’autre part, il y a une réglementation qui permet de placer un câble électrique sur un câble à fibre, en prenant en compte une distance entre les deux câbles. Ainsi, la collaboration pour l’intégration de la couche passive entre les opérateurs de télécommunications et les fournisseurs de réseaux d’énergie permettra de réduire les coûts par acteur impliqué. Plusieurs opérateurs de réseau (NPs) sont autorisés à exploiter le réseau actif dont chacun est responsable d’un secteur géographique distinct. Les NPs doivent assumer les coûts OAM et payer le PIP pour l’utilisation de l’infrastructure passive. En

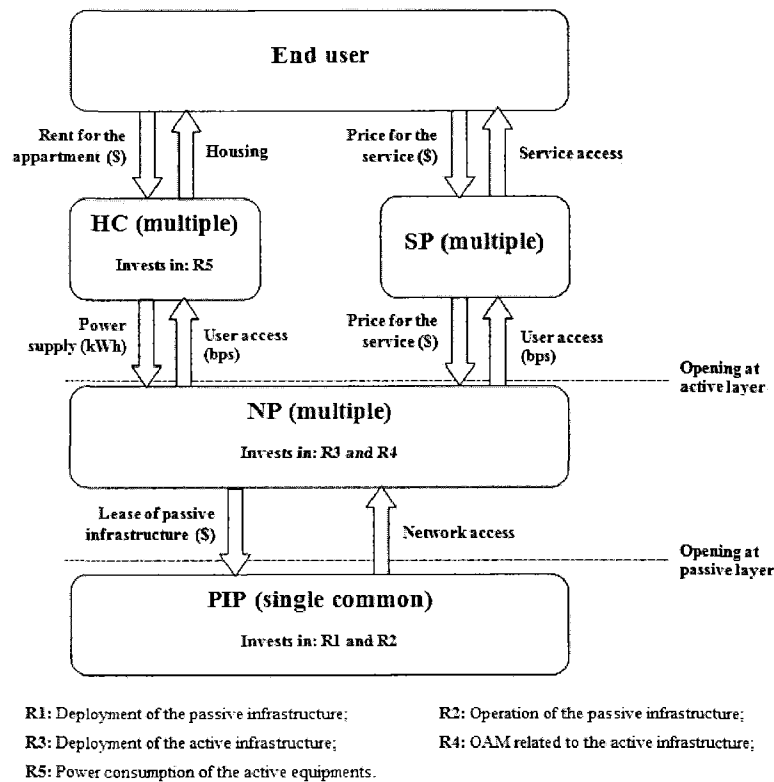


FIGURE 5.4 – *Value Network* de l'infrastructure de communication du réseau électrique intelligent.

contrepartie, ils reçoivent des revenus des fournisseurs de services (SPs) et offrent l'accès de bande passante en retour.

Notez aussi que les HCs vont collaborer en générant localement l'énergie consommée par les équipements NAN, qui est une composante importante des dépenses d'exploitation. Cela permet de motiver le déploiement des réseaux NANs alimentés par des systèmes locaux d'énergie renouvelable. Par conséquent, nous aurons des économies en termes de coûts en réduisant la quantité de fibres déployées.

Les tendances actuelles du marché s'orientent vers les bâtiments à énergie positive qui génèrent localement plus d'énergie qu'ils en consomment. Cela est obtenu grâce à l'utilisation de sources d'énergie renouvelables réparties comme l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique, etc.

Les bâtiments à énergie positive pourraient être construits par des acteurs publics (municipalités) ou des HCs privés. Par exemple, Bouygues, un chef de file français en télécommunications et construction, a lancé le projet *Green Office* à Meudon. Ce projet constitue le premier bâtiment à énergie positive à grande échelle de la France. La consommation du *Green Office* sera 62 kWh/m²/an mais il va produire 64 kWh/m²/an d'énergie renouvelable locale. Ainsi, l'idée de changement est que les bâtiments vont passer d'un produit à un service (fourniture d'énergie renouvelable produite localement). Comme présenté dans notre *Value Network*, nous considérons les HCs comme des acteurs SPs. Ils collaborent en offrant l'énergie positive aux NPs. Quand un bâtiment à énergie positive n'est pas en mesure d'offrir la quantité nécessaire d'énergie, cela va conduire à des pénalités du service d'énergie qui devraient être payés par les HCs. Ce changement de paradigme donne naissance à notre nouveau modèle d'intégration collaborative, qui est défini par l'association des rôles aux différents acteurs, comme présenté dans la figure 5.4.

La plupart des sources renouvelables dépendent des conditions météorologiques. Cela rend les énergies renouvelables variables en termes de production. Afin d'atténuer cette intermittence, l'idée est de permettre à un bâtiment de partager le surplus d'énergie avec d'autres bâtiments à travers les *Smart Microgrids*. En d'autres termes, tous les bâtiments à énergie positive créent ensemble un réseau local commun d'énergie. Les technologies de stockage doivent être mises en place dans les bâtiments et l'infrastructure afin de stocker le surplus d'énergie à partager. Les surplus d'énergies produites par les bâtiments peuvent être également stockés dans les PEVs, qui servent aux stockages mobiles d'énergie et peuvent fournir de l'électricité en retour vers le réseau principal. Dans ce mémoire, nous nous concentrons sur l'énergie éolienne ainsi que l'énergie solaire photovoltaïque (PV) puisque ces deux sources ont pris d'avance par rapport aux autres sources d'énergie renouvelables.

5.5.1 Variation de l'énergie éolienne en termes de production

Nous nous concentrons sur l'énergie éolienne vu qu'elle est la pièce maîtresse de la plupart des propositions axées sur l'environnement pour faire évoluer la production d'énergie électrique. En 2008, les projets éoliens représentent environ 80% des projets américains d'énergie renouvelable. Une étude récente du ministère de l'énergie américain (DOE) a montré que les installations éoliennes vont couvrir 20% de la production d'électricité aux États-Unis en 2030. Cependant et alors que les ressources potentielles pour l'énergie éolienne sont immenses, elles varient en vitesse et donc en flux d'énergie incident. En effet, la puissance par unité de surface transportée, $P(v)$, est proportionnelle au cube de la vitesse :

$$P(v) = \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot v^3, \quad (5.1)$$

où ρ , v et A représentent la densité d'air, la vitesse et la surface perpendiculaire à la direction du flux, respectivement. De plus, la vitesse du vent varie au fil du temps. Cette variation est souvent modélisée par la distribution *Weibull*. Ainsi, la probabilité cumulative de la vitesse de vent dépassant v , $F(> v)$, est donnée par la formule suivante :

$$F(> v) = e^{-\left(\frac{v}{v_0}\right)^k}, \quad (5.2)$$

où v_0 and k représentent les paramètres *Weibull scale* et *Weibull slope*, respectivement. De plus, le spectre fréquentiel, $f(v)$, qui est le nombre de fois où le vent a pour vitesse v , est donné par :

$$f(v) = \left(\frac{k}{v_0}\right) \cdot \left(\frac{v}{v_0}\right)^{(k-1)} \cdot e^{-\left(\frac{v}{v_0}\right)^k}. \quad (5.3)$$

5.5.2 Variation de l'énergie photovoltaïque en termes de production

La production d'énergie solaire PV dépend de l'irradiation solaire, de la température ambiante et des caractéristiques de conversion de l'énergie du générateur. Le modèle d'un générateur PV se

compose de deux parties : la fonction de l'irradiation solaire et la fonction de production d'énergie qui relie le rayonnement solaire à la puissance de sortie du générateur. Dans la littérature [57], la distribution *Beta* a été largement utilisée pour modéliser le comportement aléatoire de l'irradiation solaire. Par conséquent, la puissance de sortie d'un générateur photovoltaïque, P_{PV} , de N modules à une irradiation R est donnée par la formule suivante [57] :

$$P_{PV} = N \cdot R \cdot FF \cdot (V_{oc} - k_v \cdot T_c) \cdot [I_{sc} + k_i \cdot (T_c - 25)] \quad (5.4)$$

où FF est le facteur de remplissage, V_{oc} est la tension en circuit ouvert, k_v est le coefficient de température de la tension, T_c est la température de la cellule, I_{sc} est le courant de court-circuit, et k_i est le coefficient de température du courant.

Comme discuté précédemment, lorsque les bâtiments à énergie positive ne sont pas en mesure de fournir la quantité nécessaire d'énergie, cela pourrait conduire à des pénalités de services d'énergie, PSP , qui peuvent être exprimées comme suit :

$$PSP = (P_{needed} - P_{generated}) \cdot P_{unit}, \quad (5.5)$$

où P_{needed} , $P_{generated}$ et P_{unit} représentent la puissance nécessaire par utilisateur pour l'infrastructure de communication du réseau électrique intelligent, l'énergie produite par un générateur solaire photovoltaïque et le coût d'énergie par unité, respectivement. P_{needed} est obtenu en utilisant Equ. (4.9) tandis que $P_{generated}$ est calculé en utilisant Equ. (5.1) ou Equ. (5.4).

5.6 Conclusion

Nous avons commencé par présenter des différentes couches, rôles et acteurs du réseau qui doivent être pris en charge lors l'exploitation d'un projet de déploiement. Ensuite, nous avons

décrit les scénarios d'intégration déjà existants des infrastructures de communication du réseau électrique intelligent. Nous avons parlé du modèle traditionnel d'intégration verticale ainsi que les modèles *Open Access*.

Finalement, nous avons introduit notre nouveau modèle d'intégration collaborative du réseau *Über-FiWi*. Ce modèle est basé sur la génération locale d'énergie renouvelable par les bâtiments à énergie positive. Cependant, les sources renouvelables dépendent des conditions météorologiques. Par conséquent, nous avons également présenté les modèles de variation de l'énergie éolienne ainsi que l'énergie solaire en termes de production. Ces modèles seront utilisés pour analyser les risques associés à l'intermittence de la production d'énergie renouvelable.

Chapitre 6

Résultats

6.1 Introduction

Nous commençons d’abord par décrire les résultats correspondants au modèle traditionnel d’intégration verticale. Ce scénario est notre cas de référence. Nous présentons également une analyse de sensibilité pour la partie EPON de notre infrastructure ainsi que l’impact des schémas de protection sur les coûts. Ensuite, nous comparons notre nouveau modèle d’intégration avec le scénario traditionnel en se basant sur le TCO. Finalement, nous analysons les risques liés au déploiement d’un réseau *Über-FiWi*.

6.2 Scénario de base

6.2.1 Description du scénario

Pour étudier l’impact de notre modèle proposé d’intégration collaborative (CI), nous commençons par présenter les résultats de notre scénario de référence qui est le modèle d’intégration verticale (VI). Dans ce mémoire, nous étudions l’infrastructure de communication du réseau électrique

intelligent récemment introduite et nommée le réseau *Über-FiWi*.

Lors de l'application du modèle CAPEX générique pour le réseau *Über-FiWi*, les coûts des équipements EPON et les coûts d'installation sont pris à partir de [44] [54]. Les coûts des fibres ainsi que les coûts liés au travaux civils sont tirés de [46]. Par ailleurs, les coûts des équipements du WiMAX et NAN sont pris à partir de [48] et [45], respectivement. Les données utilisées dans

Component		Cost (US\$)	Installation time (min)
OLT	Core shell	6,144	30 + 10 per port
	Cross connect	9,831	
	Service shell	6,144	
RN	1 :2	39	10 + 10 per port
	1 :4	86	
	1 :8	122	
	1 :16	184	
	1 :32	282	
	1 :64	630	
ONU		188	60
Component		Cost (US\$)	Installation cost
Fiber (per km)		2.5	250
WiMAX 3.5 GHz BS		11,586	6,144
WiMAX 3.5 GHz BS sector		3,244	614
WiMAX 3.5 indoor CPE		96	122
WiMAX 3.5 GHz outdoor CPE		128	122
Spectrum licence fee (per BS)		30,727	
NAN mesh AP		150	

TABLE 6.1 – Valeurs des paramètres d'entrée pour l'analyse des CAPEX

nos calculs des dépenses en capital sont indiqués dans la table 6.1.

Lors de l'application du modèle OPEX générique pour le réseau *Über-FiWi*, les valeurs de *MTTR*, *NTR* et *FIT* sont obtenues à partir de [58] [59], alors que les coûts de location des sites sont pris de [46] [48]. Les valeurs typiques de consommation d'énergie sont prises à partir de [60] [61]. Les données utilisées dans nos calculs coûts opérationnels sont indiquées dans la table 6.2.

Le scénario de base défini pour notre travail est le cas où un seul acteur est responsable du

Component	FIT	MTTR (h)	NTR	Power (W)
OLT	256	2	1	5,360
RN	120	6	1	0
ONU	256	6	1	5
Fiber (/km)	570	24	3	0
Component	Site rental cost per year (US\$)			Power (W)
BS	2,213 per BS and 1,475 per sector			6,074
CPE	0			20
Mesh AP	0			11

TABLE 6.2 – Valeurs des paramètres d'entrée pour l'analyse des OPEX

déploiement et la gestion le réseau. Ceci est le cas de l'approche traditionnelle d'intégration verticale. Ce scénario sera notre cas de référence afin d'identifier l'impact de notre modèle proposé d'intégration collaborative sur le TCO. Nous comparons les configurations suivantes : l'architecture simple du EPON (EPON SA), l'architecture en cascade du EPON (EPON CA), EPON&NAN et WiMAX. Nous considérons deux scénarios de déploiement : les zones urbaines et rurales de 1,200 et 100 utilisateurs/km², respectivement. La zone urbaine couvre 80 km² avec 96,000 habitants dans 33,684 maisons, tandis que la zone rurale couvre 120 km² avec 12,000 habitants dans 4,210 maisons. Les coûts d'opération, administration et maintenance et les coûts récurrents sont calculés pour une durée de vie du projet de 10 ans. Le TR est supposé égal à 70%. L'architecture simple du EPON a des diviseurs de puissance de type 1/64 tandis que l'architecture en cascade a des diviseurs de puissance de type 1/8. Pour EPON&NAN, le paramètre α indiquant le pourcentage des ONUs équipés par des MPPs a été fixé à 50%. Pour WiMAX, nous considérons 6 secteurs par station de base et une capacité de 15 Mbps pour chaque secteur.

6.2.2 Résultats du scénario

La figure 6.1 représente les détails des coûts du réseau *Über-FiWi* dans les zones urbaines. Nous observons que la solution EPON&NAN a le plus bas TCO par utilisateur suivie par les technologies

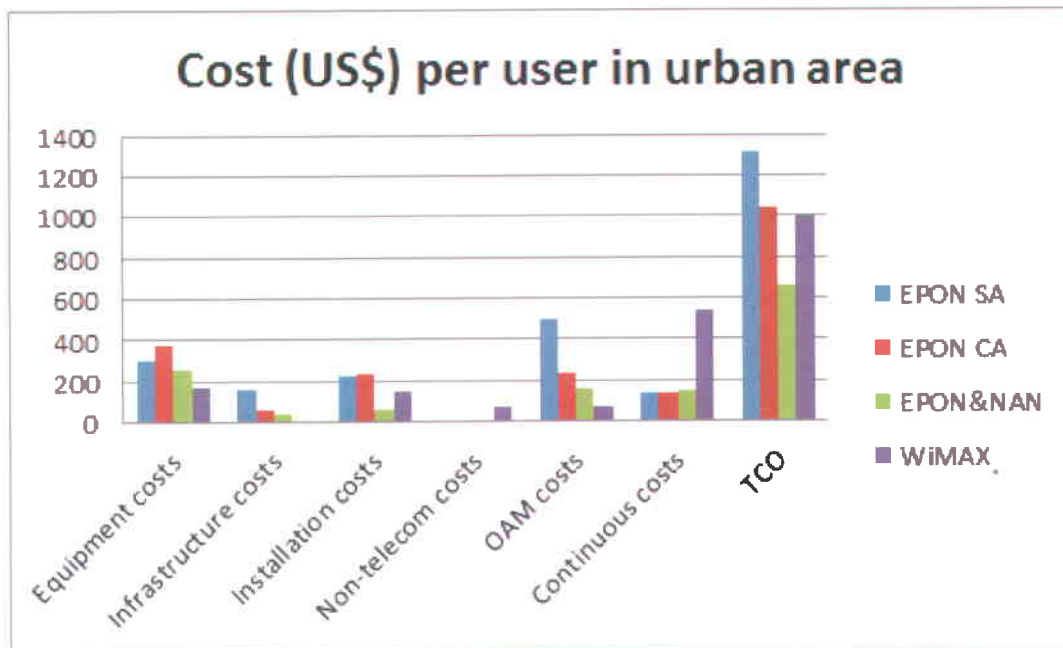


FIGURE 6.1 – TCO par utilisateur du réseau *Über-FiWi* pour les zones urbaines.

de communication WiMAX et EPON. Notez que l'application d'une architecture en cascade entraîne d'importantes économies en termes de coûts. De plus, nous observons que les coûts OAM (FR, P) sont les composants des dépenses d'exploitation les plus coûteux pour les différents réseaux d'accès optiques, tandis que les coûts récurrents sont les plus importants pour WiMAX.

Nous avons également étudié les zones rurales, comme le montre la figure 6.2. En général, nous avons constaté que WiMAX est la meilleure solution dans les zones rurales. En comparant les résultats des zones urbaines (figure 6.1) et rurales (figure 6.2), nous pouvons voir que la différence géographique a peu d'impact sur les coûts liés à l'équipement. L'équipement, l'installation et les coûts récurrents sont similaires dans les zones urbaines et rurales. Toutefois, les coûts d'infrastructure sont touchés surtout par le coût de tranchées, qui est nettement plus élevé dans les zones rurales en raison des distances plus longues ainsi que le nombre plus faible d'abonnés qui vont partager les coûts. Par ailleurs, les coûts d'infrastructure et les coûts des OAM sont les composants les plus dominants dans les zones rurales des CAPEX et OPEX, respectivement.

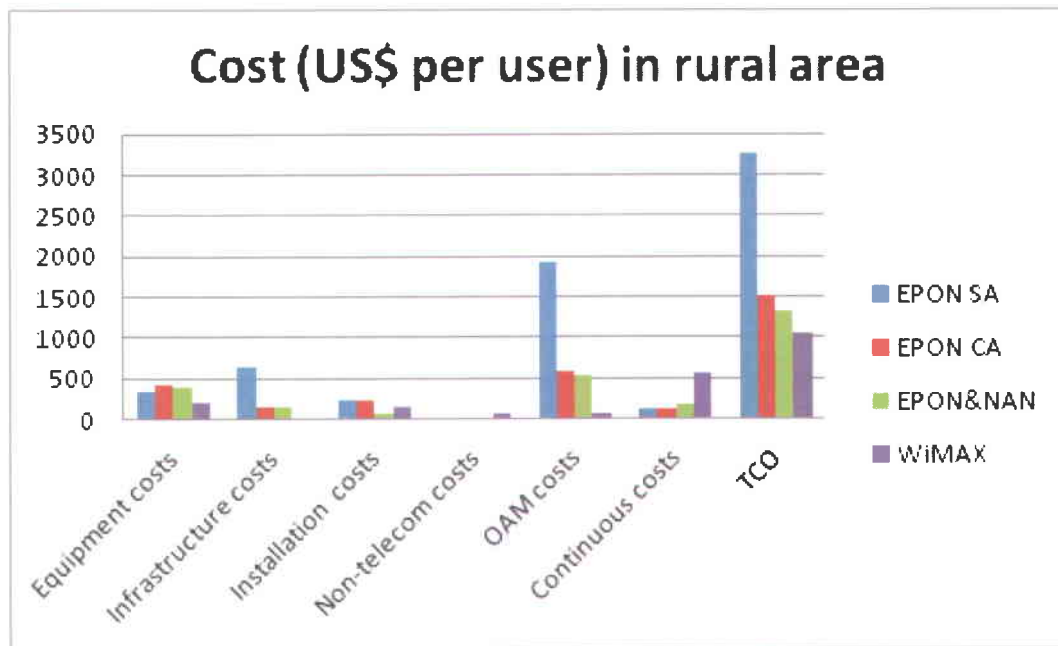


FIGURE 6.2 – TCO par utilisateur du réseau *Über-FiWi* pour les zones rurales.

6.3 Analyse de sensibilité

Les résultats présentés des CAPEX et OPEX sont basés sur des paramètres qui varient selon les pays, le temps, le fabricant, etc. Par conséquent, une analyse de sensibilité doit être effectuée afin d'étudier l'impact de la variation de ces paramètres sur les dépenses en capital et des coûts opérationnels. En outre, cette analyse permet d'identifier les facteurs clés de coûts qui devraient être soigneusement examinées lorsque nous allons implémenter des architectures EPON. En termes d'approche, nous étudions l'impact sur les coûts de la variation linéaire d'un seul paramètre d'entrée tout en laissant les autres paramètres fixes. Les résultats de ce type d'analyse peuvent être représentés dans un graphe d'analyse de sensibilité qui offre une vue illustrant la sensibilité des différents paramètres d'entrée.

6.3.1 CAPEX par utilisateur

Comme présenté dans la figure 6.3, nous avons généré un graphique d'analyse de sensibilité de la partie EPON de notre infrastructure de communication du réseau électrique intelligent. Cette

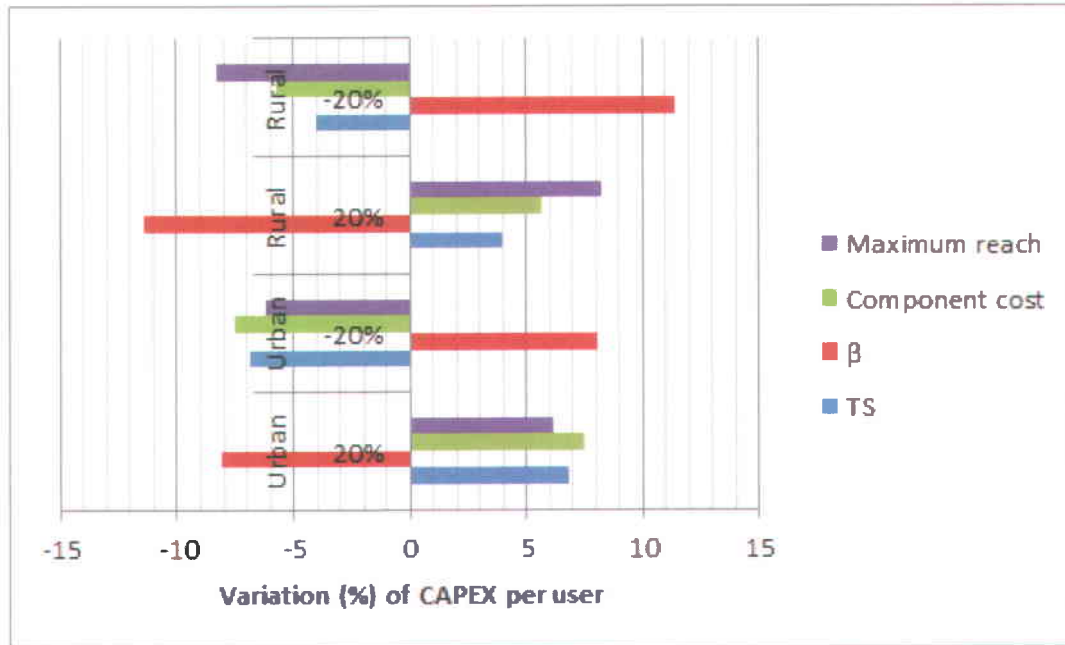


FIGURE 6.3 – Variation (%) des CAPEX par utilisateur du EPON pour une variation de +20% and -20% des différents paramètres.

figure illustre la variation des CAPEX par utilisateur dans les zones urbaines et rurales lorsque l'un des paramètres suivants, portée maximale, coût des équipements, β et TS , varie dans la gamme comprise entre -20 et 20%. Nous pouvons observer que β est le paramètre le plus important affectant les dépenses en capital dans les deux scénarios de déploiement. Dans les zones urbaines, par rapport à la portée maximale, la variation de TS ainsi que les coûts des équipements ont un impact plus important sur les dépenses en capital par utilisateur. Cependant, la portée maximale a plus d'impact que les autres paramètres dans les zones rurales.

6.3.2 OPEX par utilisateur

Comme présenté dans la figure 6.4, nous avons généré un deuxième graphique d'analyse de sensibilité pour la partie EPON de notre infrastructure de communication du réseau électrique

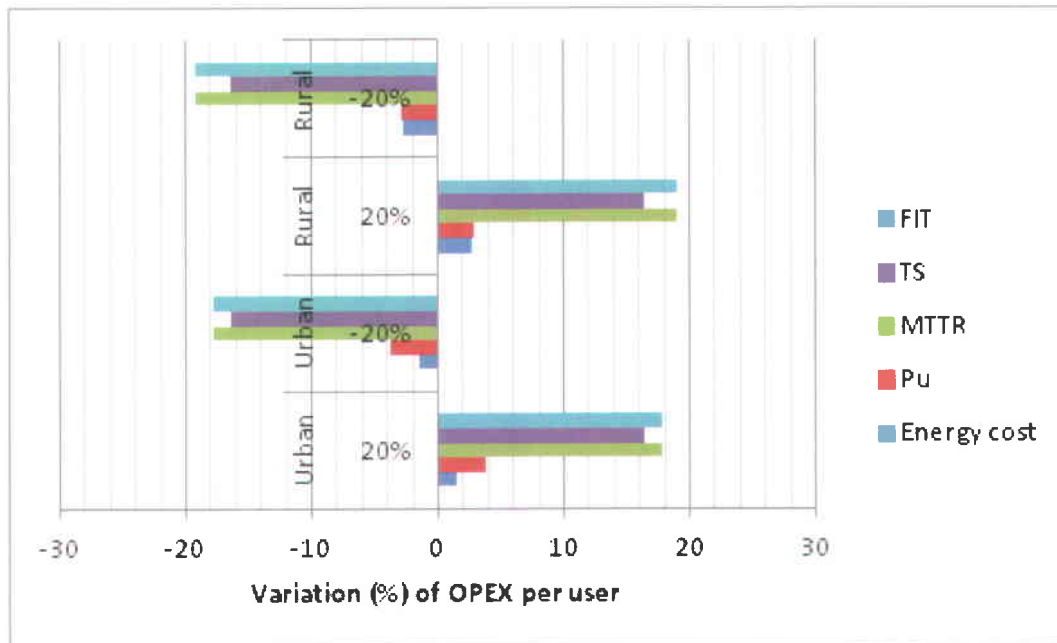


FIGURE 6.4 – Variation (%) des OPEX par utilisateur du EPON pour une variation de +20% and -20% des différents paramètres.

intelligent. Cette figure illustre la variation des dépenses d'exploitation par utilisateur dans les zones urbaines et rurales lorsque l'un des paramètres suivants, FIT , TS , $MTTR$, P_u ainsi que le coût d'énergie, varie dans la gamme comprise entre -20 et 20%. Nous pouvons observer que FIT et $MTTR$ sont les paramètres les plus importants affectant les dépenses d'exploitation dans les zones urbaines et rurales. De plus, la variation du TS a un impact plus important sur les OPEX que les deux autres paramètres.

6.4 Impact des schémas de protection des PONs sur les CAPEX et OPEX

La figure 6.5 compare trois schémas de protection pour une architecture simple du EPON dans une zone urbaine tout en assumant une plage de valeurs pour P_u . De toute évidence, une architecture

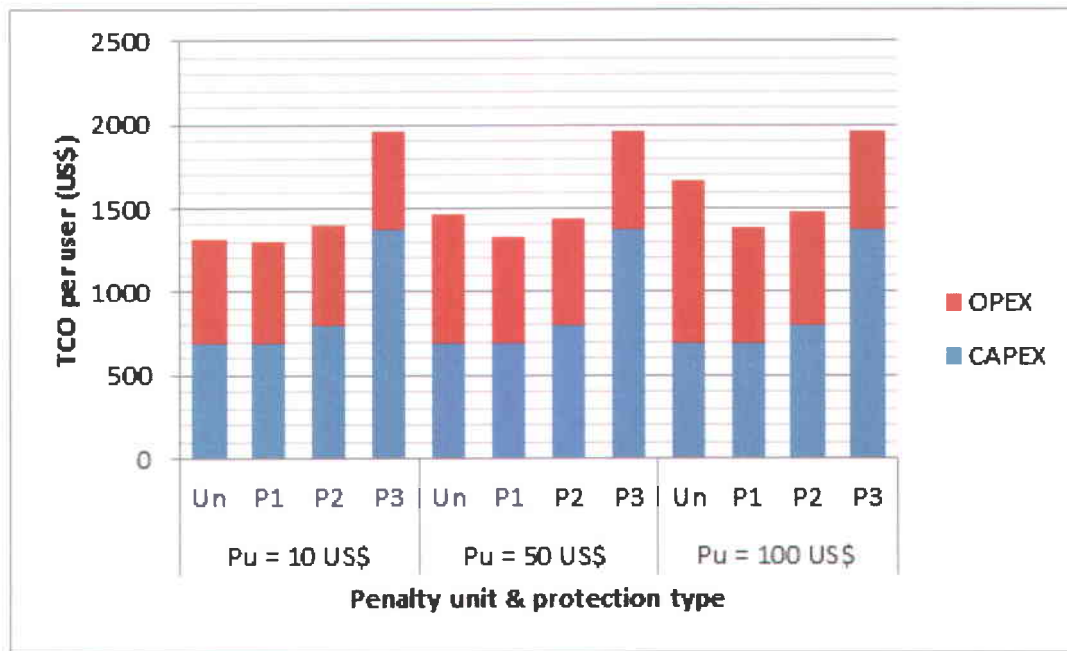


FIGURE 6.5 – TCO par utilisateur des schémas de protection du EPON pour les zones urbaines.

protégée augmente généralement la quantité de matériel nécessaire ce qui implique une augmentation des dépenses en capital. La protection de type P1 ne fait qu'accroître les coûts d'infrastructure. Cependant, le déploiement des types de protection P2 ou P3 provoque une augmentation de toutes les composantes des dépenses en capital.

D'autre part, les coûts de réparation des pannes augmentent dans les scénarios protégés car il y a plus d'équipements et donc plus de pannes. En revanche, les pénalités diminuent considérablement dans les scénarios protégés, ce qui représente le facteur prédominant des dépenses d'exploitation. En outre, l'impact de la variation de P_u est plus important pour les systèmes protégés. Nous pouvons

voir aussi que les dépenses en capital sont supérieures aux coûts opérationnels pour les différents schémas de protection. Spécialement pour les topologies protégées, les dépenses en capital dominent le TCO beaucoup plus que les coûts opérationnels.

La figure 6.5 montre également que, pour toutes les valeurs de P_u , la solution la moins coûteuse consiste à déployer un EPON avec le schéma de protection P1, tandis que l'architecture la plus chère est un EPON avec la topologie P3. Nous observons aussi que le déploiement d'un réseau EPON non protégé est mieux que la topologie P2 pour les faibles valeurs de P_u ($P_u = 10$ US\$).

Nous avons également examiné les zones rurales. Comme présenté dans la figure 6.6, nous avons constaté que, pour les faibles valeurs de P_u ($P_u = 10$ US\$), P1 reste toujours la meilleure solution,

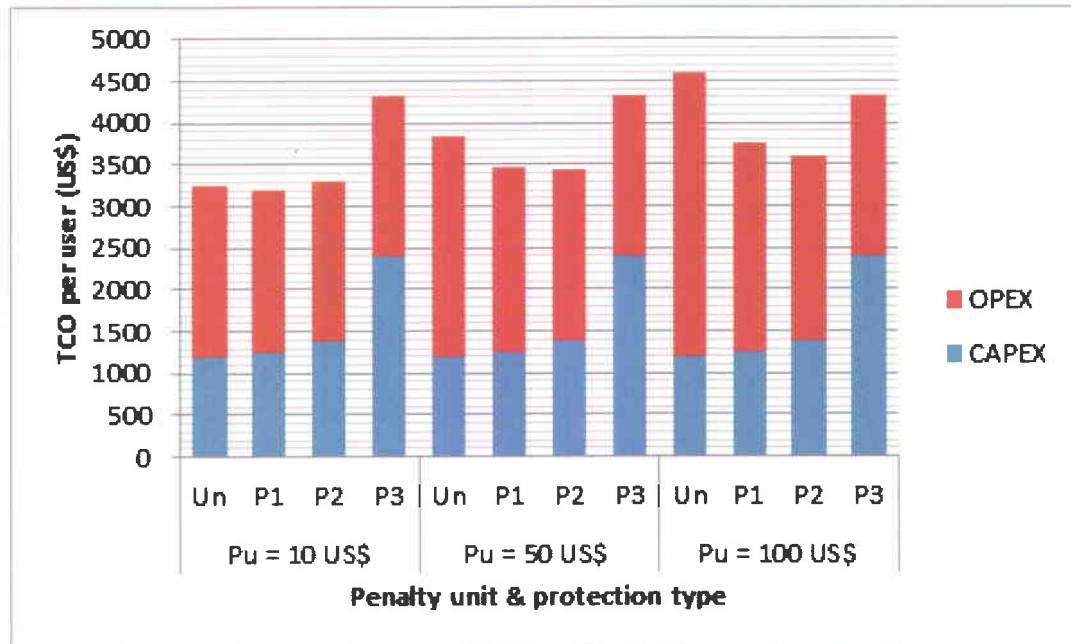


FIGURE 6.6 – TCO par utilisateur des schémas de protection du EPON pour les zones rurales.

alors que pour des valeurs plus élevées, P2 devient le meilleur schéma de protection. Nous notons que P3 est la pire topologie de protection que ce soit pour $P_u = 10$ ou 50 US\$. Cependant, P3 est mieux qu'une simple architecture EPON non protégée pour $P_u = 100$ US\$. Enfin, nous observons que l'impact de P_u sur les coûts est beaucoup plus important en milieu rural qu'en milieu urbain.

6.5 Impact de notre modèle proposé d'intégration collaborative sur le TCO

Dans cette section, nous comparons les deux modèles d'intégration VI et CI en termes de coûts. Dans le premier scénario traditionnel de déploiement, nous supposons qu'un seul acteur va déployer et gérer l'architecture. Dans le second scénario, l'architecture est déployée et exploitée par trois acteurs : PIP, NP, et HC. Pour prendre en compte l'augmentation du TR par l'ouverture des couches passive et active, nous supposons une hausse de 15% de ce ratio. Notre modèle proposé CI motive également le déploiement de la solution EPON&NAN. Par conséquent, nous supposons que 75% des ONUes sont équipés de MPPs.

Les figures 6.7 et 6.8 représentent le coût par utilisateur pour les différents acteurs pour les modèles VI et CI dans les zones urbaines et rurales, respectivement. En général, nous observons

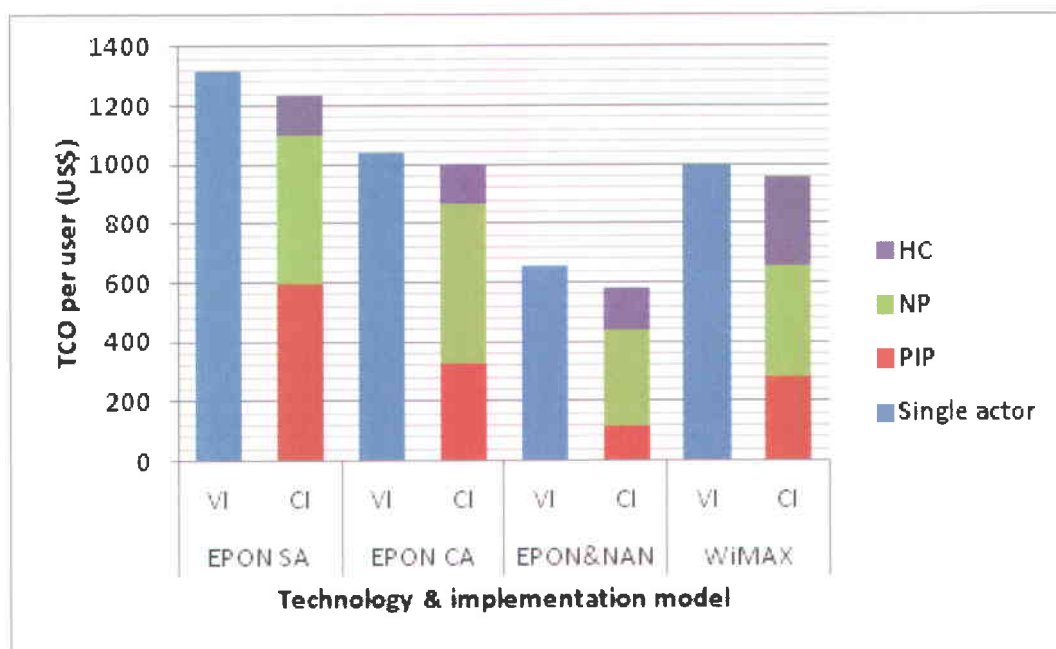


FIGURE 6.7 – TCO par utilisateur et par acteur du réseau *Über-FiWi* pour les zones urbaines.

que notre modèle CI proposé implique des économies de coûts pour les différentes technologies de

communication du réseau électrique intelligent dans que ce soit les zones urbaines ou rurales. En supposant que le HC génère l'énergie consommée gratuitement, les coûts du HC peuvent être mis à

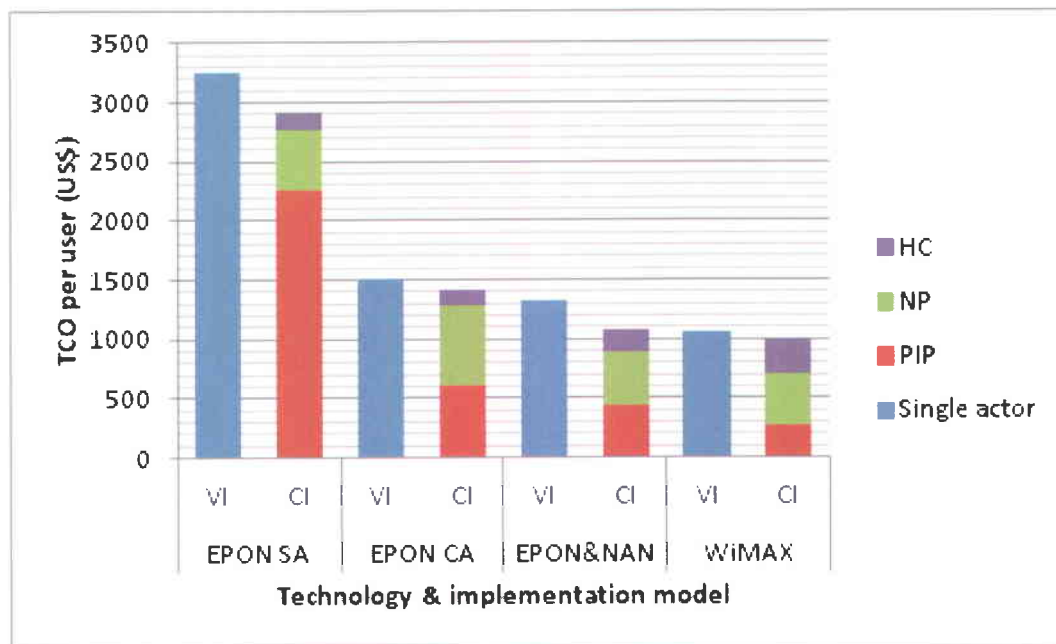


FIGURE 6.8 – TCO par utilisateur par acteur du réseau *Über-FiWi* pour les zones rurales.

0 US\$. De plus, nous pouvons constater qu'il existe un grand impact géographique sur la répartition des coûts entre les acteurs. La majorité des coûts sont pris en charge par les NPs en zone urbaine, alors que les PIPs sont confrontés à des coûts plus élevés dans les zones rurales.

6.6 Analyse des risques

Dans nos analyses des risques, nous utilisons les simulations *Monte-Carlo* qui sont souvent utilisées lorsque le modèle inclut des variables aléatoires. Les paramètres d'entrée sont l'irradiation solaire et la température ambiante. Nous avons également fixé le nombre d'itérations de notre simulation à 1000.

6.6.1 Risques liés à la variation de l'énergie éolienne en termes de production.

Nous étudions les risques liés à la production d'énergie éolienne. Nous avons d'abord défini les valeurs de *Slope parameter* à $v_0 = 1$ et le *Shape parameter* à $k = 1, 2, 3, 4$. Ensuite, nous calculons le spectre fréquentiel pour chaque valeur de la vitesse de vent v , ce qui représente le nombre de fois au cours d'une période lorsque le vent souffle à une vitesse égale à v . Nous définissons ce risque comme le produit de cette fréquence et des pénalités en raison de l'intermittence de la livraison d'énergie. Les pénalités de service sont calculées en soustrayant l'énergie produite sous la vitesse de vent v de l'énergie nécessaire pour notre infrastructure et en multipliant ce résultat par le coût d'énergie par unité. Comme présenté dans la figure 6.9, le risque par utilisateur augmente avec l'augmentation de la valeur de v jusqu'à un certain seuil. Ensuite, ce risque diminue à zéro parce que cette valeur

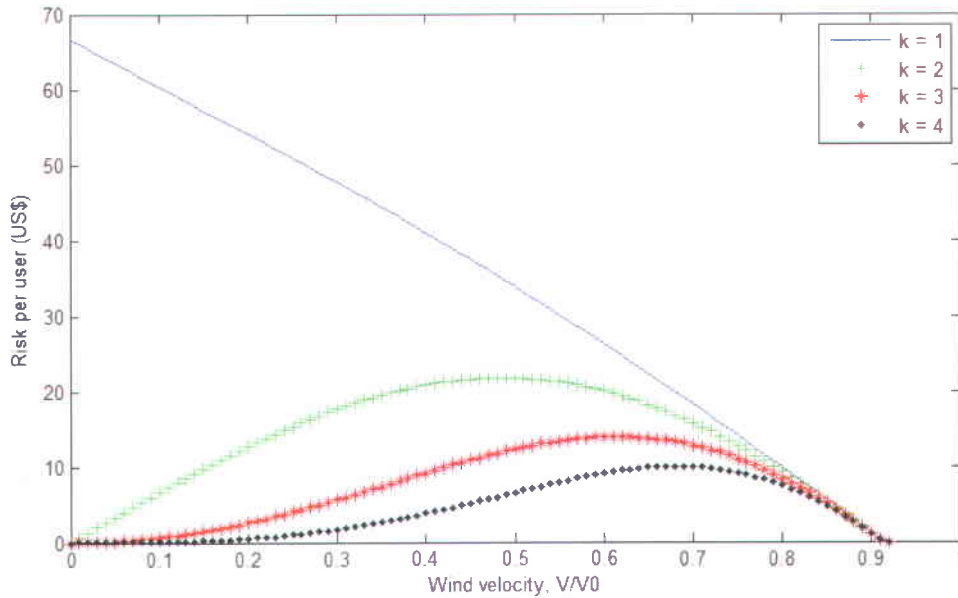


FIGURE 6.9 – Risques associés avec l'intermittence de la production énergie éolienne.

de vitesse permet de générer l'énergie nécessaire à notre infrastructure de communication du réseau intelligent. Nous observons également que, pour une plus grande valeur de k , le risque diminue.

6.6.2 Risques liés à la variation de l'énergie solaire en termes de production

Nous commençons d'abord par le calcul de l'énergie nécessaire pour le réseau *Über-FiWi* en utilisant Equ. (4.9). Nous avons trouvé que l'énergie consommée par l'utilisateur est égal à 7.62, 16.45 et 33.65 W pour EPON, EPON&NAN, et WiMAX, respectivement. Ensuite, nous supposons que les bâtiments à énergie positive déploient des générateurs photovoltaïques avec un module pour chaque utilisateur. Nous considérons des modules photovoltaïques *BlackPearl STP300-24/Vd* dimensionnés 1956x992x50mm par *Power Suntech*.

Comme présenté dans la la figure 6.10, les bâtiments à énergie positive ne sont pas en mesure de

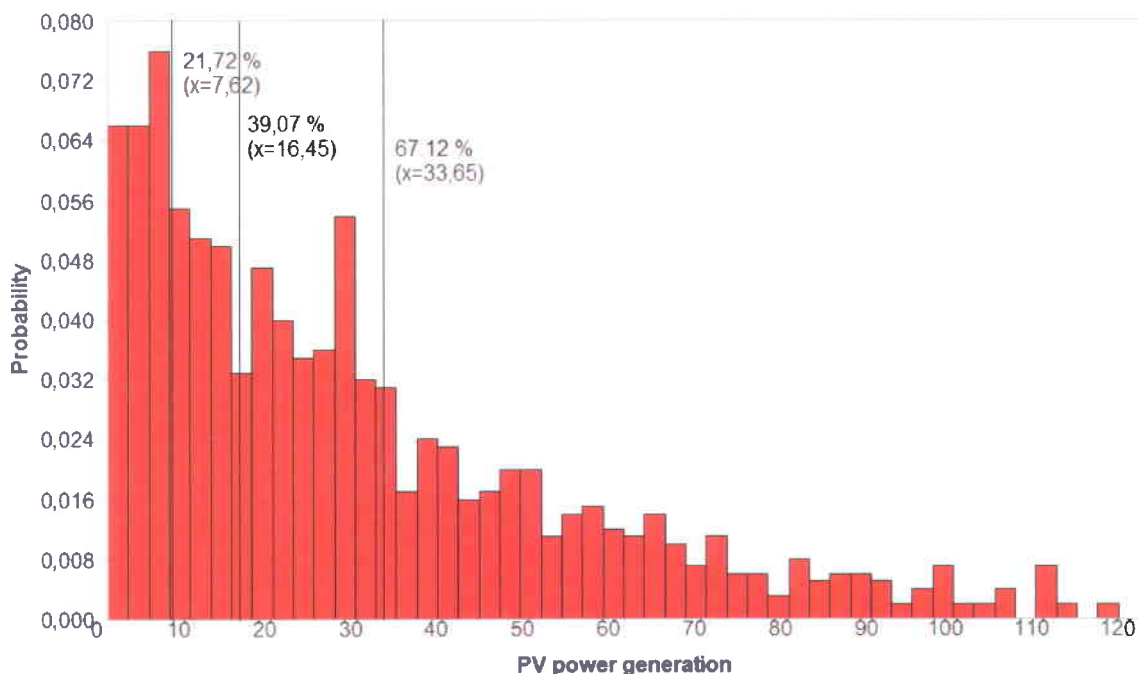


FIGURE 6.10 – Production d'énergie solaire photovoltaïque.

créer l'énergie nécessaire pour EPON et EPON&NAN à environ 21% et 39% de nos cas considérés, respectivement. Pour WiMAX, les bâtiments créeront moins que la puissance nécessaire à 67% des cas.

Après l'estimation de la production d'énergie solaire, nous créons les distributions de probabilité des PSP pour différentes configurations du réseau *Über-FiWi*. Comme présenté dans la figure 6.11, WiMAX est la solution la plus affectée par l'intermittence de la production d'énergie solaire. Par

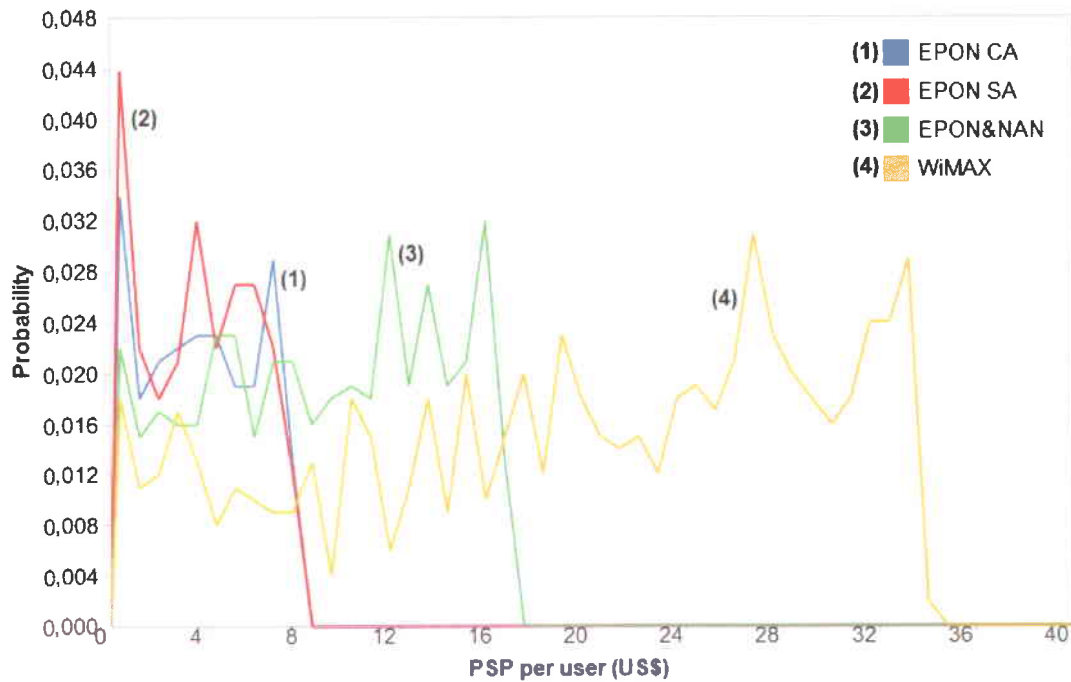


FIGURE 6.11 – Distributions des PSPs du réseau *Über-FiWi*.

ailleurs, EPON&NAN affronte un risque plus élevé que les architectures simple et en cascade du EPON.

Afin de diminuer l'intermittence, nous pourrions exploiter les systèmes de stockage d'énergie disponibles tels que les PEVs de la figure 2.3, ce qui permettrait de rendre les livraisons d'énergie plus fiables. Par exemple, lorsque notre module PV génère seulement 6.5 W, la quantité stockée pour EPON, EPON&NAN, et WiMAX serait 1.12, 9.95, et 27.15 W, respectivement.

6.6.3 Risques associés avec les coupures des fibres

La figure 6.12 illustre la distribution de probabilité des coûts liés aux coupures de fibre par utilisateur. EPON SA est la technologie la plus affectée par les coupures de fibre aléatoires. De

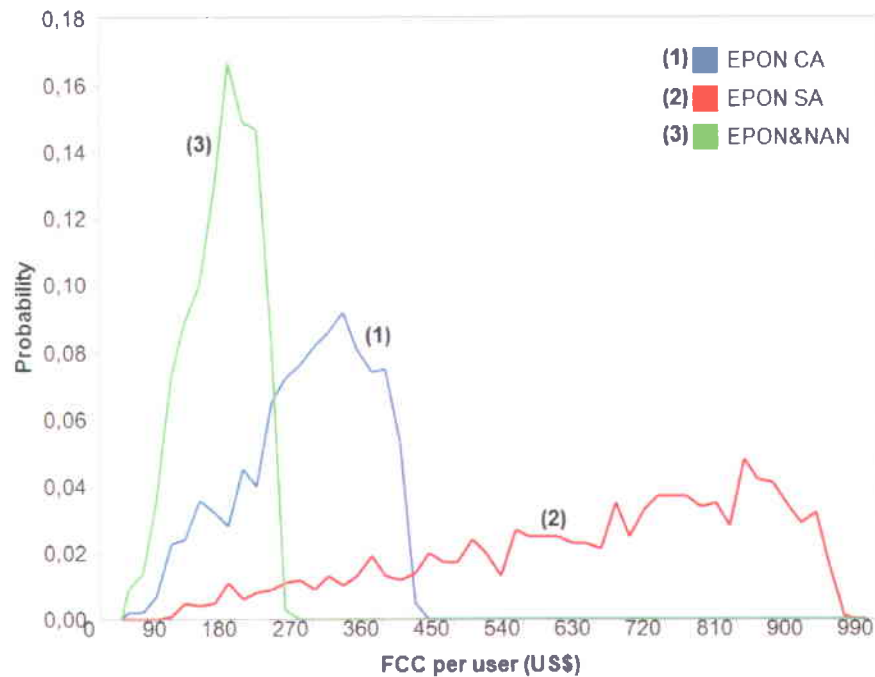


FIGURE 6.12 – Distributions des FCCs du réseau *Über-FiWi*.

plus, EPON&NAN a le plus bas risque en raison de la quantité réduite des fibres déployées.

6.6.4 Risques associés au déploiement du réseau *Über-FiWi*

La figure 6.13 représente les distributions des TCOs par utilisateur. Nous observons que EPON&NAN est la solution la moins coûteuse, EPON SA est la solution la plus chère, et WiMAX est meilleur que EPON CA en termes de coûts dans la plupart des cas.

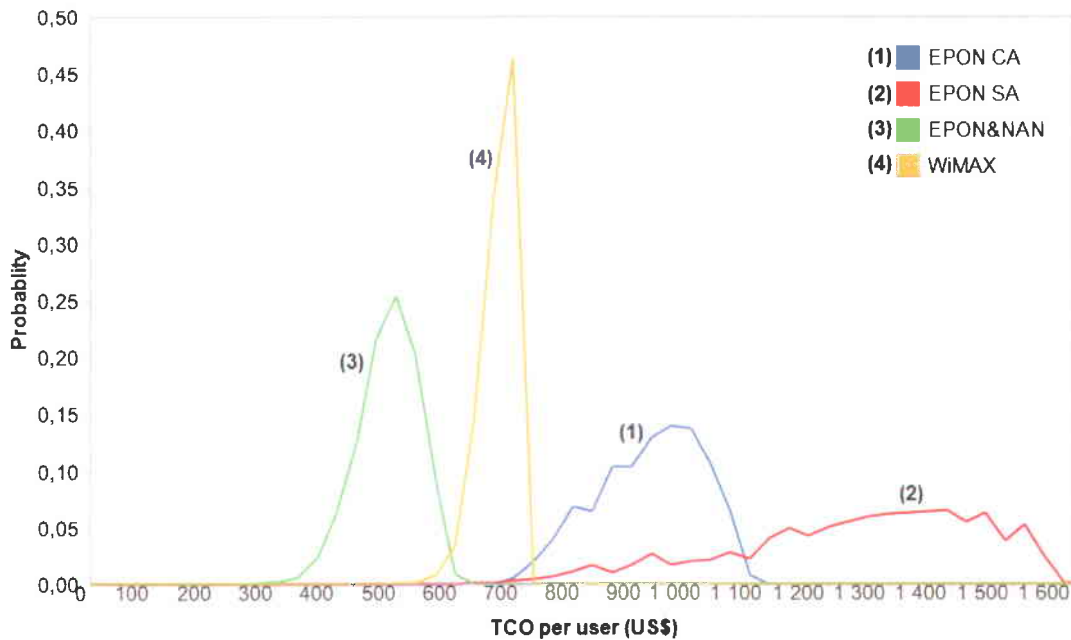


FIGURE 6.13 – Distributions des TCOs du réseau *Über-FiWi*.

6.7 Conclusions

Nous avons comparé d'abord les configurations suivantes : les architectures simple et en cascade du EPON, EPON&NAN et WiMAX. Pour les zones urbaines, nous avons observé que la solution EPON&NAN est la moins coûteuse suivie par les technologies de communication WiMAX et EPON. Nous avons aussi montré que l'application d'une architecture en cascade entraîne d'importantes économies en termes de coûts. Pour les zones rurales, WiMAX est la meilleure solution. D'autre part, nous avons montré suite à une analyse de sensibilité que la position du diviseur de puissance β est le paramètre le plus important affectant les dépenses en capital. *FIT* et *MTTR* sont les paramètres les plus importants affectant les coûts opérationnels. Nous avons également comparé différents types de protection du EPON tout en considérant différentes valeurs de P_u . Dans les zones urbaines, la solution la plus rentable consiste à déployer EPON avec le schéma de protection P1. Pour les zones rurales, P2 est le meilleur schéma pour les valeurs élevées de P_u .

D'autre part, nous avons montré que notre modèle proposé d'intégration collaborative permet des économies en termes de coûts pour les différentes technologies de communication optiques et sans fil dans que ce soit les zones urbaines ou rurales. Nous avons également comparé différentes configurations de communication du réseau électrique intelligent en termes de PSP, FCC, et TCO. Nous avons constaté que la solution EPON&NAN est la meilleure en termes de risques liés aux coupures des fibres en raison de la quantité réduite de fibre déployée. D'autre part, WiMAX est la solution la plus affectée par l'intermittence de l'énergie solaire. Ces résultats peuvent être améliorés en augmentant la quantité de modules photovoltaïques utilisés.

Chapitre 7

Conclusions et perspectives futures

7.1 Conclusions

Nous avons commencé par un scénario de base où un seul acteur est responsable du déploiement et de la gestion du réseau. Ceci est le cas de l'approche traditionnelle d'intégration verticale. Ce scénario était notre cas de référence, afin d'identifier l'impact de notre modèle proposé d'intégration collaborative sur le TCO. Nous avons comparé les configurations suivantes : l'architecture simple du EPON, l'architecture en cascade du EPON, EPON&NAN, et WiMAX. Nous avons traité deux scénarios de déploiement : les zones urbaines et rurales de 1,200 et 100 utilisateurs/km², respectivement. La zone urbaine couvrait 80km² avec 96,000 habitants dans 33,684 maisons, tandis que la zone rurale couvrait 120 km² avec 12,000 habitants dans 4,210 maisons.

Pour les zones urbaines, nous avons observé que EPON&NAN a le plus bas TCO par utilisateur suivi par WiMAX et EPON. Nous avons aussi montré que l'application d'une architecture en cascade entraîne d'importantes économies en termes de coûts. De plus, nous avons observé que les coûts des OAM sont les composants des dépenses d'exploitation les plus coûteuses pour les différents réseaux d'accès optiques, tandis que les coûts récurrents sont les plus importants pour WiMAX. Pour les

zones rurales, nous avons constaté que WiMAX est la meilleure solution. Nous avons également vu que la différence géographique a peu d'impact sur les coûts liés à l'équipement. Les coûts des équipements et installations ainsi que les coûts récurrents sont similaires dans les zones urbaines et rurales. Toutefois, les coûts d'infrastructure sont touchés surtout par le coût de tranchées, qui sont nettement plus élevés dans les zones rurales en raison des distances plus longues ainsi que le nombre plus faible d'abonnés qui vont partager les coûts. Il est également intéressant de noter que les coûts d'infrastructure et les coûts des OAM sont les composants les plus dominants pour les zones rurales dans les CAPEX et OPEX, respectivement.

D'autre part, notre travail d'analyse de sensibilité a montré que la position du diviseur de puissance, β , est le paramètre le plus important affectant le TCO. De plus, ce paramètre a plus d'impact dans les zones rurales que les zones urbaines. Nous avons observé également que FIT et $MTTR$ sont les paramètres les plus importants affectant dépenses d'exploitation dans les zones urbaines et rurales. Par ailleurs, nous avons comparé différents types de protection pour l'architecture simple du EPON dans les zones urbaines tout en considérant des différentes valeurs de P_u . De toute évidence, une architecture protégée augmente généralement la quantité du matériel nécessaire et conduit à une augmentation des dépenses en capital. Dans les zones urbaines, nous avons constaté que la solution la plus rentable consiste à déployer EPON avec le schéma de protection P1. Dans les zones rurales, pour une unité de pénalité inférieure ($P_u = 10$ US\$), P1 reste toujours la meilleure solution, alors que, pour des valeurs plus élevées, P2 est le meilleur schéma de protection.

Nous avons aussi montré que notre modèle proposé d'intégration collaborative permet des économies en termes de coûts pour les différentes technologies de communication optiques et sans fil pour les zones urbaines et rurales. Il existe un impact géographique sur le partage des coûts entre les différents acteurs. La majorité des coûts sont pris par les opérateurs de réseau dans les zones urbaines. Toutefois, les fournisseurs d'infrastructures passives ont des coûts plus élevés dans les zones rurales.

Nous avons également comparé différentes configurations de communication du réseau électrique intelligent en termes de PSP, FCC, et TCO. Nous avons constaté que la solution EPON&NAN est la solution la moins coûteuse. Elle est aussi la meilleure en termes de risques liés aux coupures des fibres en raison de la quantité réduite de fibre déployée. Nous avons supposé que les bâtiments à énergie positive déploient des générateurs photovoltaïques avec un module pour chaque utilisateur. Nous considérons des modules photovoltaïques *BlackPearl STP300-24/Vd* de 1956x992x50mm dimensionnés par *Power Suntech*. Nous avons montré que ces bâtiments ne sont pas en mesure de créer l'énergie nécessaire pour EPON, EPON&NAN, et WiMAX dans 21%, 39% et 67% de nos cas considérés, respectivement. Ainsi, le WiMAX est la solution la plus affectée par l'intermittence de l'énergie solaire. De plus, EPON&NAN a plus de risques que les architectures simple et en cascade du EPON. Ces résultats peuvent être mieux en augmentant la quantité de modules photovoltaïques utilisés.

7.2 Perspectives futures

Le travail de ce mémoire ouvre de nouvelles voies et des perspectives futures. Cette section présente des travaux pour plus d'investigations :

- Dans le chapitre 3, nous avons expliqué les principes de base relatifs au dimensionnement des réseaux d'accès. Nous disons les bases parce que la réalisation d'une planification complexe pourrait faire l'objet de toute une thèse. Par conséquent, nous pourrions étendre cet outil de dimensionnement en intégrant des nouveaux modèles analytiques pour l'estimation des longueurs de fibres et tranchées. Nous pourrions également étendre les phases de planification de couverture et capacité des réseaux sans fil.
- Dans ce mémoire, nous avons développé un nouvel outil d'analyse de TCO et nous l'avons appliqué à un exemple d'infrastructure de communication du réseau électrique intelligent nommée le réseau *Über-FiWi*. Cependant, cet outil développé est assez générique et flexible

ce qui fait que nous pouvons l'appliquer à d'autres infrastructures de communication.

- Nous avons appliqué notre outil d'analyse de TCO à deux scénarios de déploiement : les zones urbaines et rurales. Cependant, nous pouvons étendre ce travail en considération le cas des zones suburbaines. De plus, nous pouvons considérer d'autres scénarios en variant d'autres paramètres tels que la population, TR, etc.
- L'analyse de sensibilité a été effectuée uniquement pour l'architecture simple du EPON. Par conséquent, ce travail peut être étendu pour les autres technologies de communication du réseau électrique intelligent afin de détecter les paramètres les plus critiques dans l'intégration.
- Nous avons comparé notre modèle proposée d'intégration collaborative avec le modèle d'intégration verticale. Cependant, ce travail peut être entendu en comparant le modèle proposé avec d'autres modèles d'intégration telles que : le modèle *Open Access* avec compétition au-dessus de la couche physique, le modèle *Open Access* avec compétition au-dessus de la couche active, le modèle *Open Access* avec séparation totale des couches du réseau, etc.
- Nous pouvons également proposer de nouveaux modèles d'intégration collaboratives. De plus, nous devons analyser leurs efficacités en termes de coûts par rapport aux modèles existants.

Bibliographie

- [1] V. C. Gungor, T. Kocak, and T. Kovac, "A Survey on Smart Grid Potential Applications and Communication Requirements," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 9, no. 1, pp. 28–42, Feb. 2013.
- [2] V. K. Sood, "Developping a Communication Infrastructure for the Smart Grid," in *Proc., IEEE Electrical Power and Energy Conference*, Montreal, Quebec, Canada, Oct. 2009, pp. 1–7.
- [3] M. G. K. P. P. Parikh and T. S. Sidhu, "Opportunities and challenges of wireless communication technologies for smart grid applications," *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1–7, 2011.
- [4] L. Wosinska and J. Chen, "Reliability performance of passive optical networks," in *Proc., International Conference on Transparent Optical Networks*, vol. 3, Rome, Italy, July 2007, pp. 121–124.
- [5] M. Kuzlu and M. Pipattanasomporn, "Assessment of Communication Technologies and Network Requirements for Different Smart Grid Applications," in *Proc., IEEE Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, Washington, DC, U.S.A, Feb. 2013, pp. 1–6.
- [6] Y. Yan, Y. Qian, H. Sharif, and D. Tipper, "A Survey on Smart Grid Communication Infrastructures : Motivations, Requirements and Challenges," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 15, no. 1, pp. 5–20, Feb. 2013.

- [7] N. Zaker, B. Kantarci, M. Erol-Kantarci, and H. T. Mouftah, "Quality-of-Service-Aware Fiber Wireless Sensor Network Gateway Design for the Smart Grid," in *Proc., IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Budapest, Hungary, Jun. 2013.
- [8] R. Sananes and J. Prat, "Techno-Economic Comparison of Optical Access Networks," in *Proc., International Conference on Transparent Optical Networks*, vol. 2, July 2005, pp. 201–204.
- [9] C. M. Machuca, K. Wang, M. Kind, and K. Casier, "Total cost comparison of Next Generation Optical Access Networks with node consolidation," in *Proc., European Conference on Network and Optical Communications (NOC)*, Barcelona, Spain, June 2012, pp. 1–6.
- [10] J. Chen and L. Wosinska, "Performance Analysis of Protection Schemes Compatible with Smooth Migration from TDM-PON to Hybrid WDM/TDM-PON," in *Proc., Conference on Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers*, Anaheim, California, USA, Mar. 2007, pp. 1–3.
- [11] C. Joon and R. S. Tucker, "Ethernet PON or WDM PON : A comparative of cost and reliability," in *Proc., IEEE Region 10 TENCON*, Melbourne, Victoria, Australia, Nov. 2005, pp. 1–6.
- [12] P. Chowdhury, "Comparative Cost Study of Broadband Access Technologies," in *Proc., International Symposium on Advanced Networks and Telecommunication Systems*, Mumbai, Maharashtra, India, Dec. 2008, pp. 1–3.
- [13] M. Forzati, C. P. Larsen, and C. Mattsson, "Open access networks, the Swedish experience," in *Proc., International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Munich, Germany, July 2010, pp. 1–4.
- [14] I. Tomkos, "Techno-economic evaluation of NGA architectures : How much does it cost to deploy FTTx per household passed?" in *Proc., International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Stockholm, Sweden, June 2011, pp. 1–4.

- [15] C. M. Machuca, K. Wang, and S. Verbrugge, "Cost-based assessment of NGOA architectures and its impact in the business model," in *Proc., Conference of Telecommunication, Media and Internet Techno-Economics*, Athens, Greece, June 2012, pp. 1–6.
- [16] M. Tahon, J. V. Ooteghem, K. Casier, and L. Deschuttere, "Cost allocation model for a synergetic cooperation in the rollout of telecom and utility networks," in *Proc., Conference of Telecommunication, Media and Internet Techno-Economics*, Berlin, Germany, May 2011, pp. 1–7.
- [17] M. Erol-Kantarci and H. T. Mouftah, "Wireless Sensor Networks for Cost-Efficient Residential Energy Management in the Smart Grid," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 2, no. 2, pp. 314–325, Jun. 2011.
- [18] X. Fang, S. Misra, G. Xue, and D. Yang, "Smart Grid - The New and Improved Power Grid : A Survey," *IEEE Commnunications Surveys and Tutorials*, vol. 14, no. 4, pp. 1–37, Oct. 2012.
- [19] P. Yi, A. Iwayemi, and C. Zhou, "Developing ZigBee Deployment Guideline Under WiFi Interference for Smart Grid Applications," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 2, no. 1, pp. 110–120, Mar. 2011.
- [20] Y. Wang, W. Lin, and T. Zhang, "Study on security of Wireless Sensor Networks in smart grid," in *Proc., IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, Hangzhou, China, Oct. 2010, pp. 1–7.
- [21] B. Kantarci and H. T. Mouftah, "Energy efficiency in the extended-reach fiber-wireless access networks," *IEEE Network*, vol. 26, no. 2, pp. 28–35, Mar. 2012.
- [22] M. Hashmi, S. Hanninen, and K. Maki, "Survey of smart grid concepts, architectures, and technological demonstrations worldwide," in *Proc., IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Latin Americas)*, Oct. 2011, pp. 1–7.

- [23] M. Erol-Kantarci and H. T. Mouftah, "Wireless multimedia sensor and actor networks for the next generation power grid," *ELSEVIER Journal of Ad Hoc Networks*, vol. 9, no. 4, pp. 542–551, Jun. 2011.
- [24] M. G. Rosenfield, "The Smart Grid and Key Research Technical Challenges," *Symposium on VLSI Technology Digest of Technical Papers*, pp. 3–8, 2010.
- [25] M. Hashmi, "Survey of Smart Grid Concepts, Architectures, and Technological Demonstrations Worldwide," *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Latin America)*, pp. 1–7, 2011.
- [26] B. T, "The Implication and Implementation of Smart Grid in China," *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE*, pp. 1–5, 2010.
- [27] A. Kwasinski, "Implication of Smart-Grids Development for Communication Systems in Normal Operation and During Disasters," *Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, pp. 1–8, 2010.
- [28] M. R. Hossain and A. M. T. Oo, "Evolution of Smart Grid and Some Pertinent Issues," *Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*.
- [29] B. Kantarci and H. T. Mouftah, "Towards energy-efficient hybrid Fiber-Wireless Access Network," in *Proc., IEEE International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Stockholm, Sweden, Jun. 2011, pp. 1–4.
- [30] V. K. Sood and D. Fischer, "Developpind a Communication Infrastructure for the Smart Grid," in *Proc., Electrical Power and Energy Conference*, Montreal, Quebec, Canada, oct. 2009, pp. 1–7.
- [31] Y. Liu, C. Zhou, and Y. Cheng, "Integrated BS/ONU Placement in Hybrid EPON-WiMAX Access Networks," in *Proc., Global Telecommunication Conference (GLOBECOM)*, Honolulu, USA, Nov. 2009, pp. 1–6.

- [32] N. Ghazisaidi, M. Maier, and C. Assi, "Fiber-wireless (FiWi) access networks : A survey," *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, no. 2, pp. 167–167, Feb. 2009.
- [33] M. K. Weldon and F. Zane, "The Economics of Fiber to the Home Revisited," *Bell Technical Labs*, pp. 181–206, July 2003.
- [34] M. Maier and N. Ghazisaidi, "QoS-Aware Radio-and-Fiber (R&F) Access-Metro Networks," in *Proc., Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, Sydney, Australia, Apr. 2010, pp. 1–6.
- [35] Y. Li, J. Wang, C. Qiao, A. Gumaste, Y. Xu, and Y. Xu, "Integrated Fiber-Wireless (FiWi) Access Networks Supporting Inter-ONU Communications," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, no. 5, pp. 714–724, Mar. 2010.
- [36] W. Gerok, "Hybrid Broadband Access with IEEE 802.16e : An Economic Approach for Rural Areas," in *Proc., IEEE Mobile WiMAX Symposium*, Napa Valley, California, USA, July 2009, pp. 93–97.
- [37] V. Ruhimaki, "Analyzing the WiMAX Investment Costs and NPV Distributions for Real Option Valuation," in *Proc., Conference on Telecommunication Techno-Economics*, Helsinki, Finland, June 2007, pp. 1–7.
- [38] M. Ali, *Municipal Wireless Mesh Networks as a Competitive Broadband Delivery Platform*.
- [39] R. V. D. Berg, "Machine-to-Machine Communications : Connecting Billions of Devices," *OECD Digital Economy Papers*, no. 192, 2012.
- [40] M. Maier, "Reliable fiber-wireless access networks : Less an end than a means to an end (Invited Paper)," in *Proc., International Conference on Design of Reliable Communication Networks (DRCN)*, Budapest, Hungary, Mar. 2013, pp. 1–12.
- [41] M. Anderson, "WiMAX for smart grids," *IEEE Spectrum*,.

- [42] M. Maier, M. Lévesque, and L. Ivanescu, "NG-PONs 1&2 and Beyond : The Dawn of The Über-FiWi Network," *IEEE Network*, vol. 26, no. 2, pp. 15–21, March/April 2012.
- [43] N. Ghazisaidi and M. Maier, "Fiber-Wireless (FiWi) Networks : A Comparative Techno-Economic Analysis of EPON and WiMAX," in *Proc., IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM*, Honolulu, Hawaii, USA, Dec. 2009, pp. 1–6.
- [44] J. P. Davim, S. Ziaie, and A. N. Pinto, "CAPEX model for PON technology using single and cascaded splitter schemes," in *Proc., IEEE International Conference on computer as a tool (EUROCON)*, Lisbon, Portugal, Apr. 2011, pp. 1–4.
- [45] T. Smura, "Techno-economic analysis of IEEE 802.16a-based fixed wireless access networks," Master's Thesis, Networking Laboratory, Helsinki University of Technology, Finland, Apr. 2004.
- [46] V. Krizanovic, D. Zagar, and K. Grgic, "Techno-Economic Analyses of Wireline and Wireless Broadband Access Networks Deployment in Croatian Rural Areas," in *Proc., International Conference on Telecommunications (ConTEL)*, Graz, Austria, June 2011, pp. 265–272.
- [47] K. Grobe and J. P. Elbers, "A Total-Cost-of-Ownership Analysis of L2-Enabled WDM-PONs," *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, no. 3, pp. 24–29, Mar. 2009.
- [48] J. Nieminen, "Techno-Economics of Mobile WiMAX," Master's thesis, Department of communications and networking (Comnet), Aalto University, Finland, Mar. 2007.
- [49] C. M. Machuca, "Fault management and service provisioning process model of next generation access networks," in *Proc., International Conference on Network and Service Management*, Paris, France, oct. 2011, pp. 1–6.
- [50] M. V. der Wee and K. Casier, "A modular and hierarchically structured techno-economic model for FTTH deployments," in *Proc., International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, Essex, England, Apr. 2012, pp. 1–6.

- [51] S. Verbrugge, "Impact of Resilience Strategies on Capital and Operational Expenditures," in *Proc., Photonical Network*, May 2005, pp. 109–116.
- [52] C. M. Machuca, J. Chen, and L. Wosinska, "Cost-Efficient Protection in TDM PONs," *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no. 8, pp. 110–117, Aug. 2012.
- [53] F. Domingues, A. M. Rocha, and P. S. Andre, "Failure probability of optical fiber under high optical power and small bend diameters," in *Proc., SBMO/IEEE MTT-S International Conference on Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, Nov. 2011, pp. 1–4.
- [54] J. Chen, L. Wosinska, C. M. Machuca, and M. Jaeger, "Cost vs. Reliability Performance Study of Fiber Access Network Architectures," *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no. 2, pp. 56–65, Feb. 2010.
- [55] R. S. Tucker, "Optical Packet-Switched WDM Networks : a Cost and Energy Perspective," in *Proc., Conference on the Optical Fiber communication and the National Fiber Optic Engineers*, San Diego, California, USA, Feb. 2008, pp. 1–25.
- [56] M. Deruyck and B. Dhoedt, "Model for power consumption of wireless access networks," *IET Science, Measurement and Technology*, vol. 5, no. 4, pp. 155–161, July 2011.
- [57] A. Soroudi, M. Aien, and M. Ehsan, "A Probabilistic Modeling of Photo Voltaic Modules and Wind Power Generation Impact on Distribution Networks," *IEEE Systems Journal*, vol. 6, no. 2, pp. 254–259, Jun. 2012.
- [58] L. Wosinska and M. Pickavet, "Economic Analysis of future access network deployment and operation," in *Proc., Transparent Optical Networks*, Azores, July 2009, pp. 1–4.
- [59] C. M. Machuca and L. Wosinska, "Impact of protection to capital and operational expenditures of optical access networks," in *Proc., ITG Symposium of Photonic Networks*, Leipzig, Germany, May 2011, pp. 1–6.

- [60] J. Baliga and R. S. Tucker, “Energy Consumption in Optical IP Networks,” *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, no. 13, pp. 2391–2403, July 2009.
- [61] M. Deruyck and P. Demeester, “Power consumption in wireless access networks,” in *Proc., European Wireless Conference*, Lucca, Italy, Apr. 2010, pp. 924–931.

Chapitre 8

Publications

- 8.1 Article accepté dans la conférence *IEEE SmartGrid-Comm*

Impact Study of Collaborative Implementation Models on Total Cost of Ownership of Integrated Fiber-Wireless Smart Grid Communications Infrastructures

Ramzi Charni and Martin Maier
Optical Zeitgeist Laboratory, INRS
Montréal, QC, Canada
Email: {charni,maier}@emt.inrs.ca

Abstract—The majority of previous studies give good insight in the overall costs of various communications network architectures but most consider only the vertical integration model. However, it is necessary to take a closer look at the possibilities and gains through collaboration. In this work, we develop a flexible, generic yet comprehensive total cost of ownership (TCO) framework, which calculates the overall costs related to the rollout of smart grid communications networks for different scenarios. Further, we present our novel collaborative implementation model for a shared infrastructure for both broadband access and smart grid communications. In addition, buildings currently shift from a product to a service (i.e., renewable power supply). Thus, our idea is that housing companies will collaborate by offering the positive renewable energy to communications network providers. We study the impact of this model on TCO and compare it with traditional vertical integration model. The sensitivity analysis for the key cost parameters is conducted. We also analyze the risk related to renewable energy intermittency.

Index Terms—Collaborative implementation model, FiWi smart grid communications infrastructure, Positive energy buildings, Renewable energy intermittency, Total Cost of Ownership.

I. INTRODUCTION

Previous techno-economic studies compared various broadband access technologies under different conditions based on a TCO model. Many such works have been published, e.g. [1]. These studies give good insight in the overall costs of various architectures. However, evaluating a telecom deployment project is much more than just summing up all costs. In fact, most of them just considered the traditional vertical integration model. However, in realistic network deployments, e.g., fiber-to-the-home (FTTH) implementations in Stockholm or Citynet in Amsterdam [2], these costs are often not carried by a single actor. It is also necessary to take a closer look at the gains in collaborative models. A first step in this direction is seen in recent studies such as e.g. [3], which compares various next-generation optical access networks for different implementation models and allocates TCO to different individual actors. Furthermore, most previous studies related to smart grid

communications, e.g. [4] or [5], have focused on technological requirements and challenges to ensure performance, reliability, and security. However, the key challenge of today is more about the economic rather than technological issues. In this paper, we compare different implementation models for integrated fiber-wireless (FiWi) smart grid communications infrastructures both qualitatively and quantitatively by using our developed TCO framework. What differentiates this paper from previous works is that we not only consider optical but also wireless technologies. We also include a sensitivity analysis, which allows to identify the key cost factors that should be carefully considered when deploying our infrastructure. We also contribute a novel collaborative implementation model, in which we consider a shared infrastructure for broadband access and smart grid communications. We apply the open access concept at different levels. In addition, housing companies will collaborate by offering locally generated renewable energy to network providers. Further, previous papers don't include the collaboration impact on OPEX. However, it is important to consider it since a solution, which could initially be expensive to rollout, could present lower operational costs.

II. THE ÜBER-FIWI NETWORK

In [6], we have recently introduced the so-called Über-FiWi network, a FiWi network infrastructure shared for both smart grid communications and broadband access. As shown in Fig.1, homes connect to the infrastructure either via IEEE 802.3ah Ethernet passive optical network (EPON) or IEEE 802.16 WiMAX. In rural areas with a small population density, subscribers connect to the WiMAX base station (BS). For densely populated or fiber-rich settings as well as environments where fiber cuts are less likely (e.g., underground railway tunnels), subscribers connect to the EPON optical line termination (OLT) via optical network units (ONUs). OLTs and BSs are interconnected to the distributed management system (DMS) through an optical gigabit carrier Ethernet augmented ring network. In addition, we deploy a WLAN-based mesh neighborhood area network (NAN) based on high-throughput next-generation IEEE 802.11n/ac WLAN and

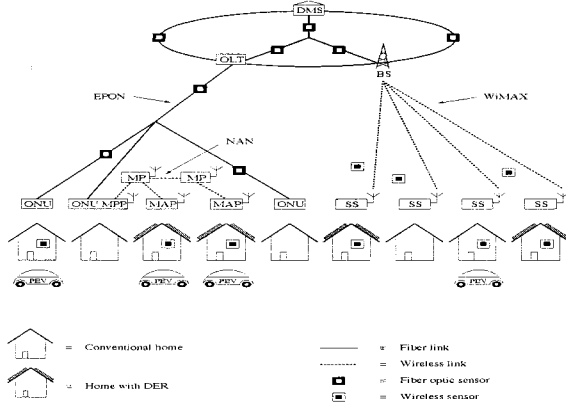


Fig. 1. The Über-FiWi network architecture [7].

IEEE 802.11s mesh WLAN technologies. This technology allows an ONU installed at a given customers premises to be shared by other nearby homes, thereby significantly reducing the amount of fiber infrastructure, increasing coverage, and enabling a smooth upgrade path. The NAN consists of the following three types of node: mesh portal point (MPP), which is collocated at the ONU and acts as the interface to the NAN; mesh access points (MAPs), which provide subscribers with access to the NAN; and mesh points (MPs), which are the intermediate NAN nodes that relay packets between the MPP and MAPs. To monitor the status of next-generation power network distribution components, we place fiber optic sensors for temperature, voltage, current, and sound at the required locations throughout the optical fiber infrastructure and ZigBee smart energy sensors in WiMAX and NAN.

III. TOTAL COST OF OWNERSHIP FRAMEWORK

Our TCO framework contains the following four building blocks: network dimensioning tool, CAPEX model, OPEX model, and sensitivity analysis tool.

A. Dimensioning tool

This tool gives the required equipment and infrastructure to cope with the given demand, network, and topology. Its output will be a driver for major cost components. Thus, optimizing this step will lead to an overall decrease in TCO.

1) *EPON dimensioning*: EPON has a reach of fiber between the OLT and any ONU limited to 20 km. The OLT also has a limitation on the number of optical distribution network ports, which are bundled in cards with typically 2, 4, or 8 ports per card. The number of splitters $N_{Splitter}$ is computed by dividing the number of households in the area by the splitting ratio. Then, the number of OLTs N_{OLT} is given by [8]

$$N_{OLT} = \frac{N_{Splitter}}{N_{Card} \cdot N_{Port}}, \quad (1)$$

where N_{Card} and N_{Port} denote the number of cards per OLT and the number of ports per card, respectively. An EPON can be implemented in two different topologies: single-stage and cascaded architecture. In the first case, the estimation of the

fiber length L is given by [8]

$$L = \beta \cdot \bar{d} + N_{df} \cdot (1 - \beta) \cdot \bar{d}, \quad (2)$$

where $\beta \in [0, 1]$ is an important network design parameter that represents the position of the splitter, N_{df} denotes the number of distribution fibers, and $\bar{d}$ is the average distance from the OLT to ONUs, which can be estimated as

$$\bar{d} = \frac{2 \cdot R}{3}, \quad (3)$$

where R is the average radius of an OLT's covered area. For example, for an area of 300 km², which is served by 8 OLTs, on average each OLT covers an area of 37.5 km², translating into a circle radius R of 3.45 km and $\bar{d}$ of 2.3 km. In the case of cascaded architecture, L can be computed as follows

$$L = \sum_{k=1}^n (F_e(k) + D_i(k) + D_r(k)), \quad (4)$$

where n is the number of regions of the given area and F_e , D_i , and D_r denote the feeder, distribution, and drop fiber length, respectively.

2) *EPON&NAN dimensioning*: First, we have to estimate the maximum number of subscribers that can be served by an ONU, $N_{subs/ONU}$, which is given by

$$N_{subs/ONU} = \frac{C_{EPON}}{T_{AVG} \cdot N_{ONU}}, \quad (5)$$

where C_{EPON} , T_{AVG} , and N_{ONU} denote the EPON capacity, average throughput per subscriber, and number of ONUs per EPON, respectively. Then, we can compute the number of ONUs in a given area, N_{ONU} , as

$$N_{ONU} = \frac{N_{Households}}{1 + \alpha \cdot (N_{subs/ONU} - 1)}, \quad (6)$$

where $N_{Households}$ and α denote the number of households in the given area and the percentage of ONUs that will be equipped with an MPP, respectively. Accordingly, the values of $N_{Splitter}$, N_{OLT} , and L will change and can be estimated by using Eq. (1) and Eq. (2). Further, the required number of MPPs, N_{MPP} , and MAPs, N_{MAP} , are given by

$$N_{MPP} = \alpha \cdot N_{ONU}, \quad (7)$$

$$N_{MAP} = N_{subs/MPP} \cdot N_{MPP}. \quad (8)$$

3) WiMAX dimensioning:

• Capacity dimensioning:

The objective is to estimate the required number of BSs and sectors to fulfill the demands of all subscribers in the area. We begin by computing the maximum number of subscribers to be connected to a single sector $N_{subs/sector}$ as follows [9]

$$N_{subs/sector} = \frac{T_{sector} \cdot C}{T_{AVG}}, \quad (9)$$

where T_{sector} and C denote the traffic capacity of one sector and the concentration factor, respectively. Then, the capacity-based number of BSs is given by

$$N_{BSs} = \frac{N_{Households}}{N_{subs/sector} \cdot N_{sectors/BS}}, \quad (10)$$

TABLE I
TYPICAL COMPONENT AND INSTALLATION COSTS

Component		Cost (US\$)	Install time (min)
OLT	Core shell	6,144	30 + 10 per port
	Cross connect	9,831	
	Service shell	6,144	
RN	1:2	39	10 + 10 per port
	1:4	86	
	1:8	122	
	1:16	184	
	1:32	282	
	1:64	630	
ONU		188	60
Component		Cost (US\$)	Installation cost
Fiber (per km)		2.5	250
WiMAX 3.5 GHz BS		11,586	6,144
WiMAX 3.5 GHz BS sector		3,244	614
WiMAX 3.5 indoor CPE		96	122
WiMAX 3.5 GHz outdoor CPE		128	122
Spectrum licence fee (per BS)		30,727	
NAN mesh AP		150	

where $N_{sectors/BS}$ denote the number of sectors per BS.

- Coverage dimensioning:

The objective is to ensure that the capacity-based amount of BSs is enough to reach all customers in the given area. The number of BSs to be built will be the larger one of both dimensioning phases. The $range_{BS}$ for n BSs and area size L^2 equals $\frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot L$. Thus, the coverage-based number of BSs is calculated as

$$N_{BSs} = \frac{1}{2 \cdot range_{BS}} \cdot \sqrt{2} \cdot L. \quad (11)$$

Based on [9] [10], $range_{BS}$ may be set to 0.5 km for urban areas using indoor CPE antennas, 1.5 km for urban areas using outdoor CPE antennas, or 10 km for rural areas.

B. CAPEX model

1) *Equipment cost*: $Cost_{Equip}$ is given by

$$Cost_{Equip} = \sum_c d_c \cdot p_c, \quad (12)$$

where c is the equipment type and d_c and p_c denote the required quantity of this type of equipment and its price, respectively.

2) *Infrastructure cost*: This CAPEX component includes cable costs $Cost_{ca}$ as well as civil work (i.e., digging trenches and installing ducts in the trenches) related costs $Cost_{cw}$. We first have to calculate L by using Eq. (2) or Eq. (4). Then, we can compute the infrastructure cost $Cost_{Infra}$ as [8]

$$Cost_{Infra} = L \cdot (Cost_{ca} + Cost_{cw}). \quad (13)$$

3) *Installation cost*: It is computed by the product of the installation time and the technician hourly salary TS (US\$190/h [11]). Accordingly, $Cost_{Insta}$ is given by [11]

$$Cost_{Insta} = \sum_i (IT_i + 2 \cdot T_i) \cdot TS \cdot NT_i, \quad (14)$$

where IT_i , T_i , and NT_i denote the installation time, the traveling time from the CO to the faulty component i , and the number of required technicians, respectively.

4) *Non-telecom related cost*: The major component of non-telecom related cost is licensing fees. The data used in our CAPEX calculations are shown in Table I. The EPON component and installation related costs were obtained from [8] [11]. The price of fiber as well as its civil work related cost is taken from [10]. Further, WiMAX and WLAN-based mesh NAN component costs are obtained from [9] and [12], respectively.

C. OPEX model

1) *Operation, administration, and maintenance (OAM) costs*: Previous studies [9] [12] estimate the OAM costs of WiMAX to be 20% of CAPEX. However, for EPON, OAM costs that have been analyzed are the ones related to network failures, that is, failure reparation costs, FR , and penalties, P , associated with service interruption. FR depends on the network lifetime, total number of network components, technician hourly salary, TS . For each component, it also depends on the expected number of failures in time, FIT , number of persons required to repair a failure, NTR_f , and mean time to repair, $MTTR_f$. Thus, FR is given by [13]

$$FR = TS \cdot \sum_f (MTTR_f \cdot NTR_f). \quad (15)$$

P can be expressed as the product of the connection interruption time and the penalty unit of each particular connection according to the service level agreement (SLA). Accordingly, P can be computed as follows [11]

$$P = P_u \cdot \sum_f (MTTR_f \cdot IC_f), \quad (16)$$

where P_u and IC_f denote the penalty of an hour of interrupted connection and the number of interrupted connections associated with failure f , respectively.

2) *Continuous costs*: They include the leasing of equipment and antenna sites. The cost of renting a location depends on its height, size, and availability. One of the major continuous costs of an access network is power consumption. The power consumption per user is given by

$$P_{user} = \frac{\alpha \cdot P_{TU}}{N_{TU}} + \frac{\beta \cdot P_{RN}}{N_{RN}} + P_{CPE}, \quad (17)$$

where (α, β) is set to (2,1) [13]. These two factors account for additional overheads such as external power supplies, electricity distribution losses, and cooling requirements for a terminal unit (TU) (i.e., OLT, MPP) and RN (i.e., splitter, BS, MP), respectively. By contrast, a CPE (i.e., ONU, MAP) is cooled naturally by the surrounding environment. P_{TU} , P_{RN} , and P_{CPE} denote the power consumed by the TU, RN, and CPE, respectively. N_{RN} and N_{TU} denote the number of subscribers that share an RN and TU, respectively. The values used in our OPEX calculations are shown in Table II. The values of MTTR, NTR, and FIT are obtained from [11], while BS site rental costs per year are taken from [10] and [12]. Further, typical power consumption values are taken from [13].

TABLE II
PARAMETER VALUES FOR OPEX ANALYSIS

Component	FIT	MTTR (h)	NTR	Power (W)
OLT	256	2	1	5,360
RN	120	6	1	0
ONU	256	6	1	5
Fiber (/km)	570	24	3	0
Component	Site rental cost per year (US\$)			Power (W)
BS	2,213 per BS and 1,475 per sector			6,074
CPE	0			20
Mesh AP	0			11

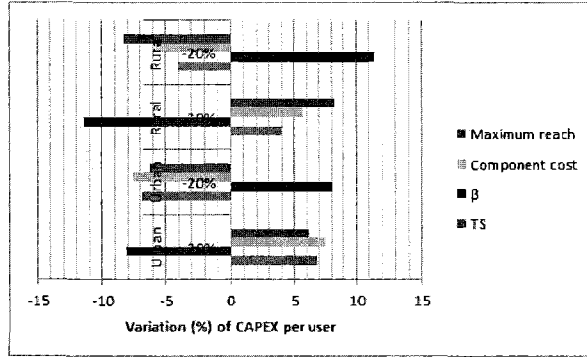


Fig. 2. Variation (%) of CAPEX per user for urban and rural areas for +20% and -20% changes of different parameters.

D. Sensitivity analysis tool

This analysis allows to identify the key cost factors that should be carefully considered when implementing an access network. As shown in Fig. 2, we have generated a sensitivity analysis graph for the EPON part of our FiWi smart grid communications infrastructure. It illustrates the CAPEX per user variation in urban/rural areas when one of the cost parameters such as maximum reach, component cost, β , and TS vary in the range between -20 and 20%. It can be observed that β is the most important parameter affecting CAPEX in urban or rural areas. In urban areas, as compared to the maximum reach, TS and component cost variation have a larger impact on CAPEX per user. However, the maximum reach has more impact than the other parameters in rural areas.

IV. IMPLEMENTATION MODELS

A. Vertical integration model

In this case, one actor is responsible for all roles across different network layers and life cycle phases. There is just one entity, which delivers the service, operates, and owns the network. However, today the amount of available services is booming. Thus, this traditional model is inefficient. In addition, in realistic cases, costs are not carried by a single actor. This scenario will be our reference case in order to identify the impact of other collaborative implementation models on TCO.

B. Open access models

This term is used to define networks in which different actors are allowed to offer their services over a single infras-

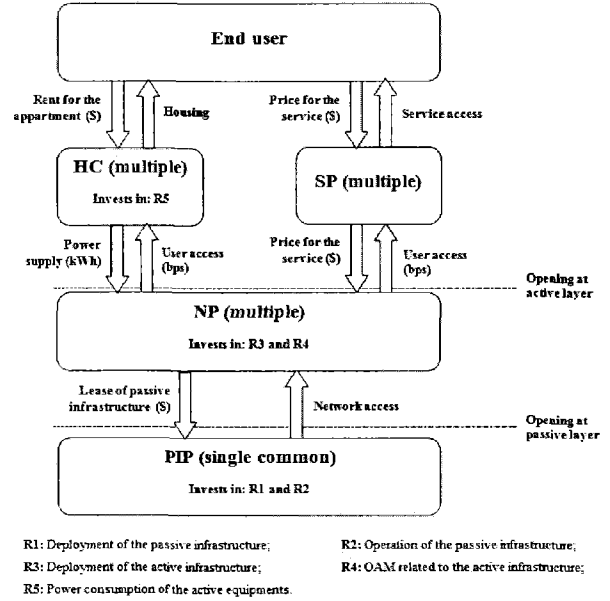


Fig. 3. Value chain for the collaborative implementation of our FiWi smart grid communications infrastructure.

tructure on a fair and non-discriminatory basis. The network can be opened at the passive layer. In this scenario, the passive infrastructure is built and maintained by one owner who opens up this infrastructure for network and service operators. The competition on top of this layer could lead to a higher take-up rate. In a fully open access model, the network is opened at different levels. Each layer is owned by a different actor, with the infrastructure owner generating income by providing passive infrastructure access to the network operator, who in turn wholesales broadband access to service providers.

C. Our proposed collaborative implementation model

Fig. 3 gives a visual representation of our proposed value network for the FiWi smart grid communications infrastructure. The value chain indicates which actors take which roles and how they interact. In addition, the value streams between the different actors are identified. We consider a single common passive infrastructure provider (PIP) that owns and operates the passive infrastructure. Current regulation allows to place an electricity cable on top of a fiber cable, taking into account a safety distance between the cables. Thus, collaboration at passive layer between telecommunications operators and energy network providers will reduce the cost per partner involved. Several network providers (NPs) may be allowed to own and operate the active network, where each one will be responsible for a separate geographical area. NPs own the active network, assume the OAM costs, and pay the PIP actor for using the passive infrastructure. NPs receive revenues from service providers (SPs) and in return offer access to the active network.

Today's market trends toward positive energy buildings let them generate more energy than they consume. This is achieved through use of distributed local renewable energy sources such as solar or wind. Positive energy buildings

might be constructed by public (e.g., municipalities) or private housing companies (HCs). For example, Bouygues, which is a leading French office building promoter, has initiated the Green Office project in Meudon. This project represents France's first large-scale positive energy building. The Green Office's consumption will be 62 kWh/m²/year, yet it will produce 64 kWh/m²/year of local renewable energy. Thus, the game-changing idea is that buildings shift from a product to a service (i.e., renewable power supply). As shown in our value network, we consider HCs as SP actors. They collaborate by offering positive energy to NP and in return receive the same value in terms of bandwidth. This paradigm shift gives rise to our new collaborative implementation model, which is defined by mapping roles to the different actors (as shown in Fig. 3). However, most renewable sources rely on weather conditions. This makes renewable energy variable in terms of supply. When these resources are unavailable, this might result in service penalties. We focus on wind energy because it has taken a commanding lead among renewable sources, and it is the centerpiece of most environmentally oriented proposals for expansion of electric energy supplies. As of 2008, wind projects made up about 80% of US renewable energy projects. A DOE study examines the implications of increasing wind-power installations to meet 20% of the US electric power generation in 2030. However, while the potential resources for wind power are immense, it varies in speed and hence in incident energy flux. In fact, the power per unit area transported, $P(v)$, is proportional to the cube of the velocity

$$P(v) = \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot v^3, \quad (18)$$

where ρ , v , and A denote the density of air, its velocity, and the area perpendicular to the direction of the flow, respectively. Moreover, the wind velocity varies over time. It is general practice to curve-fit measured velocities to Weibull distribution. Thus, the cumulative probability of the wind velocity exceeding v , $F(>v)$, is given by

$$F(>v) = e^{-\left(\frac{v}{v_0}\right)^k}, \quad (19)$$

where v_0 and k denote the Weibull scale and slope parameter, respectively. Further, the frequency spectrum $f(v)$, which is the number of times over the course of a year when the wind blows at velocity v is as follows

$$f(v) = \left(\frac{k}{v_0}\right) \cdot \left(\frac{v}{v_0}\right)^{(k-1)} \cdot e^{-\left(\frac{v}{v_0}\right)^k}. \quad (20)$$

Note that HCs are assumed collaborate by generating locally the energy consumed by our NAN equipments, which is an important OPEX component. This enforces the build-out of NANs powered by green local energy and leads to cost savings by reducing the amount of fiber deployed.

V. RESULTS

For studying the impact of our proposed collaborative implementation (CI) model, we begin by presenting the results for our reference case of the vertical integration (VI) model.

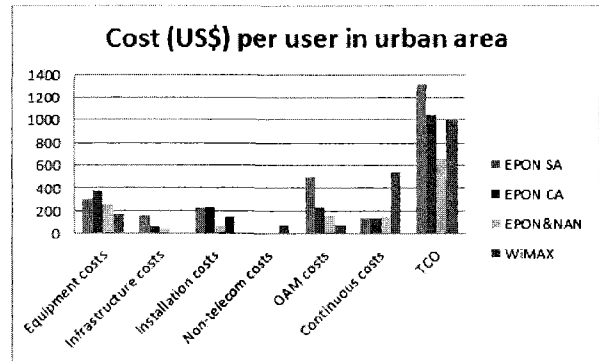


Fig. 4. TCO per user breakdown for VI model in urban areas.

Then, we show how our proposed CI model reduces the overall costs for our smart grid communications infrastructure.

A. Base case

We compare the following configurations: EPON single-stage architecture (EPON SA), EPON cascaded architecture (EPON CA), EPON&NAN, and WiMAX. We consider two deployment scenarios: urban and rural areas with 1,200 and 100 users/km², respectively. The urban area covers 80 km² and has 96,000 inhabitants living in 33,684 households; whereas the rural area covers 120 km² and 12,000 inhabitants living in 4,210 households. The OAM and continuous costs are given for a study lifetime of 10 years. The take-up rate is assumed to be 70%. The single-stage architecture has splitters of type 1:64 whereas the cascaded architecture has first- and second-stage splitters of type 1:8. For EPON&NAN, the parameter α denoting the percentage of ONUs equipped with an MPP is set to 50%. For WiMAX, we consider 6 sectors per BS and a capacity of 15 Mbps for each sector.

Fig. 4 depicts the cost breakdown of smart grid communications technologies in the urban area. We observe that the EPON&NAN solution has the lowest TCO per user followed by WiMAX and EPON single and cascaded architectures. Note that applying a cascaded architecture allows important cost savings. Furthermore, we observe that OAM costs (e.g., FR, P) are the highest OPEX component for the different optical access networks, whereas continuous costs (e.g., power consumption, site rental) are the most important for WiMAX. We also did same works for rural areas and we found that WiMAX is the best solution. Note that the equipment, installation, and continuous costs are similar for both deployment scenarios. However, the infrastructure costs are affected especially for the trenching cost, which is significantly higher in rural areas, due to the longer trenching distance and less subscribers to share the costs.

B. Impact of collaborative implementation model on TCO

To take into account the higher take-up rates achieved by opening up the passive and active layers, we assume a 15% take-up rate increase. Our proposed CI model motivates the EPON&NAN solution. To take this into account, more 25% ONUs are equipped with an MPP. Figs. 5 and 6 depict the

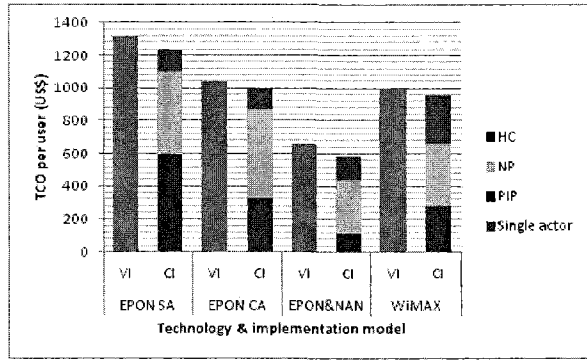


Fig. 5. TCO per user per actor in urban areas.

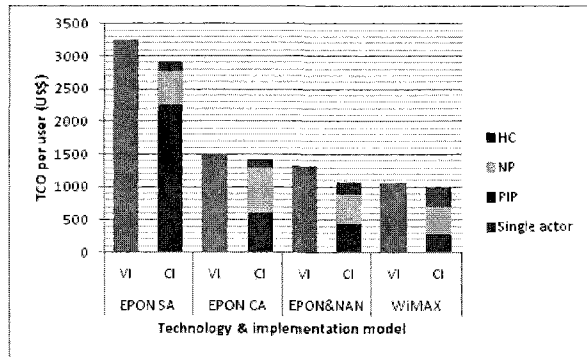


Fig. 6. TCO per user per actor in rural areas.

cost per user for different actors of the VI and CI models in urban and rural areas, respectively. In general, we observe that our proposed model allows cost savings for the different technologies in both urban and rural areas. Given that HC generate the energy consumed locally for free, HC related costs equal 0 US\$. Further, it can be seen that there is a large geographical impact on the cost allocation to actors. The majority of costs is taken up by the NP in the urban area. However, PIPs face higher costs in rural areas.

Next, we study the risk related to intermittency of wind energy. We first have set the values of scale parameter to $v_0 = 1$ and shape parameter to $k = 1, 2, 3, 4$. Then, we compute the frequency spectrum for each wind velocity value v , which is the number of times over the course of a year when the wind blows at velocity v . We define this risk as the product of this frequency and the service penalties due to intermittency of energy supply. Service penalties are computed by subtracting the energy generated under the wind velocity v from the energy needed for our infrastructure and multiplying this result by the energy unit cost. As shown in Fig. 7, the risk per user increases for increasing v until a threshold. Then, it decreases to zero because this value of wind velocity allows to generate the required energy for our smart grid communications infrastructure. We also observe that for a larger k , the risk decreases.

VI. CONCLUSIONS

We have shown that our proposed collaborative implementation model allows cost savings for different optical

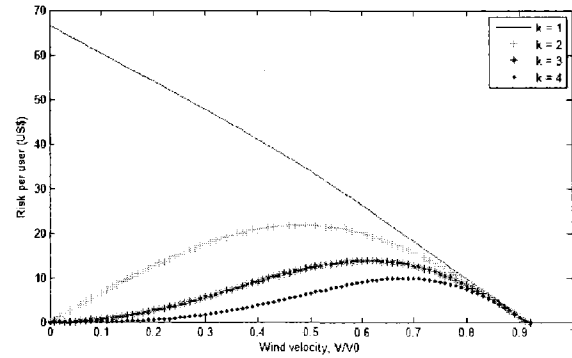


Fig. 7. Risk related to intermittency of wind energy.

and wireless communications technologies in urban and rural areas. There exists a large geographical impact on the cost allocation to different actors. The majority of the cost is taken up by network providers in an urban area. However, passive infrastructure providers face higher costs in rural areas. Sensitivity analysis work has shown that the position of the splitter β , which is the most important parameter affecting the EPON TCO, has more impact in rural areas. We have also studied the risk related to intermittency of renewable energy locally generated by housing companies.

REFERENCES

- [1] P. Chowdhury, "Comparative Cost Study of Broadband Access Technologies," in *Proc., International Symposium on Advanced Networks and Telecommunication Systems*, Dec. 2008, pp. 1–3.
- [2] M. Forzati, C. P. Larsen, and C. Mattsson, "Open access networks, the Swedish experience," in *Proc., 12th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Jul. 2010, pp. 1–4.
- [3] C. M. Machuca, "Cost-based assessment of NGOA architectures and its impact in the business model," in *Proc., Conference of Telecommunication, Media and Internet Techno-Economics*, Jun. 2012, pp. 1–6.
- [4] M. Lévesque, M. Maier, Y. Desai, and G. Joos, "Adaptive Admission Control for a Smart Grid FiWi Communications Network Facing Power Blackouts during a DDoS Attack," in *Proc., IEEE Green Technologies Conference*, Apr. 2012, pp. 1–3.
- [5] N. Zaker and B. Kantarci, "Quality-of-Service-Aware Fiber Wireless Sensor Network Gateway Design for the Smart Grid," in *Proc., IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Jun. 2013.
- [6] M. Maier, M. Lévesque, and L. Ivanescu, "NG-PONs 1&2 and Beyond: The Dawn of The Über-FiWi Network," *IEEE Network*, vol. 26, no. 2, pp. 15–21, March/April 2012.
- [7] M. Maier, "Fiber-Wireless Sensor Networks (Fi-WSNs) for Smart Grids (Invited Paper)," in *Proc., International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Jun. 2011, pp. 1–4.
- [8] J. P. Davim and A. N. Pinto, "CAPEX model for PON technology using single and cascaded splitter schemes," in *Proc., IEEE International Conference on computer as a tool (EUROCON)*, Apr. 2011, pp. 1–4.
- [9] T. Smura, "Techno-economic analysis of IEEE 802.16a-based fixed wireless access networks," Master's Thesis, Networking Laboratory, Helsinki University of Technology, Finland, Apr. 2004.
- [10] V. Krizanovic, D. Zagar, and K. Grgic, "Techno-Economic Analyses of Wireline and Wireless Broadband Access Networks Deployment in Croatian Rural Areas," in *Proc., International Conference on Telecommunications (ConTEL)*, Jun. 2011, pp. 265–272.
- [11] J. Chen, L. Wosinska, C. M. Machuca, and M. Jaeger, "Cost vs. Reliability Performance Study of Fiber Access Network Architectures," *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no. 2, pp. 56–65, Feb. 2010.
- [12] J. Nieminen, "Techno-Economics of Mobile WiMAX," Master's thesis, Mar. 2007.
- [13] J. Baliga, R. Ayre, K. Hinton, and R. S. Tucker, "Energy consumption in wired and wireless access networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 6, pp. 70–77, Jun. 2011.

8.2 Article accepté dans la conférence *Asia Communications and Photonics*

Risk Analysis of Integrated Fiber-Wireless Smart Grid Communications Infrastructures Powered by Positive Energy Buildings

Ramzi Charni and Martin Maier

Optical Zeitgeist Laboratory, INRS, Montréal, QC, Canada

{charni,maier}@emt.inrs.ca

Abstract: Emerging positive energy buildings may be exploited for the implementation of smart grid communications infrastructures. We study the risks related to solar power intermittency and random fiber cuts in terms of service penalty and TCO.

OCIS codes: (060.0060) Fiber optics and optical communications; (350.6050) Solar energy

1. Introduction

The communications requirements of a wide range of potential smart grid applications have been recently quantified in terms of latency, bandwidth, and reliability [1]. The authors concluded that a fast and reliable smart grid communications infrastructure is necessary. Although IEEE P2030 doesn't specify any communications technologies of choice, it is favorable to rely on the characteristics of fiber and wireless technologies.

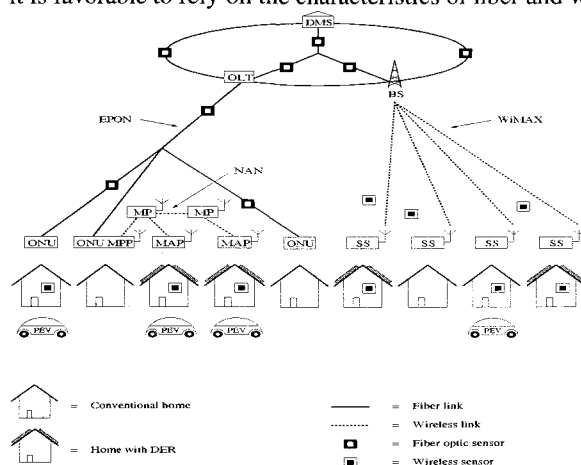


Fig. 1: The Über-FiWi network architecture (NAN: Mesh Portal Point (MPP), Mesh Point (MP), Mesh Access Point (MAP)).

In this paper, we focus on our recently introduced Über-FiWi network that is shared for both broadband access and smart grid communications [2]. As shown in Fig. 1, subscribers connect either via IEEE 802.3ah Ethernet passive optical network (EPON) or IEEE 802.16 WiMAX. In addition, we deploy a mesh neighborhood area network (NAN) based on high-throughput IEEE 802.11n/ac/s WLAN technologies. This solution allows an optical network unit (ONU) installed at a given customer's premises to be shared by nearby homes, thereby significantly reducing the amount of required fiber infrastructure.

Today's market trend toward positive energy buildings let them generate more energy than they consume. This is achieved through the use of locally installed renewable energy sources such as solar or wind. For example, Bouygues, a leading French telecom and building corporation, has initiated the "Green Office" project [3], promoting the game-changing idea that buildings shift from a product to a service (i.e., renewable power supply). However, most renewable sources depend on weather conditions, which render them variable in terms of supply. What differentiates this paper from previous techno-economic studies, e.g. [4], is that we not only compute the total cost of ownership (TCO) but also take risks into account. More specifically, we study the risks related to solar power intermittency and analyze the risks associated with random fiber cuts, which represent the most frequent cause affecting EPON availability.

Technology	Parameter	Value
EPON SA	Number of OLTs	7
	Number of ONUs	28,631
	Number of splitters	448
	Fiber length (km)	18,253
EPON CA	Number of splitters	4027
	Fiber length (km)	6,886
EPON&NAN	Number of OLTs	2
	Number of ONUs	5,206
	Number of splitters	82
	Number of MPPs	3,904
	Number of MAPs	27,382
	Fiber length (km)	3,320
WiMAX	Number of sectors	382
	Number of BSs	64
	Number of SSs	28,631

Table 1: Default Über-FiWi network parameter settings.

2. Solar power intermittency model

Photovoltaic (PV) power generation depends on the amount of solar irradiation, ambient temperature, and energy conversion characteristics of the PV array. In the literature, the Beta distribution has been widely used to model the random behavior of solar irradiation. The output power of a PV array with N modules at irradiation R is given by [5]:

$$P_{PV}(R) = N \cdot R \cdot FF \cdot (V_{OC} - K_v \cdot T_c) \cdot [I_{SC} + K_i \cdot (T_c - 25)] \quad (1)$$

whereby FF is the fill factor, V_{OC} is the open-circuit voltage, K_v is the temperature factor of the voltage, T_c is the cell temperature, I_{SC} is the short-circuit current, and K_i is the temperature factor of the current.

3. Fiber cut probability model

For the wired part of our Über-FiWi network, the most important factor affecting system failure are fiber cuts. In [6], fiber cuts were modelled by the two-parameter Weibull distribution, which has been extensively used in reliability engineering for risk analysis with minimal errors. The fiber cut probability, P_f , can then be computed as

$$P_f(s, l) = 1 - e^{-\left(\frac{l}{l_0}\right) \cdot \left(\frac{s}{s_0}\right)^m}, \quad (2)$$

where l , l_0 , s , s_0 , and m denote the fiber length, normalization factor, stress, Weibull scale, and slope, respectively.

4. Risk analysis

We use Monte-Carlo simulations, which are often used when the model involves random variables. The inputs are fiber stress, solar irradiation, and ambient temperature. We define the following three metrics as outputs of our simulations.

4.1. Total cost of ownership (TCO)

TCO is divided into capital (CAPEX) and operational expenditures (OPEX). OPEX can be further subdivided into controlled items, which can be calculated in detail, and uncontrolled items that depend on risk factors. We apply the methodology presented in [4] for CAPEX and controlled OPEX calculation. Importantly, note that uncontrolled OPEX also include power service penalties, PSP , related to solar power intermittency and fiber cut related costs, FCC .

4.2. Power service penalties (PSP)

When renewable resources are unavailable, this might result in PSP , which can be calculated as

$$PSP = (P_{needed} - P_{generated}) \cdot P_{unit}, \quad (3)$$

where P_{needed} , $P_{generated}$, P_{unit} denote the power needed per user for our Über-FiWi network, power generated by a PV array, and given power cost per unit, respectively. $P_{generated}$ is obtained from Equ. (1) while P_{needed} is given by

$$P_{needed} = \frac{2 \cdot P_{TU}}{N_{TU}} + \frac{P_{RN}}{N_{RN}} + P_{CPE}, \quad (4)$$

where P_{TU} , P_{RN} , and P_{CPE} denote the power consumed by a terminal unit (TU) (i.e., OLT, MPP), remote node (RN) (i.e., splitter, BS, MP), and customer premises equipment (CPE) (i.e., ONU, SS, MAP), respectively. N_{TU} and N_{RN} are the number of subscribers that share a TU and RN, respectively. Typical power consumption values are taken from [7].

4.3. Fiber cut related costs (FCC)

FCC include failure repair costs and penalties associated with service interruption [4]:

$$FCC = TS \cdot \sum_f (MTTR_f \cdot NTR_f) + P_u \cdot \sum_f (MTTR_f \cdot IC_f), \quad (5)$$

where TS , $MTTR_f$, NTR_f , P_u , and IC_f denote the technician hourly salary, the mean time to repair a failure f , the number of technicians required, the penalty unit, and the number of interrupted connections, respectively.

5. Results

We consider an urban area, which covers 80 km^2 and has 96,000 inhabitants living in 33,684 buildings. Parameter settings for our simulations are shown in Table I. We also set the number of iterations to 1000. We first begin by computing the power needed for the Über-FiWi network by using Equ. (4). We found that the power consumed per user is equal to 7.62, 16.45, and 33.65 W, for EPON, EPON&NAN, and WiMAX, respectively. Next, we assume that positive energy buildings deploy a PV array with one module for each user. We consider BlackPearl STP300-24/Vd PV modules sized $1956 \times 992 \times 50 \text{ mm}$ by Power Suntech. As shown in Fig. 2(a), positive energy buildings are not able to create the power needed for EPON and EPON&NAN in about 21.72% and 39.07% of our considered cases, respectively. For WiMAX, buildings will create less than the power needed in 67.12% of the cases. After estimating the power generation, we created the probability distributions of PSP for different Über-FiWi network configurations. As

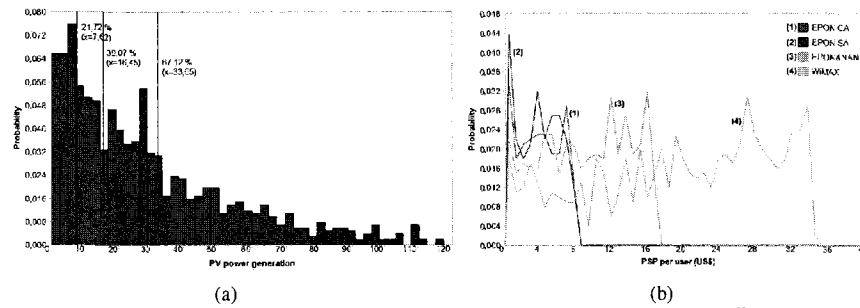


Fig. 2: (a) PV power generation and (b) service penalties distributions for the Über-FiWi network.

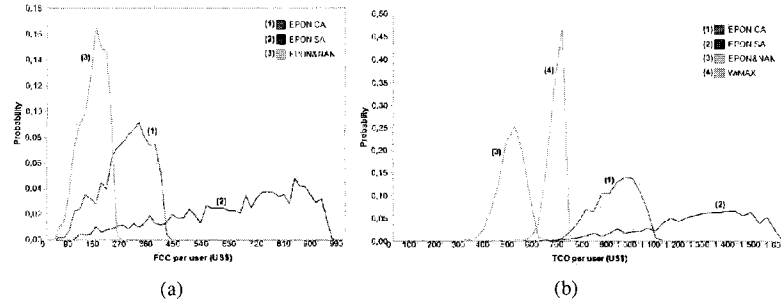


Fig. 3: Distributions for (a) fiber cut related costs and (b) TCO for the Über-FiWi network.

illustrated in Fig. 2(b), WiMAX is the solution mostly affected by solar power intermittency. Further, EPON&NAN has more risk in terms of PSP than EPON single-stage (SA) and cascaded architectures (CA). In order to mitigate intermittency, we might exploit available energy storages, e.g., plug-in electric vehicles (PEVs) in Fig. 1, which render intermittent supplies more reliable. For example, when our PV module generates only 6.5 W, the amount of storage needed for EPON, EPON&NAN, and WiMAX would be 1.12, 9.95, and 27.15 W, respectively.

Fig. 3(a) illustrates the probability distributions of fiber cut related costs per user. EPON SA is affected by random fiber cuts the most. Furthermore, EPON&NAN has the lowest risk because of its reduced amount of fiber deployed. Fig. 3(b) depicts the TCO per user distributions. We observe that EPON&NAN is the most cost-efficient solution, EPON SA has the highest TCO per user, and WiMAX outperforms EPON CA in most cases.

6. Conclusions

We have compared different Über-FiWi network configurations in terms of PSP, FCC, and TCO. We found that EPON&NAN is the most cost-efficient solution and has the lowest risk related to fiber cut. We also prove that positive energy buildings are not able to create the power needed for EPON, EPON&NAN, and WiMAX in just 21.72% and 39.07%, and 67.12% of our considered cases, respectively. Thus, WiMAX is the solution mostly affected by solar power intermittency. However, introducing the third pillar of Jeremy Rifkin's Third Industrial Revolution by deploying storage methods (e.g., hydrogen, PEV) may be a good approach to get better findings.

References

1. V. C. Gungor, D. Sahin, S. Ergut, and C. Buccella, "A Survey on Smart Grid Potential Applications and Communication Requirements," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 9, no. 1, pp. 28-42 (2013).
2. M. Maier, M. Lévesque, and L. Ivanescu, "NG-PONs 1&2 and Beyond: The Dawn of The Über-FiWi Network," *IEEE Network*, vol. 26, no. 2, pp. 15-21 (2012).
3. <http://www.green-office.fr/>.
4. J. Chen, L. Wosinska, C. M. Machuca, and M. Jaeger, "Cost vs. Reliability Performance Study of Fiber Access Network Architectures," *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no. 2, pp. 56-65 (2010).
5. A. Soroudi, M. Aien, and M. Ehsan, "A Probabilistic Modeling of Photo Voltaic Modules and Wind Power Generation Impact on Distribution Networks," *IEEE Systems Journal*, vol. 6, no. 2, pp. 254-259 (2012).
6. F. Domingues and A. M. Rocha, "Failure probability of optical fiber under high optical power and small bend diameters," in *Proc., IEEE Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, pp. 440-443 (2011).
7. J. Bagila, R. Ayre, K. Hinton, and R. S. Tucker, "Energy consumption in wired and wireless access networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 6, pp. 70-77 (2011).

8.3 Article soumis dans *IEEE Transactions on Smart Grid*

Total Cost of Ownership and Risk Analysis of Collaborative Implementation Models for Integrated Fiber-Wireless Smart Grid Communications Infrastructures

Ramzi Charni and Martin Maier
Optical Zeitgeist Laboratory, INRS
Montréal, QC, Canada
Email: {charni,maier}@emt.inrs.ca

Abstract—Most previous total cost of ownership (TCO) studies give insight into the overall costs of various communications network architectures under the assumption of the traditional vertical integration model. However, it is necessary to take a closer look at the possibilities and gains achieved through collaboration. In this work, we develop a flexible, generic yet comprehensive TCO framework for the rollout of integrated fiber-wireless (FiWi) smart grid communications infrastructures. Further, we propose a novel collaborative implementation model for a shared infrastructure for both broadband access and smart grid communications. In addition, we take into account that buildings currently shift from a product to a service (i.e., renewable power supply) and exploit the idea that housing companies may collaborate by offering surplus renewable energy to communications network providers across interconnected smart microgrids. We study the impact of our implementation model on TCO and compare it with the vertical integration model. We also conduct a sensitivity analysis for the key cost parameters and analyze the risks related to solar power intermittency and random fiber cuts in terms of power service penalty, fiber cut related costs, and TCO.

I. INTRODUCTION

The communications requirements of a wide range of potential smart grid applications have been recently quantified [1]. The authors concluded that a scalable, fast, and reliable smart grid communications infrastructure is necessary. Although IEEE P2030 doesn't specify any communications technology of choice, it is favorable to rely on the exceptionally low-latency characteristics of fiber optic facilities and wireless technologies, where fiber is available to some but not all points of the system.

A scalable, pervasive, and reliable communications infrastructure is crucial to the success of the emerging smart grid. Most of the previous studies related to smart grid communications address the technological requirements and challenges to ensure performance and reliability. Several papers have been published addressing these issues, e.g. [2], which compares different wired and wireless communications technologies in

terms of their bandwidth, latency, and coverage range. Most previous studies, e.g., [3][4][5], have focused on technological problems giving invaluable insights into the pros and cons of a wide range of available smart grid communications technologies. However, the key challenge of today is more about economic rather than technological issues. Many questions have to be answered like: How much does it cost to deploy a given smart grid communications infrastructure? What is the most cost-efficient communications technology? How to implement the infrastructure in order to reduce its TCO? What is the impact of collaboration on TCO, including related risks?

In this work, we develop a flexible, generic yet comprehensive TCO framework, which calculates the overall costs related to the rollout of integrated FiWi smart grid communications technologies for different deployment scenarios. The validity of the TCO framework will be demonstrated via an example FiWi smart grid communications infrastructure. We note that a general TCO framework has been developed in [6], whose main contribution was a capital and operational expenditures (CAPEX/OPEX) analysis that can be applied to any broadband access network. Many previous TCO studies exist, e.g., [7], which provides a model for the cost assessment of four next-generation optical access (NGOA) architectures. These studies provide insights into the overall costs of various architectures for different scenarios. However, evaluating a deployment project is much more than just summing up all costs. In fact, most of the previous TCO analyses considered the traditional vertical integration model. However, in realistic network deployments, e.g., fiber-to-the-home (FTTH) implementations in Stockholm or Citynet in Amsterdam [8], these costs are often not carried by a single actor. It is necessary to take a closer look at the gains achieved through collaboration, especially in situations where the infrastructure would not naturally be installed by one actor alone. A first step in this direction can be seen in recent studies, where the authors take into account the impact of implementation models, e.g., [9], which compares various NGOA networks for different implementation models and allocates TCO to different actors, or [10], which presents an approach to cost sharing in the rollout of optical access

A shorter version of this paper is presented at the conference IEEE SmartGridComm 2013, Vancouver, BC, Canada. This work was supported by NSERC Strategic Project Grant No. 413427- 2011.

network and examines the cost-benefit tradeoffs arising from the collaboration between a telecom network provider and an energy network provider at the fiber level.

In this paper, we compare different implementation models for integrated FiWi smart grid communications infrastructures both qualitatively and quantitatively by using our developed TCO framework. What differentiates this paper from previous works is that we contribute a novel collaborative implementation model, in which we consider a shared infrastructure for broadband access and smart grid communications. We apply the open access concept at different levels. In addition, housing companies are anticipated to increasingly collaborate by offering locally generated renewable energy to network providers, whereby most renewable sources depend on weather conditions, which render them variable in terms of supply. In this work, we study the risks related to solar power intermittency and analyze the risks associated with random fiber cuts, which represent the most frequent cause affecting the availability of optical access networks.

II. TOTAL COST OF OWNERSHIP FRAMEWORK

To meet the stringent requirements of the smart grid, a wide range of possible wired and wireless smart grid communications technologies have been proposed and investigated, e.g., digital subscriber line (DSL), cable modem, cellular, power line communications (PLC), WiFi, etc. [11]. All of them have their own advantages and drawbacks and companies therefore have found it difficult to find a single technology or group of technologies that fits every requirement for the efficient use and economic development of smart grid communications. After discussing in detail the respective pros and cons of a variety of available access networking technologies, our recent study [4] elaborated on the rationale behind the design choices of a few selected optical and wireless networking technologies (i.e., EPON, WiMAX, WLAN-mesh NAN) and showcased their suitability to build low-cost, simple, and future-proof smart grid communications infrastructures.

A. Dimensioning tool

This tool gives the required equipment and infrastructure to cope with the given demand, network, and topology. Its output will be a driver for major cost components. Thus, optimizing this step will lead to an overall decrease in TCO.

1) *Optical access network dimensioning*: There are two main categories: active and passive optical networks. Active optical networks (AONs) can be further divided into two classes: home run fiber and active star architecture. The first one is a point-to-point (P2P) network, which offers a dedicated fiber from the central office (CO) to each user. In case of an active star, an active switch is deployed at the remote node (RN) close to the end users and only a single fiber is needed for the connection between the CO and the active switch. Passive optical networks (PONs) are point-to-multipoint (P2MP) networks based on unpowered optical splitters. The two most important time division multiplexing (TDM) PON systems are: IEEE 802.3ah Ethernet PON

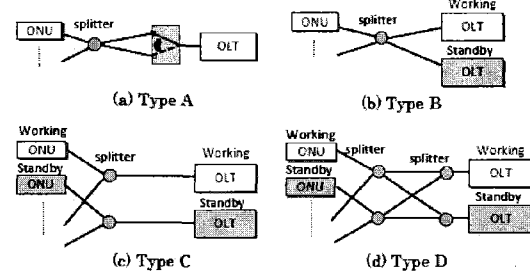


Fig. 1: PON protection schemes defined by ITU-T.

(EPON) and ITU-T G.984.1 Gigabit-capable PON (GPON). Next-generation PONs include long-reach and wavelength division multiplexing (WDM) PONs.

It is important to realize PONs with higher reliability but without excessive additional cost for redundant components. The cost and availability of PONs with protection depend strongly on what is being protected. PON protection schemes are defined in ITU-T G.983.1, referred to as type A, B, C, and D, as shown in Fig. 1. With Type A, only the feeder fiber is redundant. The protection scheme detects a fiber cut and switches to the spare fiber. Type B duplicates the shared part of the PON, i.e., feeder fiber and optical line terminal (OLT). Type C applies 1+1 dedicated path protection with full duplication of PON resources. Finally, Type D is the most reliable of the four PON protection schemes. This configuration is rarely deployed due to its complexity.

All optical access networks have a reach limitation of fiber between the OLT and optical network units (ONUs) (e.g., 20 km for EPON). The OLT has limitations on the number of ports, which are bundled in cards with typically 2, 4, or 8 ports per card. The number of splitters, $N_{Splitter}$, is computed by dividing the number of households in the area by the splitting ratio. Thus, the number of OLTs, N_{OLT} , is given by [12]

$$N_{OLT} = \frac{N_{Splitter}}{N_{Card} \cdot N_{Port}}, \quad (1)$$

where N_{Card} and N_{Port} denote the number of cards per OLT and the number of ports per card, respectively. An optical access network can be implemented with two different topologies: single-stage or cascaded architecture. In the first case, the estimation of the fiber length L is given by [12]

$$L = \beta \cdot \bar{d} + N_{df} \cdot (1 - \beta) \cdot \bar{d}, \quad (2)$$

where $\beta \in [0, 1]$ is an important network design parameter that represents the position of the splitter, N_{df} denotes the number of distribution fibers, and $\bar{d}$ is the average distance from the OLT to ONUs, which can be estimated as

$$\bar{d} = \frac{2 \cdot R}{3}, \quad (3)$$

where R is the average radius of an OLT's coverage area. For example, for an area of 300 km², which is served by 8 OLTs, on average each OLT covers an area of 37.5 km², translating into a circle radius R of 3.45 km and $\bar{d}$ of 2.3 km.

In the case of a cascaded architecture, L is given by

$$L = \sum_{k=1}^n (F_e(k) + D_i(k) + D_r(k)), \quad (4)$$

where n is the number of regions in the given area and F_e , D_i , and D_r denote the feeder, distribution, and drop fiber length, respectively.

2) *Wireless access network dimensioning*: Wireless access network topologies can be divided into three main categories: P2P, P2MP, and mesh networks. P2P networks consist of one or more fixed links employing directional antennas at both ends of the link. A P2MP network consists of a number of base stations (BSs), each one connected to multiple users. In a mesh topology, the end-user terminals act also as routers. Mesh networks improve the coverage of a wireless access network as each subscriber can be effectively seen as a BS serving subscribers nearby.

As of today, wireless local area network (WLAN) is the most widely deployed wireless technology. A typical WLAN consists of an access point and wireless stations connected to it. Another well-known wireless technology is WiMAX based on the IEEE 802.16 wireless metropolitan area network (WMAN) standard. WiMAX typically has a P2MP topology, where a BS serves multiple subscriber stations (SSs). The mobile radio access network consists of a radio network controller (RNC) controlling several BSs, e.g., universal mobile telecommunications system (UMTS).

The dimensioning of wireless access networks includes two phases: capacity and coverage dimensioning. In the first phase, the goal is to satisfy the demand of all customers, while in the second phase the goal is to cover the biggest area possible with the smallest amount of equipment.

- **Capacity dimensioning:**

The objective is to estimate the required number of BSs and sectors to satisfy the demands of all subscribers in the area. We begin by computing the maximum number of subscribers to be connected to a single sector $N_{subs/sector}$ as follows [13]:

$$N_{subs/sector} = \frac{T_{sector} \cdot C}{T_{AVG}}, \quad (5)$$

where T_{sector} , T_{AVG} , and C denote the traffic capacity of one sector, average throughput per subscriber, and concentration factor, respectively. Then, the capacity-based number of BSs can be expressed as follows:

$$N_{BSs} = \frac{N_{Households}}{N_{subs/sector} \cdot N_{sectors/BS}}, \quad (6)$$

where $N_{sectors/BS}$ denotes the number of sectors per BS.

- **Coverage dimensioning:**

The objective is to ensure that the capacity-driven number of BSs is enough to serve all customers in the given area. The number of BSs to be actually built will be the larger one of both dimensioning phases. The $range_{BS}$ for n BSs and area

size L^2 equals $\frac{1}{2 \cdot n} \cdot \sqrt{2} \cdot L$. Thus, the coverage-driven number of BSs is calculated as follows:

$$N_{BSs} = \frac{1}{2 \cdot range_{BS}} \cdot \sqrt{2} \cdot L. \quad (7)$$

According to [13], the WiMAX $range_{BS}$ may be set to 0.5 km for urban areas using indoor customer premises equipment (CPE) antennas, 1.5 km for urban areas using outdoor CPE antennas, or 10 km for rural areas using outdoor CPE antennas. Further, the UMTS $range_{BS}$ may be set to 0.89 km and 6.36 km in urban and rural areas, respectively [14].

B. CAPEX model

1) *Equipment cost*: The equipment $Cost_{Equip}$ is given by

$$Cost_{Equip} = \sum_c d_c \cdot p_c, \quad (8)$$

where c is the equipment type and d_c and p_c denote the required quantity of this type of equipment and its unit price, respectively.

2) *Infrastructure cost*: This CAPEX component includes cable costs $Cost_{ca}$ as well as civil work (e.g., digging trenches and installing ducts in the trenches) related costs $Cost_{cw}$. We first have to calculate L by using Eq. (2) or Eq. (4). Then, we can compute the infrastructure cost $Cost_{Infra}$ as follows [12]:

$$Cost_{Infra} = L \cdot (Cost_{ca} + Cost_{cw}). \quad (9)$$

3) *Installation cost*: It is computed by multiplying the installation time and technician hourly salary, TS . Accordingly, $Cost_{Insta}$ is given by [15]

$$Cost_{Insta} = \sum_i (IT_i + 2 \cdot T_i) \cdot TS \cdot NT_i, \quad (10)$$

where IT_i , T_i , and NT_i denote the installation time, the traveling time from the CO to the faulty component i , and the number of required technicians, respectively.

4) *Non-telecom related cost*: The major component of non-telecom related cost is licensing fees, which typically depends on the utilized bandwidth of the equipment (e.g., BS).

C. OPEX model

1) *Operation, administration, and maintenance (OAM) costs*: Previous studies [13] [16] estimate the OAM costs of a wireless access network (e.g., LTE, WiMAX) to be 20% of CAPEX. However, for optical access networks, OAM costs that have been analyzed are the ones related to network failures, i.e., failure reparation costs, FR , and penalties, P , associated with service interruption. FR depends on the network lifetime, total number of network components, and technician hourly salary, TS . For each component, it also depends on the expected number of failures in time, FIT , number of persons required to repair a failure, NTR_f , and mean time to repair, $MTTR_f$. Thus, FR is given by [6]

$$FR = TS \cdot \sum_f (MTTR_f \cdot NTR_f). \quad (11)$$

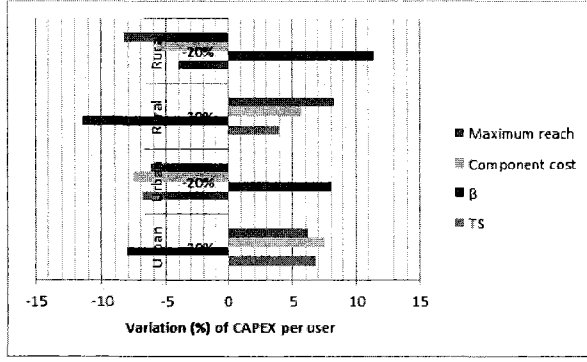


Fig. 2: Variation (%) of CAPEX per user for urban and rural areas for +20% and -20% changes of different parameters.

On the other hand, P can be expressed as the product of the connection interruption time and the penalty unit of each particular connection according to the given service level agreement (SLA). Accordingly, P can be computed by [15]

$$P = P_u \cdot \sum_f (MTTR_f \cdot IC_f), \quad (12)$$

where P_u and IC_f denote the penalty for an hour of interrupted connection and the number of interrupted connections associated with failure f , respectively.

For optical access networks, the most important factor affecting system failures are fiber cuts. Thus, it is key to take this into account through an appropriate probabilistic model. In [17], fiber cuts were modeled by the two-parameter Weibull distribution. This distribution is extensively used in reliability engineering because it provides accurate failure analyses and risk predictions with minimal errors. The fiber cut probability, P_f , is thus expressed as follows:

$$P_f(s, l) = 1 - e^{-\left(\frac{l}{l_0}\right) \cdot \left(\frac{s}{s_0}\right)^m}, \quad (13)$$

where l , l_0 , s , s_0 , and m denote the fiber length, normalization factor, stress, Weibull scale, and slope, respectively. The Weibull slope, m , is a measure of scatter strength and indicates how the failure rate develops over time. The Weibull scale, s_0 , gives indications on the prevalent failure modes.

Despite the low probability of fiber failures, the associated risk may be significant because of the high cost of fiber repair and penalties. Fiber cuts related costs, FCC , are given by

$$FCC = FR + P. \quad (14)$$

2) *Continuous costs*: This OPEX component includes the leasing of equipment and antenna sites. The cost of renting a location depends on its height, size, and availability. One of the major continuous costs of a wired or wireless access network is power consumption. The power consumption per user can be computed as follows:

$$P_{user} = \frac{\alpha \cdot P_{TU}}{N_{TU}} + \frac{\beta \cdot P_{RN}}{N_{RN}} + P_{CPE}, \quad (15)$$

where (α, β) is typically set to (2,1) [18]. These two factors account for additional overhead such as external power supplies, electricity distribution losses, and cooling requirements for a terminal unit (TU) (e.g., OLT) and RN (e.g., BS), respectively. By contrast, a CPE (e.g., ONU, SS) is cooled naturally by the surrounding environment. P_{TU} , P_{RN} , and P_{CPE} denote the power consumed by the TU, RN, and CPE, respectively. N_{RN} and N_{TU} denote the number of subscribers that share an RN and TU, respectively.

D. Sensitivity analysis tool

Sensitivity analysis allows for identifying the key cost factors that should be carefully considered when implementing an access network. For illustration, we have generated a sensitivity analysis graph (Fig. 2) for an EPON. It depicts the CAPEX per user variation in urban/rural areas, when one of the cost parameters such as maximum reach, component cost, β , and TS vary in the range between -20 and 20%. We observe that β is the most important parameter affecting CAPEX in urban or rural areas. In urban areas, as compared to the maximum reach, TS and component cost variations have a larger impact on CAPEX per user. However in rural areas, the maximum reach has a higher impact than the other parameters.

III. IMPLEMENTATION MODELS

A. Vertical integration model

In this model, one actor is responsible for all roles across different network layers and life cycle phases. There is just one entity, which delivers the service, operates, and owns the network. However, today the amount of available services is booming and the traditional model is becoming inefficient. In realistic deployment cases, e.g., Stockholm and Amsterdam, costs are not carried by a single actor. This model will be our reference case in order to identify the impact of other collaborative implementation models on TCO.

B. Open access model

This model is used to define networks where different actors are allowed to offer their services over a single infrastructure on a fair and non-discriminatory basis. The network may be opened at the passive layer. In this case, the passive infrastructure is built and maintained by one owner, who opens up this infrastructure for network and service operators. The competition on top of this layer is supposed to lead to a higher take-up rate. In a fully open access model, the network is opened at different levels. Each layer is owned by a different actor, with the infrastructure owner generating income by providing passive infrastructure access to the network operator, who in turn wholesales broadband access to service providers.

C. Our proposed collaborative implementation model

Fig. 3 gives a visual representation of our proposed value network for FiWi smart grid communications infrastructures. The value chain indicates which actors take which roles and how they interact. In addition, the value streams between the different actors are identified. We consider a single common

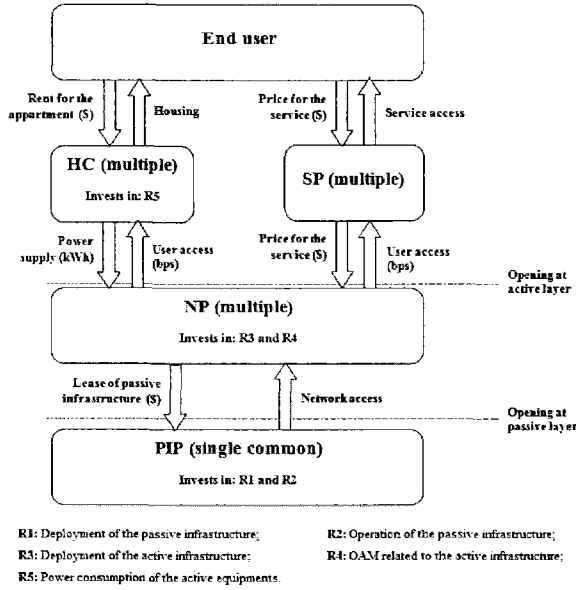


Fig. 3: Value chain for the collaborative implementation of FiWi smart grid communications infrastructures.

passive infrastructure provider (PIP) that owns and operates the passive infrastructure. Current regulation allows placing an electricity cable on top of a fiber cable, taking into account a safety distance between the cables. Thus, collaboration at the passive layer between telecommunications operators and energy network providers will reduce the cost per partner involved. Several network providers (NPs) are allowed to operate the active network, whereby each one is responsible for a separate geographical area. NPs own the active network, assume the OAM costs, and pay the PIP for using the passive infrastructure. NPs receive revenues from service providers (SPs) and in return offer access to the active network.

Today's market trends toward positive energy buildings let them generate locally more energy than they consume. This is achieved through use of distributed renewable energy sources such as solar, wind, hydro, geothermal, or biomass. Positive energy buildings might be constructed by public (e.g., municipalities) or private housing companies (HCs). For example, Bouygues, a leading French office building promoter, has initiated the "Green Office" project in Meudon. This project represents France's first large-scale positive energy building. The Green Office's consumption will be 62 kWh/m²/year, yet it will produce 64 kWh/m²/year of local renewable energy. Thus, the game-changing idea is that buildings shift from a product to a service (i.e., renewable power supply). As shown in our value network, we consider HCs as SP actors. They collaborate by offering positive energy to NP. When a positive energy building is not able to offer the needed amount of energy, this might lead to power service penalties that should be paid by the housing company. The paradigm shift gives rise to our new collaborative implementation model, which is defined by mapping roles to the different actors, as shown in Fig. 3. Most renewable sources depend on

weather conditions. This makes renewable energy variable in terms of supply. In order to mitigate this intermittency, the idea is to allow a building to share the surplus energy with buildings across interconnected smart microgrids. In other words, all positive energy buildings together create a common local energy network. Storage technologies may have to be implemented in buildings and throughout the infrastructure in order to store the surplus energy to be shared. The surplus energy generated by buildings can also be stored in plug-in electric vehicles (PEVs), which serve as mobile energy storages that can provide electricity back to the main grid.

In this paper, we focus on solar photovoltaic (PV) energy because it has taken a commanding lead among renewable sources. PV power generation depends on the solar irradiation, ambient temperature, and energy conversion characteristics of the PV array. The model of a PV solar generator consists of two parts: the solar irradiation function and the power generation function, which links the solar irradiation to the power output of the PV. In the literature, e.g., [19], the Beta distribution has been widely used to model the random behavior of the solar irradiation. Accordingly, the output power of a PV array with n modules at irradiation r is given by

$$P_{PV} = n \cdot r \cdot FF \cdot (V_{oc} - k_v \cdot T_c) \cdot [I_{sc} + k_i \cdot (T_c - 25)] \quad (16)$$

whereby FF is the fill factor, V_{oc} is the open-circuit voltage, k_v is the temperature factor of the voltage, T_c is the cell temperature, I_{sc} is the short-circuit current, and k_i is the temperature factor of the current.

As discussed above, when positive energy buildings are not able to provide the needed amount of energy, this might lead to power service penalties, PSP, which can be expressed as

$$PSP = (P_{needed} - P_{generated}) \cdot P_{unit}, \quad (17)$$

where P_{needed} , $P_{generated}$, P_{unit} denote the power needed per user for the smart grid communications infrastructure, power generated by a PV array, and given power cost per unit, respectively. P_{needed} is obtained from Equ. (15) while $P_{generated}$ is calculated by Equ. (16).

IV. RESULTS

To study the impact of our proposed collaborative implementation (CI) model, we begin by presenting the results for our reference case of the vertical integration (VI) model. Then, we show how our proposed CI model reduces the overall costs for integrated FiWi smart grid communications infrastructure. In our studies, we consider our recently introduced Über-FiWi network [20], a FiWi network infrastructure shared for both smart grid communications and broadband access. As shown in Fig.4, homes connect to the infrastructure either via IEEE 802.3ah EPON or IEEE 802.16 WiMAX. In rural areas with a small population density, subscribers connect to the WiMAX BS via SSs. For densely populated or fiber-rich settings, subscribers connect to the EPON OLT via ONUs. In addition, we deploy a WLAN based mesh neighborhood area network (NAN) based on high-throughput next-generation IEEE 802.11n/ac WLAN and IEEE 802.11s mesh WLAN

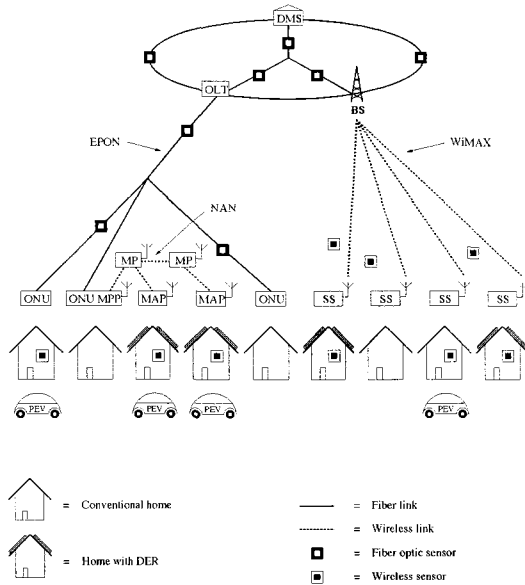


Fig. 4: The Über-FiWi network architecture [20].

technologies. This approach allows an ONU installed at a given customers premises to be shared by other nearby homes, thereby significantly reducing the amount of fiber deployed. The NAN consists of the following three types of node: mesh portal point (MPP), which is collocated at the ONU and acts as the interface to the NAN; mesh access points (MAPs), which provide subscribers with access to the NAN; and mesh points (MPs), which are the intermediate NAN nodes that relay packets between the MPP and MAPs.

When applying the generic CAPEX model to our Über-FiWi network, the EPON component and installation related costs are taken from [12] [15]. The price of fiber as well as its civil work related cost is taken from [14]. Further, WiMAX and WLAN-based mesh NAN component costs are taken from [16] and [13], respectively. When applying the generic OPEX model, the values of $MTTR$, NTR , and FIT are obtained from [15], while site rental costs per year are taken from [14] and [16]. The typical power consumption values are taken from [18].

A. Base case

We compare the following configurations: EPON single-stage architecture (EPON SA), EPON cascaded architecture (EPON CA), EPON&NAN, and WiMAX. We consider two deployment scenarios: urban and rural areas with 1,200 and 100 users/km², respectively. The urban area covers 80 km² and has 96,000 inhabitants living in 33,684 households, whereas the rural area covers 120 km² with 12,000 inhabitants living in 4,210 households. The OAM and continuous costs are given for a study lifetime of 10 years. The take-up rate is assumed to be 70%. The single-stage architecture has splitters of type 1:64, whereas the cascaded architecture has first- and second-stage splitters of type 1:8. For EPON&NAN, the parameter γ denoting the percentage of ONUs equipped with an MPP is

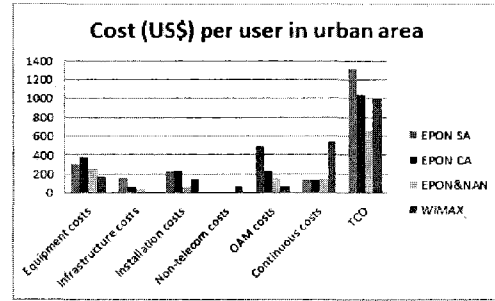


Fig. 5: TCO per user breakdown of the Über-FiWi network based on the VI model.

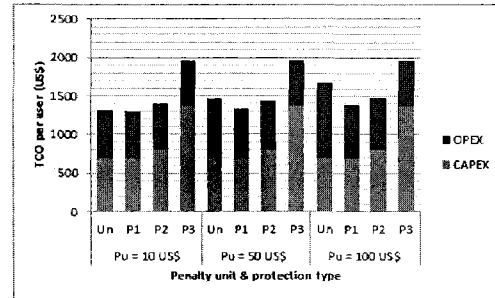


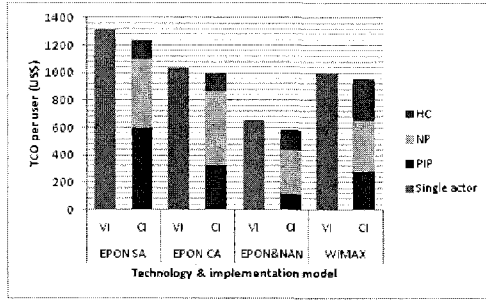
Fig. 6: TCO per user for different protection schemes of EPON single-stage architecture.

set to 50%. For WiMAX, we consider 6 sectors per BS and a capacity of 15 Mbps for each sector.

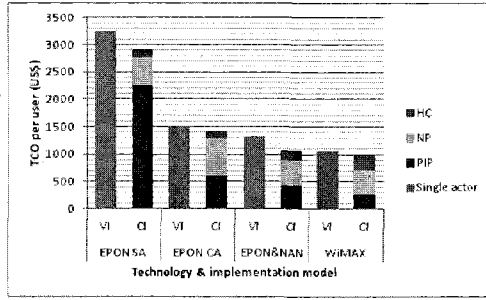
Fig. 5 depicts the cost breakdown of the Über-FiWi network in the urban area. We observe that the EPON&NAN solution has the lowest TCO per user followed by WiMAX and EPON. Note that applying a cascaded architecture results in major cost savings. Furthermore, we observe that OAM costs (e.g., FR, P) are the most costly OPEX components for the different optical access networks, whereas continuous costs (e.g., power consumption) are the most important one for WiMAX. We also studied rural areas and we found that WiMAX is the best solution. Note that the equipment, installation, and continuous costs are similar in both deployment scenarios. However, the infrastructure costs are affected especially by the trenching cost, which is significantly higher in rural areas due to the longer distances and fewer subscribers to share the costs.

B. Impact of protection on CAPEX and OPEX

Fig. 6 compares different protection types for an EPON single-stage architecture in urban areas for different values of P_u . Clearly, a protected architecture generally increases the amount of required equipment and leads to an increase of CAPEX. Protection type P1 does not imply much additional CAPEX. It only increases the infrastructure costs. However, the deployment of protection types P2 or P3 causes a rise of all CAPEX components. On the other hand, failure repair costs increase in protected scenarios since there are more components and therefore more failures may have to be repaired. Conversely, the penalties decrease considerably in protected scenarios, representing the predominant OPEX



(a)



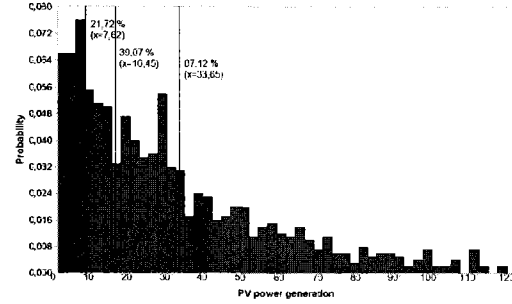
(b)

Fig. 7: TCO per user per actor of the Über-FiWi network in (a) urban and (b) rural areas.

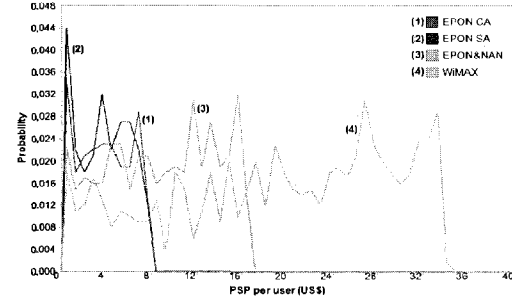
factor. In addition, the impact of P_u is more pronounced for protected schemes. It can be seen that CAPEX is higher than OPEX for the different architectures. Especially for protected topologies, CAPEX dominate TCO much more. Fig. 6 also shows that for all P_u values the most cost-efficient solution is to deploy an EPON with protection scheme P1, whereas the most expensive architecture is an EPON with protection scheme P3. We observe that implementing an unprotected EPON is better than a P2 topology in case of lower penalty units ($P_u = 10$ US\$). We also examined rural areas. We found that for a lower penalty unit ($P_u = 10$ US\$), P1 is still the best solution, whereas for higher values P2 is the best protection scheme. We note that P3 is the worst topology for $P_u = 10$ or 50 US\$. However, it is better than an unprotected architecture for $P_u = 100$ US\$. Finally, we observe that the impact of penalty unit on costs is much higher in rural than urban areas.

C. Impact of collaborative implementation model on TCO

To take into account the higher take-up rates achieved by opening up the passive and active layers, we assume a 15% take-up rate increase. Our proposed CI model advocates the EPON&NAN solution and we thus assume that 75% of ONUs are equipped with an MPP. Fig. 7 depicts the cost per user for different actors of the VI and CI models. In general, we observe that our proposed model entails cost savings for the different technologies in both urban and rural areas. Assuming that HC generate the energy consumed locally for free, HC costs may be set to 0 US\$. Further, it can be seen that there exists a large geographical impact on the cost allocation to actors. The majority of costs is taken up by the NP in the



(a)



(b)

Fig. 8: (a) PV power generation and (b) service penalties distributions of the Über-FiWi network.

urban area, while PIPs face higher costs in rural areas.

D. Risk analysis

In our risk analysis, we use Monte-Carlo simulations, which are often used when the model involves random variables. The input parameters are fiber stress, solar irradiation, and ambient temperature. We set the number of iterations to 1000. We first begin by computing the power needed for the Über-FiWi network by using Equ. (15). We found that the power consumed per user is equal to 7.62, 16.45, and 33.65 W, for EPON, EPON&NAN, and WiMAX, respectively. Next, we assume that positive energy buildings deploy a PV array with one module for each user. We consider BlackPearl STP300-24/Vd PV modules sized 1956x992x50 mm by Power Suntech. As shown in Fig. 8(a), positive energy buildings are not able to create the power needed for EPON and EPON&NAN in about 21.72% and 39.07% of our considered cases, respectively. For WiMAX, buildings will create less than the power needed in 67.12% of the cases. After estimating the power generation, we create the probability distributions of PSP for different Über-FiWi network configurations. As illustrated in Fig. 8(b), WiMAX is the solution mostly affected by solar power intermittency. Further, EPON&NAN exhibits a higher risk in terms of PSP than EPON single-stage (SA) and cascaded architectures (CA). In order to mitigate intermittency, we might exploit available energy storages such as the PEVs of Fig. 4, which render intermittent supplies more reliable. For example, when our PV module generates only 6.5 W, the amount of storage needed for EPON, EPON&NAN, and WiMAX would be 1.12, 9.95, and 27.15 W, respectively.

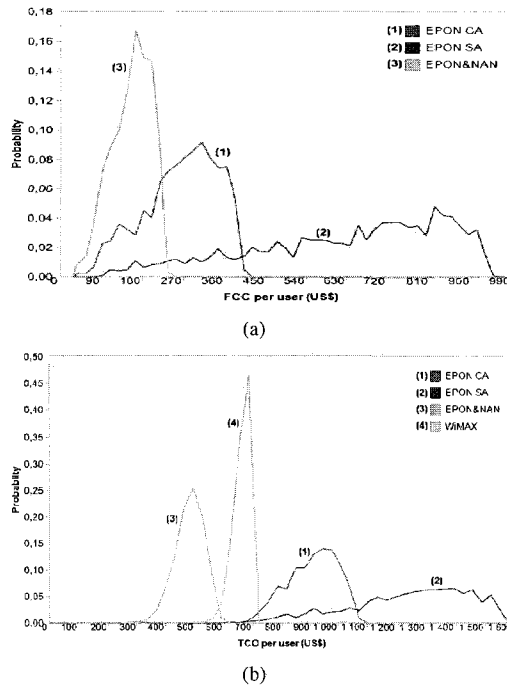


Fig. 9: Distributions of (a) fiber cut related costs and (b) TCO per user of the Über-FiWi network.

Fig. 9(a) illustrates the probability distribution of fiber cut related costs per user. EPON SA is affected by random fiber cuts the most. Furthermore, EPON&NAN has the lowest risk because of its reduced amount of fiber deployed. Fig. 9(b) depicts the TCO per user distributions. We observe that EPON&NAN is the most cost-efficient solution, EPON SA has the highest TCO per user, and WiMAX outperforms EPON CA in most cases.

V. CONCLUSIONS

We have shown that our proposed collaborative implementation model allows cost savings for different optical and wireless communications technologies in urban and rural areas. There exists a large geographical impact on the cost allocation to different actors. The majority of the cost is taken up by network providers in an urban area. However, passive infrastructure providers face higher costs in rural areas. In urban areas, we found that the most cost-efficient solution is to deploy EPON with protection scheme P1. In rural areas, for a lower penalty unit ($P_u = 10$ US\$), P1 is still the best solution, whereas for higher values P2 is the best protection scheme. We also have compared different smart grid communications configurations in terms of PSP, FCC, and TCO. We found that EPON&NAN is the most cost-efficient solution and has the lowest risk related to fiber cuts. We have also shown that positive energy buildings are not able to create the power needed for EPON, EPON&NAN, and WiMAX in 21.72% and 39.07%, and 67.12% of our considered cases, respectively. Thus, WiMAX is the solution mostly affected by solar power intermittency. However, deploying storage

methods (e.g., PEV) may be a good approach to obtain better results.

REFERENCES

- [1] V. C. Gungor, T. Kocak, and T. Kovac, "A Survey on Smart Grid Potential Applications and Communication Requirements," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 9, no. 1, pp. 28–42, Feb. 2013.
- [2] M. Kuzlu and M. Pipattanasomporn, "Assessment of Communication Technologies and Network Requirements for Different Smart Grid Applications," in *Proc., IEEE Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, Washington, DC, U.S.A., Feb. 2013, pp. 1–6.
- [3] Y. Yan, Y. Qian, H. Sharif, and D. Tipper, "A Survey on Smart Grid Communication Infrastructures: Motivations, Requirements and Challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 1, pp. 5–20, Feb. 2013.
- [4] M. Maier, "Reliable fiber-wireless access networks: Less an end than a means to an end (Invited Paper)," in *Proc., International Conference on Design of Reliable Communication Networks (DRCN)*, Budapest, Hungary, Mar. 2013, pp. 1–12.
- [5] N. Zaker, B. Kantarci, M. Erol-Kantarci, and H. T. Mouftah, "Quality-of-Service-Aware Fiber Wireless Sensor Network Gateway Design for the Smart Grid," in *Proc., IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Budapest, Hungary, Jun. 2013.
- [6] C. M. Machuca, J. Chen, and L. Wosinska, "Cost-Efficient Protection in TDM PONs," *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no. 8, pp. 110–117, Aug. 2012.
- [7] C. M. Machuca, K. Wang, M. Kind, and K. Casier, "Total cost comparison of Next Generation Optical Access Networks with node consolidation," in *Proc., European Conference on Network and Optical Communications (NOC)*, Barcelona, Spain, June 2012, pp. 1–6.
- [8] M. Forzati, C. P. Larsen, and C. Mattsson, "Open access networks, the Swedish experience," in *Proc., International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Munich, Germany, July 2010, pp. 1–4.
- [9] C. M. Machuca, K. Wang, and S. Verbrugge, "Cost-based assessment of NGOA architectures and its impact in the business model," in *Proc., Conference of Telecommunication, Media and Internet Techno-Economics*, Athens, Greece, June 2012, pp. 1–6.
- [10] M. Tahon, J. V. Ooteghem, K. Casier, and L. Deschuttere, "Cost allocation model for a synergetic cooperation in the rollout of telecom and utility networks," in *Proc., Conference of Telecommunication, Media and Internet Techno-Economics*, Berlin, Germany, May 2011, pp. 1–7.
- [11] R. V. D. Berg, "Machine-to-Machine Communications: Connecting Billions of Devices," *OECD Digital Economy Papers*, no. 192, 2012.
- [12] J. P. Davim, S. Ziaie, and A. N. Pinto, "CAPEX model for PON technology using single and cascaded splitter schemes," in *Proc., IEEE International Conference on computer as a tool (EUROCON)*, Lisbon, Portugal, Apr. 2011, pp. 1–4.
- [13] T. Smura, "Techno-economic analysis of IEEE 802.16a-based fixed wireless access networks," Master's Thesis, Networking Laboratory, Helsinki University of Technology, Finland, Apr. 2004.
- [14] V. Krizanovic, D. Zagar, and K. Grgic, "Techno-Economic Analyses of Wireline and Wireless Broadband Access Networks Deployment in Croatian Rural Areas," in *Proc., International Conference on Telecommunications (ConTEL)*, Graz, Austria, June 2011, pp. 265–272.
- [15] J. Chen, L. Wosinska, C. M. Machuca, and M. Jaeger, "Cost vs. Reliability Performance Study of Fiber Access Network Architectures," *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no. 2, pp. 56–65, Feb. 2010.
- [16] J. Nieminen, "Techno-Economics of Mobile WiMAX," Master's thesis, Department of communications and networking (Comnet), Aalto University, Finland, Mar. 2007.
- [17] F. Domingues, A. M. Rocha, and P. S. Andre, "Failure probability of optical fiber under high optical power and small bend diameters," in *Proc., SBMO/IEEE MTT-S International Conference on Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, Nov. 2011, pp. 1–4.
- [18] J. Baliga, R. W. A. Ayre, K. Hinton, and R. S. Tucker, "Energy consumption in wired and wireless access networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 6, pp. 70–77, June 2011.
- [19] A. Soroudi, M. Aien, and M. Ehsan, "A Probabilistic Modeling of Photo Voltaic Modules and Wind Power Generation Impact on Distribution Networks," *IEEE Systems Journal*, vol. 6, no. 2, pp. 254–259, Jun. 2012.
- [20] M. Maier, M. Lévesque, and L. Ivanescu, "NG-PONs 1&2 and Beyond: The Dawn of The Über-FiWi Network," *IEEE Network*, vol. 26, no. 2, pp. 15–21, March/April 2012.