

UNIVERSITE DE LIMOGES

ECOLE DOCTORALE : SCIENCE ET INGENIERIE POUR
L'INFORMATION

Laboratoire XLIM-C2S2 et Laboratoire LTI

Thèse en cotutelle
pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE LIMOGES ET DE
L'UNIVERSITÉ CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR

Discipline1 : Electronique des Hautes Fréquences, Photonique et Systèmes

Discipline2 : Mathématiques-Informatique Option Télécommunications

Année : 2016

N° d'ordre : 90

Présentée et soutenue par

BACHAR Idriss Saleh

le 28 Novembre 2016

APPROCHES D'EVALUATION DE L'ACCES UNIVERSEL ET STRATEGIES D'OPTIMISATION : APPLICATION AU CAS DE L'AFRIQUE CENTRALE

Thèse dirigée par Christelle Aupetit-Berthelemot, Ahmed D. Kora et Roger M.Faye

JURY :

M. Claude LISHOU, Professeur, Ecole Supérieure Polytechnique (ESP), Université Cheikh Anta Diop de
Dakar

Rapporteurs

Mme. Nathalie MALBERT, Professeur, Laboratoire IMS, Université de Bordeaux

M. Eugène Koffi BEDJA, Professeur, Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs (ENSI) de Lomé

M. Benjamin MAMPASSI, Professeur, Faculté des Sciences et Techniques, Université Cheikh Anta Diop de
Dakar

Examineurs

Mme Christelle AUPETIT-BERTHELEMOT, professeur, laboratoire Xlim, Université de Limoges

M. Ahmed Dooguy KORA, Maître de Conférences, Ecole Supérieure Multinationale des Télécommunications
de Dakar

M. Roger Marcelin FAYE, Professeur, Ecole Supérieure Polytechnique (ESP),
Université Cheikh Anta Diop de Dakar

Dédicace

*A ma mère
A mon père
A mon épouse
A toute ma Famille*

Remerciements

Mes remerciements s'adressent d'abord chaleureusement à mes Directeurs de thèse, le Docteur Ahmed Dooguy KORA, les Professeurs Christelle AUPETIT-BERTHELEMOT et Roger Marcelin FAYE pour leur disponibilité permanente et sans faille. Ils ont assuré un suivi efficace de ce travail. Ils m'ont donné des orientations adéquates, prodigué des conseils combien importants, et transmis des suggestions pertinentes tout au long de mes recherches. Ils ont parcouru avec sagesse et délicatesse ce manuscrit. Leurs remarques constructives ont été les piliers de ce document. Pour la bienveillance qu'ils m'ont témoignée, je tiens à les assurer de ma profonde gratitude.

Je remercie également le Ministre Daoussa Deby ITNO pour toutes les facilités accordées sans lesquelles il me serait difficile de débiter ces recherches, je tiens tout particulièrement à apporter le témoignage de ma profonde gratitude. Aussi, je salue la compréhension et le soutien des différents Ministres qui se sont succédés au département des Postes et des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication, ils ont largement facilité la poursuite normale des travaux de cette recherche.

Un grand merci au Professeur Claude LISHOU, Directeur du laboratoire de traitement de l'information (LTI) de l'Ecole Supérieure Polytechnique, pour avoir accepté de présider le jury et de m'avoir accueilli au sein de LTI. Merci au Directeur du laboratoire Xlim pour m'avoir accueilli au sein de son laboratoire.

Mes remerciements vont également à l'endroit de Professeure Nathalie MALBERT de l'Université de Bordeaux 1, Professeur Benjamin MAMPASSI de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar et Professeur Eugène Koffi BEDJA de l'Université de Lomé pour l'intérêt accordé à mes travaux et pour avoir accepté d'en être rapporteur.

Ma reconnaissance est également acquise à tous ceux qui ont aidé, concouru à l'élaboration de cette thèse.

Il me reste à marquer mon sentiment de reconnaissance à mes parents dont les regards affectueux ont été déterminants pour mener à bien cette œuvre. Je pense en particulier à :

- Mon père Saleh BACHAR
- Ma mère Achta HAGGAR
- Mon grand frère Abdoulaye Saleh BACHAR
- Mes frères et ses sœurs

Une mention spéciale est réservée à Khadîdja Zakaria Ali Bouy, ma chère épouse, ma fille Achta Idriss Saleh et mon fils Zakaria Idriss Saleh pour les encouragements et la compréhension dont ils ont fort prouvé à mon endroit.

Encore une fois, que les uns et les autres soient infiniment remerciés.

Droits d'auteurs



Cette création est mise à disposition selon le Contrat : « **Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de modification 3.0 France** » disponible en ligne :

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/><http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Table des matières

| | |
|--|----|
| Introduction Générale..... | 10 |
| CHAPITRE I : Eléments sur l'Accès Universel en Afrique centrale..... | 14 |
| Introduction..... | 14 |
| I.1 Infrastructures et services en Afrique centrale | 14 |
| I.1.1 Composition et organisations de l'Afrique centrale..... | 14 |
| I.1.2 Données démographiques et économiques liées aux TICs..... | 16 |
| I.2 Cartographie existante des infrastructures large bande de l'Afrique centrale.... | 19 |
| I.2.1 Infrastructures large bande en Afrique centrale..... | 19 |
| I.2.2 Analyse des indicateurs TICs | 20 |
| I.3 Identification des Problématiques liées au développement de l'Accès Universel en Afrique centrale | 26 |
| I.3.1 Les Problématiques technico-géographiques | 26 |
| I.3.1.1 Energétique | 26 |
| I.3.1.2 Infrastructures de transmission | 27 |
| I.3.1.3 Problématique de la maintenance | 28 |
| I.3.1.4 Problématique géographique | 28 |
| I.3.2 Socio-Général | 29 |
| I.3.3 Economique | 29 |
| I.3.3.1 Coût des investissements versus coût récurrents..... | 30 |
| I.3.3.2 Evaluation de la bande passante nécessaire..... | 30 |
| Conclusion | 35 |
| CHAPITRE 2 : Généralités sur les technologies large bande | 37 |
| Introduction..... | 37 |
| II.1 Technologies optiques..... | 37 |
| II.1.1 Structure générale d'une liaison optique | 37 |
| II.1.2 Le module d'émission | 38 |
| II.1.3 Les Sources Optiques | 38 |
| II.1.4 Le module de transmission..... | 40 |
| II.1.5 Le phénomène d'atténuation | 40 |
| II.1.6 Les défauts géométriques lors de la fabrication de la fibre | 42 |
| II.1.7 Le module de réception..... | 45 |
| II.2 Techniques de modulation | 47 |
| II.2.1 Modulation directe | 48 |

| | |
|--|-----|
| II.2.2 Modulation Externe..... | 48 |
| II.3 Etude d'un réseau métropolitain | 50 |
| II.3.1 Projet fibre optique au Tchad | 50 |
| II.3.2 Description du projet..... | 51 |
| II.4 Technologies Radio terrestres et spatiales | 54 |
| II.4.1 Présentation des différentes technologies sans fil | 54 |
| II.4.2 Etude comparative des technologies radio | 58 |
| Conclusion | 60 |
| CHAPITRE 3 : Modélisation de l'Indice d'Accès Universel | 62 |
| Introduction..... | 62 |
| III.1 Contexte..... | 63 |
| III.2 Démarche théorique de modélisation | 64 |
| III.2.1 L'évaluation de Service Universel l'Accès et du Service Universel | 67 |
| III.2.2 Modèle de solution et fonction corrective | 69 |
| III.3 Mise en œuvre..... | 73 |
| III.3.1 Résultats de simulations..... | 76 |
| III.3.2 Elaboration des solutions possibles | 77 |
| Conclusion | 80 |
| CHAPITRE 4 : Modélisation de l'architecture réseau basée sur les technologies radio | 83 |
| Introduction..... | 83 |
| IV.1 Approche de modélisation d'accès radio pour le Service Universel | 83 |
| IV.1.1 Modèle du réseau d'accès..... | 84 |
| IV.1.2 Modèle du réseau de transmission | 88 |
| IV.1.3 Equation de rentabilité..... | 91 |
| IV.1.4 Mise en œuvre de l'approche de modélisation d'accès radio | 92 |
| IV.2 Impact de la technologie d'accès radio sur l'UAI d'une localité | 97 |
| IV.2.1 Proposition d'un modèle d'évaluation de l'impact de la technologie sur l'UAI | 98 |
| IV.2.2 Détermination de la fonction corrective | 100 |
| IV.3 Mise en œuvre de l'évaluation de l'impact de la technologie d'accès Radio sur l'UAI d'une localité | 101 |
| Conclusion | 104 |
| CHAPITRE 5: Architectures radio NGN-Cloud et Modèle Optimal d'Architecture réseau basée sur les technologies hybrides..... | 107 |
| Introduction..... | 107 |
| V.1 Architectures radio NGN-Cloud appropriées à l'accès et au Service Universel | 109 |

| | |
|---|-----|
| V.1.1 Convergence des technologies vers NGN favorisant l'Accès Universel (L'architecture NGN UA)..... | 109 |
| V.1.2 Architecture Cloud UA | 111 |
| V.1.3 Global Architecture for Universal Access (GAUA) | 112 |
| V.2 Modèle Optimal d'Architecture Réseau basée sur les Technologies Hybrides | 113 |
| V.2.1 Démarche Méthodologique..... | 113 |
| V.2.1.1 Rappel du contexte..... | 113 |
| V.2.1.2 Méthodologie | 115 |
| V.2.2 Structure de la liaison (architecture de simulation) | 115 |
| V.2.2.1 Liaison optique..... | 115 |
| V.2.2.1 Canal Wireless | 120 |
| V.3 Etude de cas | 121 |
| V.3.1 Elaboration des différentes paramètres du canal Wireless par type de technologie pour le modèle de VPI..... | 121 |
| V.3.2 Résultats de simulation | 122 |
| Conclusion | 124 |
| Conclusion générale et perspectives | 126 |
| Bibliographie | 130 |
| Production Scientifique de l'auteur..... | 134 |
| Annexes..... | 135 |
| Table des illustrations : | 136 |
| Liste des Tableaux :..... | 138 |
| Table des Acronymes :..... | 139 |

Introduction Générale

De nos jours, l'essor continu des Technologies de l'Information et de la Communication (TICs) a permis d'en faire un des leviers de la politique d'émergence de la plupart des Etats africains et aussi de conceptualiser le principe de l'économie numérique. Comme en témoigne la progression des indicateurs clés qui montrent un taux de pénétration satisfaisant par rapport aux services internet, au nombre d'utilisateurs d'internet, aux abonnés à la téléphonie mobile, etc., l'Afrique, à l'instar des autres continents, commence à atteindre une masse critique en termes d'accès et d'utilisation des TICs. Cet état de fait accélère la diffusion/le développement de ces technologies mais aussi stimule davantage le niveau d'exigences de qualité des infrastructures et des services rendus aux usagers.

En effet, dans le diagnostic du Sommet Mondial de la Société de l'Information (SMSI) plusieurs objectifs avaient été fixés pour l'échéance 2015 parmi lesquels la résorption de la fracture numérique à travers le slogan « *Connecter l'Afrique* ». Selon l'Union Internationale des Télécommunications (UIT), ce premier objectif d'interconnecter les différentes capitales, grandes villes a presque été atteint. Par contre, pour ce qui est des autres objectifs, même si beaucoup d'avancées ont été notées, il reste encore des disparités notamment dans la connexion des villages africains.

Ramené au cas de l'Afrique centrale, on note encore beaucoup de disparités de connectivité entre les différents Etats de cette sous-région africaine, mais aussi au sein des Etats si l'on compare les zones urbaines et rurales. Ceci impacte négativement sur le principe, mondialement admis, de l'accès et du service universel.

Au-delà de la connectivité, le dispositif central de suivi de la réduction de la fracture numérique se trouve dans la production de statistiques fiables, par des indicateurs TICs, qui donnent l'état des lieux des infrastructures et l'impact sur la vie socioéconomique de la sous-région Afrique centrale.

Selon l'appartenance géographique et/ou la catégorie socio-économique, l'accès aux moyens de communication se fait de manière non égalitaire et disparate entre les peuples. Cette fracture technologique s'explique par le fait que ni les besoins en services, ni les pouvoirs d'achats ne sont les mêmes, justifiant ainsi la politique d'investissement des opérateurs orientée vers les zones denses, dites rentables, et favorisant de fait les zones urbaines au détriment de celles rurales. Afin de combler le gap technologique, les autorités politique et réglementaire ont instauré la notion du Service et de l'Accès Universel en dédiant ainsi un fonds dénommé Fonds

du Service Universel (FSU) pour une plus grande inclusion et une réduction des disparités d'accès. L'objectif recherché est la mise en place d'actions et d'investissements propres à chaque zone en prenant en compte les contraintes sociogéographiques inhérentes à chaque pays.

Revenant sur l'atteinte de l'objectif 3 du sommet *Connecter l'Afrique*, cela suppose la mise en place de toute une gamme de technologies TICs, y compris la large bande.

L'Afrique centrale, à l'instar des autres sous-régions, doit être convaincue que son développement est lié à l'atteinte de deux objectifs que sont le développement de ses infrastructures de télécommunications (transmission) et la mise à disposition des populations de services diversifiés et adaptés aux contextes spécifiques (économiques, démographiques, sociales) des pays de la sous-région. Certes, il est aujourd'hui indéniable que l'objectif de vulgarisation des TICs en Afrique centrale ne sera pas atteint sans une "autoroute de transmission" moderne, fiable, sécurisée et accessible à toutes les couches sociales et particulièrement aux communautés rurales.

La poursuite de tels objectifs est rendue ardue par des contraintes géographique et macro-économique, de ce fait, la mise en place d'infrastructures large bande en Afrique centrale révèle de nouveaux défis. Pour relever ces derniers, force est de constater qu'il faut analyser et proposer des solutions adaptées et contextualisées. Dans cette perspective, les objectifs assignés à cette thèse sont :

- faire une prospection exhaustive des réseaux à infrastructure large bande existants en Afrique centrale ;
- aller vers un renouveau méthodologique d'évaluation des indicateurs d'accès à la Société de l'Information permettant d'aborder de façon plus efficace et contextualisée le principe de l'accès et du service universel ;
- aller vers la conception de solutions technologiques appropriées prenant en compte les limites de déploiement et intégrant l'étendue des territoires.

Cette thèse aborde de façon systémique l'analyse de la situation des TICs en Afrique centrale, elle identifie les problématiques liées à l'accès universel et étudie les politiques d'harmonisation des TICs. Cette analyse conduit alors à proposer une cartographie cible intégrée permettant de réduire la fracture numérique.

Non seulement les différentes technologies optiques et radio large bande sont mises à contribution mais décrites en vue de relater les notions de base permettant d'appréhender les avantages et inconvénients de chaque technologie. Ceci a permis, par la suite, de proposer une démarche méthodologique de modélisation de l'indicateur d'accès au service universel couplée à une stratégie d'optimisation révélant, d'une part le gap technologique à combler et d'autre part, prédisant le niveau d'accès technologique à atteindre en fonction des politiques d'investissement du Fonds de Service Universel.

Aussi, outre la proposition de cette démarche de modélisation cette thèse apporte une autre contribution en développant un modèle d'architecture réseau basé sur les technologies radio et en proposant une méthodologie consistant à intégrer les différents paramètres impliqués dans le choix des technologies à déployer en vue de l'accès au service universel. De plus, elle se projette dans l'évolution future de la technologie en offrant une ouverture sur les technologies hybrides.

Ainsi, le corps principal de la thèse est divisé en cinq chapitres.

Le premier chapitre présente des éléments sur l'accès universel en Afrique centrale et fournit donc la situation de référence des technologies de l'information et de la communication dans cette sous-région africaine.

Le deuxième chapitre développe des généralités et une analyse des technologies d'accès et de transmissions large bande en mettant l'accent sur les services consommant de la bande passante. Le chapitre III s'intéresse à la modélisation de l'indice d'accès universel et présente la stratégie d'optimisation de cet indicateur à partir des différentes technologies radios existantes et celles qui peuvent être implémentées efficacement dans un réseau de télécommunications pour faciliter l'accès aux services universels. La faisabilité de l'approche est démontrée sur un cas d'étude pris dans le contexte tchadien.

Le chapitre IV développe une modélisation de l'architecture réseau basée sur les technologies radio et s'attache à montrer que la rentabilité, du point de vue des opérateurs, peut aller de pair avec la satisfaction, en termes de qualité et prix, pour les consommateurs. Ici aussi, l'applicabilité de l'approche est démontrée sur un cas d'étude pris dans le contexte tchadien.

Le cinquième chapitre considère lui, les architectures de type NGN et cloud. Il a également pour objectif de présenter les investigations qui ont été faites pour simuler une liaison réseau optique fibrée – wireless à l'aide d'un logiciel commercialement disponible. Le but de cette partie était de pouvoir proposer des simulations basées sur les infrastructures fibrées existantes

au Tchad et proposer la meilleure architecture pour permettre de répondre aux besoins en termes de service pour l'Afrique centrale.

Enfin, la conclusion générale à ce travail de thèse tire les principaux enseignements, fait la synthèse des différents travaux, récapitule les contributions puis indique quelques nouvelles perspectives de recherche dans ce domaine.

CHAPITRE I : Eléments sur l'Accès Universel en Afrique centrale

Introduction

Ce chapitre concerne l'analyse de la situation des réseaux large bande et des services de TICs. Il identifie les problématiques liées à l'Accès Universel, étudie les différentes politiques d'harmonisation des TICs et établit une cartographie cible permettant de réduire la fracture numérique. Le chapitre est scindé en trois parties :

- **La première** présente le contexte démographique et économique de l'Afrique centrale puis fait un état des lieux des services et des réseaux larges bandes ;
- **La seconde** étudie les politiques harmonisées pour le marché des TICs (UIT/UAT/CE/CEMAC) [1] et établit une cartographie des infrastructures larges bandes en se basant sur les indicateurs types de télécommunications définis par l'UIT afin d'en obtenir un observatoire des TICs de l'Afrique centrale ;
- **La troisième partie** analyse la cartographie précédemment établie et identifie les problématiques techniques, sociétales, économiques et géographiques liées au développement de l'Accès Universel ;
- **La quatrième partie** se penche sur la projection des besoins en bande passante en vue de ressortir la cartographie cible de développement de l'Accès et Service universel.

I.1 Infrastructures et services en Afrique centrale

I.1.1 Composition et organisations de l'Afrique centrale

I.1.1.1 Etats de l'Afrique centrale

Selon l'ONU, l'Afrique centrale est composée de neuf pays : Angola, Cameroun, République Centrafricaine, Congo, République Démocratique du Congo (RDC), Gabon, Guinée Equatoriale, Sao Tomé et Principe, Tchad.

I.1.1.2 La Communauté Economique des Etats de l'Afrique centrale

On a plutôt tendance à considérer la Communauté Economique des États de l'Afrique centrale (CEEAC) créée pour le développement économique, social et culturel de l'Afrique en vue de la création des structures régionales pouvant progressivement aboutir à un Marché commun. Cette communauté est composée de dix pays, principalement neuf pays mentionnés dans la définition de l'ONU cités ci-dessus, auxquels il faut ajouter le Burundi (Figure I- 1). Elle a été créée le 18 Octobre 1983, son siège est à Libreville au Gabon [1].

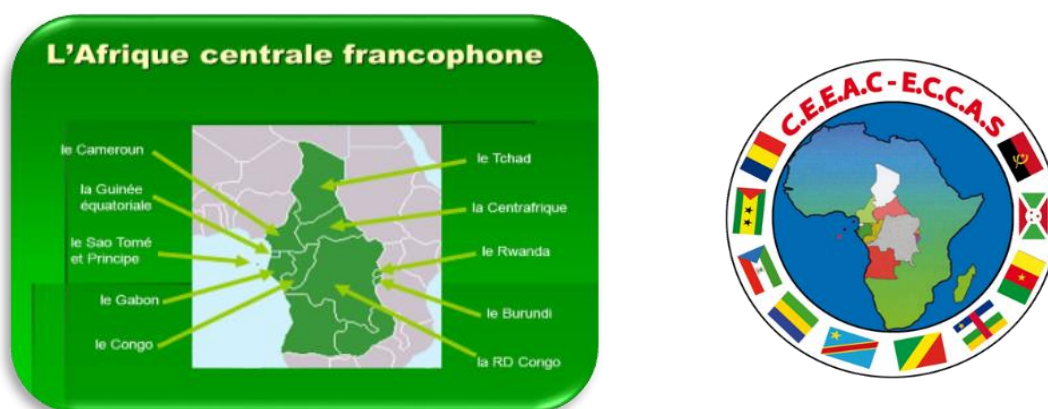


Figure I- 1: Pays de la CEEAC

Les objectifs primordiaux visés par la CEEAC concernent la promotion et le renforcement d'une coopération harmonieuse orientée vers un développement dynamique, équilibré et auto-entretenu dans tous les domaines de l'activité économique et sociale en vue de réaliser l'autonomie collective, d'élever le niveau de vie des populations. De plus, elle s'occupe également du processus d'intégration régionale de l'Afrique centrale.

I.1.1.3 La Communauté économique et monétaire de l'Afrique centrale

Le traité de la Communauté économique et monétaire de l'Afrique centrale (CEMAC) a été signé à N'Djamena (Tchad) le 16 mars 1994. Il est entré en vigueur en juin 1999 et a été amendé par les actes additifs du 5 juillet 1996 et du 25 avril 2007. La CEMAC a son siège à Bangui et est constituée de six membres que sont le Cameroun, la Centre Afrique, le Congo, le Gabon, la Guinée Equatoriale et le Tchad. Elle regroupe les organes et institutions suivantes :



- la Banque de Développement des Etats de l'Afrique centrale (BDEAC);
- la Commission Bancaire de l'Afrique centrale (COBAC) ;

- l'Union Economique de l'Afrique centrale (UEAC) ;
- l'Union Monétaire de l'Afrique centrale (UMAC) ;
- la Banque des Etats de l'Afrique centrale (BEAC).

Les activités de la CEMAC s'articulent aujourd'hui autour du Programme Economique Régional (PER) [1].

Compte tenu de l'existence des différentes structures précitées et pour plus de clarté, nous considérons la liste ONU corrélée aux listes de la CEEAC et du CEMAC pour définir les pays d'Afrique centrale. Il est bien entendu que ces Communautés sont membres de l'Union Africaine (UA) et de l'Union Africaine des Télécommunications (UAT).

I.1.2 Données démographiques et économiques liées aux TICs

La RD Congo est le pays le plus vaste d'Afrique centrale avec une superficie de 2 345 409 km², suivi du Tchad avec 1 284 000 km² et de l'Angola avec 1 247 000 km². Sao Tomé et Principe est le plus petit pays avec moins de 1 000 km² de superficie. En termes de population, la RD Congo seule regroupe presque la population de tous les autres pays d'Afrique centrale. L'espérance de vie à la naissance dépasse 60 ans au Gabon et à Sao Tomé, elle est inférieure à 55 ans dans chacun des autres pays tandis que le taux de croissance du produit intérieur brute(PIB) par habitant varie entre 155 dollar US pour le Burundi à 10 990 dollar US pour la Guinée Equatoriale. Il est aussi à noter que 7 pays sur 10 ont accès à la mer (accès direct aux points d'atterrissage des câbles sous-marins). Le Tableau I- 1 donne les détails démographiques de la sous-région.

Tableau I- 1 : Données Démographiques de l'Afrique centrale

| Pays | Superficie | Population (2012) | Taux de croissance de la population 2012/13 | Espérance de vie (ans) | Taux de croissance du PIB/Hab (2012/2013) |
|----------------------|------------|-------------------|---|------------------------|---|
| Angola | 1 247 000 | 20 753 425 | 29,80% | 51,1 | 4% |
| Burundi | 27 800 | 9 663 333 | 30,90% | 54 | 6% |
| Cameroun | 475 500 | 21 689 559 | 22,70% | 55 | 7% |
| Centrafrique | 623 000 | 4 115 000 | 16,50% | 49 | -8% |
| Congo | 342 000 | 4 391 765 | 25,70% | 58 | 2% |
| Gabon | 267 670 | 1 634 615 | 21,20% | 63 | 7% |
| Guinée Eq. | 28 050 | 736 040 | 25,40% | 53 | -6% |
| RD Congo | 2 344 885 | 66 148 889 | 25,00% | 50 | 4% |
| Sao Tomé et Principe | 960 | 188 173 | | 66 | |
| Tchad | 1 284 000 | 12 529 200 | 30,70% | 52,4 | 3% |

Le Tableau I- 2 illustre la cartographie économique de la sous-région, il donne les détails par pays du PIB global, du PIB par habitant et du PIB par habitant en parité du pouvoir d'achat (PPA).

Tableau I- 2 : Données économique de l'Afrique centrale [2]

| Pays | PIB 2013 (Milliards de \$) | PIB/hbt 2013 (\$) | PIB/hbt 2013 PPA (\$) |
|---------------------|----------------------------|-------------------|-----------------------|
| Angola | 121,7 | 2668,46 | 5262,03 |
| Burundi | 2,72 | 155,06 | 482,88 |
| Cameroun | 29,27 | 991,65 | 2018,46 |
| Centrafrique | 1,54 | 282,57 | 738,65 |
| Congo | 14,11 | 1960,58 | 3814,68 |
| Gabon | 19,34 | 6937,71 | 13863,56 |
| Guinée Equatoriale | 15,57 | 10990,44 | 26056,8 |
| RD Congo | 30,63 | 288,24 | 363,87 |
| Sao Tomé & Principe | 0,31 | 987,64 | 1596,37 |
| Tchad | 13,41 | 741,63 | 1286,66 |

Le Tableau I- 3, de même que la Figure I- 2, montre que les communications en Afrique centrale sont dominées par la voix (GSM), ainsi l'ARPU (l'Average Revenu Per User ou revenu moyen par client/utilisateur) téléphonie représente 95% de l'ARPU Global.

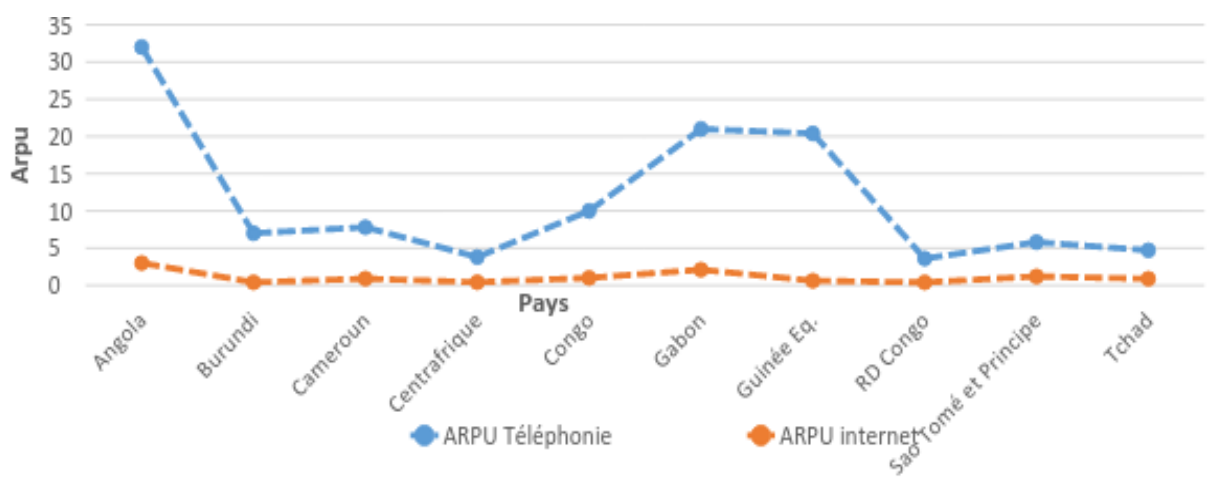


Figure I- 2 : Comparaison ARPU voix et Data

La domination des communications voix en Afrique centrale est due à la cherté des connexions internet, au faible taux de croissance des infrastructures de télécommunications et au faible taux d'alphabétisation.

Après comparaison des deux critères (ARPU et SMIC) conformément au Tableau I- 3 et à la lecture de la Figure I- 3, nous remarquons que dans la plupart des pays, la variation du rapport

entre SMIC (Salaire Minimum Interprofessionnel de Croissance) et l'ARPU global est considérable.

Tableau I- 3: ARPU et SMIC d'Afrique centrale

| Pays | SMIC | ARPU Global (\$) | ARPU Voix (\$) | ARPU internet (\$) |
|---------------------|------|------------------|----------------|--------------------|
| Angola | 90 | 35 | 32 | 3 |
| Burundi | 31 | 7,4 | 7 | 0,4 |
| Cameroun | 42 | 8,7 | 7,8 | 0,9 |
| Centrafrique | 52 | 4,22 | 3,8 | 0,42 |
| Congo | 140 | 11 | 10 | 1 |
| Gabon | 300 | 23,1 | 21 | 2,1 |
| Guinée Eq. | 256 | 21,02 | 20,4 | 0,62 |
| RD Congo | 90 | 4 | 3,6 | 0,4 |
| Sao Tomé & Principe | 110 | 8 | 5,8 | 1,2 |
| Tchad | 120 | 5,59 | 4,708 | 0,882 |

Nous constatons également que la population de l'Afrique centrale consent entre 5 à 30% de leur SMIC aux communications électroniques. Ceci s'explique par la cherté des moyens de communication et/ou par la faiblesse du SMIC en Afrique centrale (Tableau I- 3).

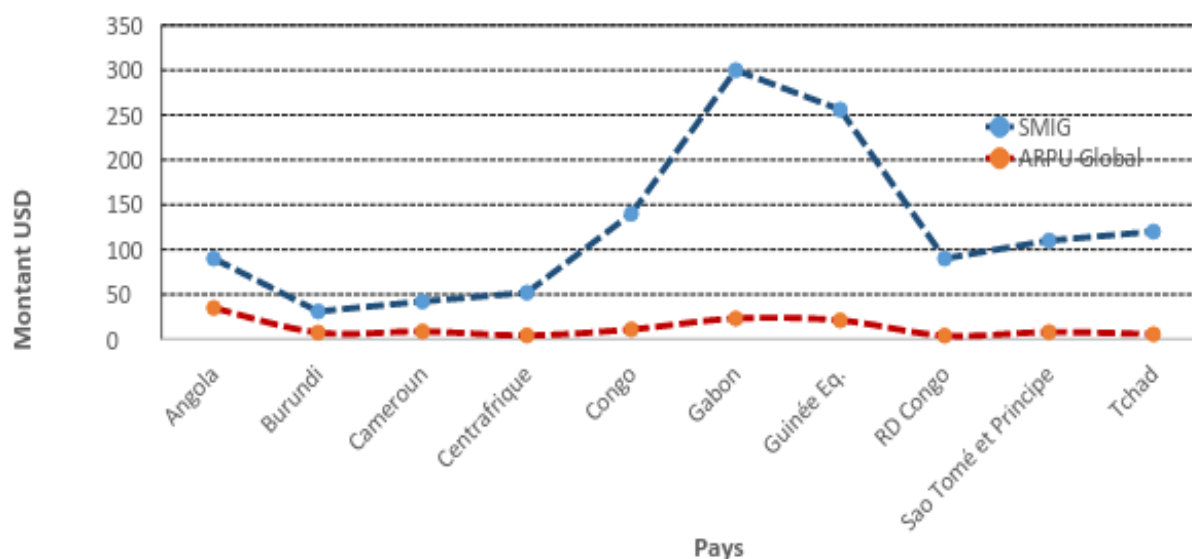


Figure I- 3: Comparaison SMIC et ARPU

I.2 Cartographie existante des infrastructures large bande de l'Afrique centrale

I.2.1 Infrastructures large bande en Afrique centrale

Les pays de l'Afrique centrale placent le déploiement des réseaux de transmission à fibre optique comme pilier de développement permettant la vulgarisation des services large bande. Après une première analyse des stratégies de développements des TICs des pays, il ressort que :

- La large bande constitue un moteur de croissance exceptionnelle ;
- Les pays concernés ont commencé la mise en œuvre des réseaux de transmission à fibre optique ;
- La majorité des pays a défini la large bande comme étant partie intégrante de l'Accès et Service universel.

Aussi, il est donné ci-après une synthèse (Tableau I- 4) des statistiques fournies dans le rapport publié en septembre 2013 par la Commission UIT/UNESCO sur la large bande [3]. De cette synthèse on note que la plupart des pays de l'Afrique centrale a défini un plan national de large bande. Toutefois, après analyse du Tableau I- 4, le taux de pénétration large bande mobile et fixe reste à améliorer. Le taux de foyer utilisant l'internet individuel ou collectif est en dessous de la moyenne mondiale qui est de 24% pour l'internet foyer et 35,7% pour l'individuel.

Tableau I- 4: Synthèse de la large bande d'Afrique centrale

| PAYS | Plan National Large Bande /Année | Pénétration Large Bande Fixe pour 100hbts (A) | Pénétration Large Bande Mobile pour 100hbts (B) | Pourcentage de Foyer utilisant Internet (C) | Pourcentage d'Individu utilisant Internet (D) |
|------------|----------------------------------|---|---|---|---|
| ANGOLA | 2010 | 0,2 | 1,5 | 7,2 | 16,9 |
| CAMEROUN | NON | 0 | N/C | 3,5 | 5,7 |
| RCA | 2006 | 0 | 0 | 2,4 | 3 |
| CONGO | | 0 | 2,1 | 1,3 | 6,1 |
| RDC | 2009 | 0 | N/C | 1,3 | 1,7 |
| GABON | 2011 | 0,3 | 0 | 7,9 | 8,6 |
| GUINEE EQU | 2010 | 0,2 | 0 | N/C | 13,9 |
| SAO TOME | NON | 0,5 | N/C | N/C | 21,6 |
| TCHAD | 2007 | 0,2 | 0 | 2,3 | 2,1 |

LB = Large Bande ; N/C : non connu ; (A) : Moyenne mondiale : 9,1 ; (B) : Moyenne mondiale : 22,1 ; (C) : Moyenne mondiale : 24 ; (D) : Moyenne mondiale : 35,7.

Une analyse globale montre que 2/3 des pays du monde ont adopté une définition du Service et de Accès Universel (Union Access Service : UAS) ; dans cette définition 49 pays ont inclus l'Internet et 99 ont inclus une définition du large bande [4].

En ce qui concerne l'Afrique en générale, 59 % des pays ont un Plan National Large Bande et/ou une définition de l'UAS : 35 % ont uniquement un Plan National, 15 % un Plan et une définition de l'Union Access Service et 9 % un Plan et une définition de l'UAS incluant la large bande [6] (Base de données UIT, réglementation télécoms/TIC).

I.2.2 Analyse des indicateurs TICs

Dans cette thèse, nous nous intéressons aux indicateurs TICs suivants : le nombre d'utilisateurs (Fixe, Mobile et Internet), la télé-densité, l'ARPU, le taux de pénétration, le taux de croissance (nombres d'utilisateurs et trafic), le tarif des services et le SMIC.

L'analyse de ces indicateurs, selon les services voix fixe, voix mobile et Internet (ou bien les services liés au fixe, au mobile et à l'Internet), nous permettra de dresser les besoins réels en termes d'infrastructures, d'identifier les types de services nécessaires pour les populations concernées, puis d'établir la cartographie cible de développement de l'Accès Universel pour l'Afrique centrale.

I.2.2.1 Indicateurs de services liés au Fixe

Le nombre d'abonnés seul ne suffit pas pour faire une analyse objective de l'évolution temporelle de ce service, raison pour laquelle nous jugeons pertinent de prendre en compte l'étendue des pays, leur stabilité économique ainsi que le nombre total de leur population. De ce fait en rapportant le nombre d'abonnés du fixe à la population totale du pays, on obtient la télé-densité, qui est inférieure à 4% en 2014.

D'une manière globale, le nombre d'utilisateurs de la téléphonie fixe de la sous-région ne connaît qu'une croissance de 150% en six ans et ne représente que 0,811% de la population de l'Afrique centrale. Aussi, dans la plupart des pays de l'Afrique centrale le fixe connaît une décadence d'année en année, seul le Cameroun englobe plus de 70% des d'abonnés fixes de la sous-région alors que ceux de la Centrafrique ne représentent que moins de 1% (Tableau I- 5).

Tableau I- 5: Evolution du nombre d'abonnés du fixe classique d'Afrique centrale (2008-2014)

| Nombre d'abonnés du Fixe classique | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 |
|------------------------------------|----------------|----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Angola | 114 296 | 303 179 | 281 122 | 259 065 | 208 345 | 214 950 | 28 1327 |
| Burundi | 30 411 | 31 121 | 34 972 | 30 010 | 17 394 | 21 253 | 21 669 |
| Cameroun | 255 306 | 435 413 | 539 504 | 668 965 | 737 445 | 799 016 | 105 1356 |
| Centrafrique | 4 366 | 3 561 | 929 | 815 | 823 | 800 | 800 |
| Congo | 9 050 | 11 600 | 13 400 | 14 200 | 14 932 | 15 679 | 16 300 |
| Gabon | 33 165 | 36 460 | 30 381 | 22 499 | 22 611 | 19 252 | 18 498 |
| Guinée Equatoriale | 10 000 | 10 000 | 13 537 | 14 520 | 14 868 | 14 873 | 15 110 |
| RD Congo | 3 320 | 42 320 | 41 990 | 56 970 | 59 534 | 63282 | - |
| Sao Tomé & Principe | 7 643 | 7 694 | 7 804 | 7 960 | 8 035 | 6 976 | 6 800 |
| Tchad | 45 000 | 58 267 | 51 227 | 31 839 | 27 937 | 31 323 | 23 580 |
| Total | 509 237 | 939 615 | 1 014 866 | 1 106 843 | 1 111 924 | 1 187 404 | 1 437 454 |

La figure I-4 montre qu'environ 4 personnes sur 100 utilisent le fixe au Cameroun et au Sao Tomé tandis qu'au Burundi, en Centrafrique, au Congo, en RDC et au Tchad, moins d'une personne sur 100 utilise le téléphone fixe. Notons par ailleurs que, la télé-densité reste faible dans chacun des pays de l'Afrique centrale : elle est inférieure à 4% en 2014. Entre 2008 et 2013, le nombre d'utilisateurs de téléphonie fixe a baissé de 81,7% en Centrafrique, 42% au Gabon, 30% au Tchad et au Burundi.

Malgré la faible évolution de la téléphonie fixe, nous constatons que pendant la période 2013-2014 la télé-densité a évolué positivement dans la plupart des pays comme le montre la Figure I- 4.

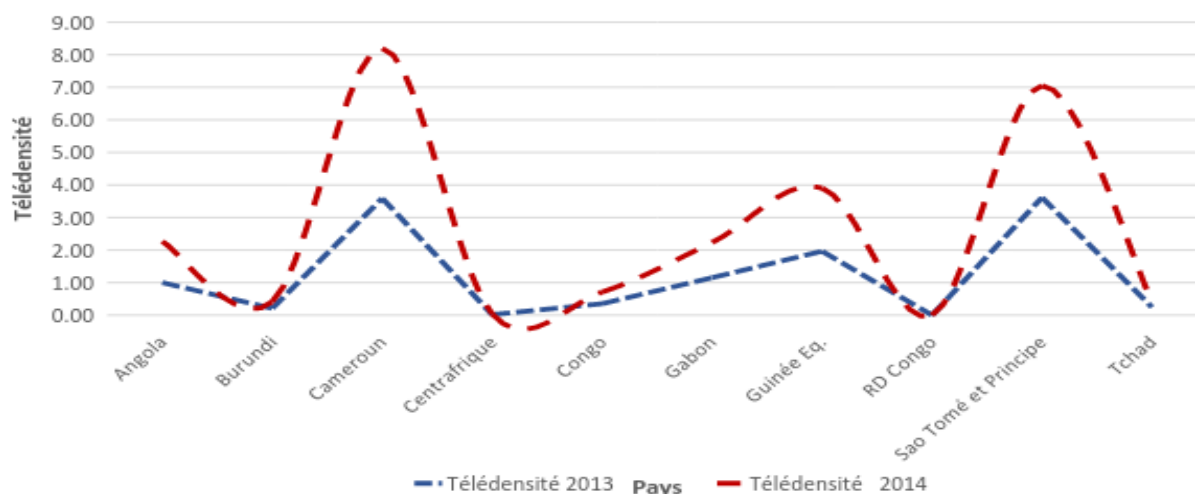


Figure I- 4: Evolution de la télé-densité fixe

I.2.2.2 Indicateurs de services liés au mobile

Les indicateurs examinés dans cette partie sont ceux liés au service de la téléphonie mobile, principalement le nombre d'abonnés, le taux de croissance, le taux de pénétration ainsi que les tarifs afférents à ces services. Les données analysées sont celles concernant la période 2008-2014 de l'ensemble des pays de l'Afrique centrale. Le Tableau I- 6 reflète l'évolution du nombre d'abonnés mobile par pays.

Tableau I- 6: Évolution du nombre d'abonnés de la téléphonie mobile en Afrique centrale (2008-2014)

| Nombre d'abonnés | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 |
|--------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Angola | 6 773 356 | 8 109 421 | 9 403 365 | 10 697 310 | 12 785 109 | 13 285 198 | 14 052 558 |
| Burundi | 480 584 | 920 749 | 1 678 029 | 1 914 586 | 2 247 126 | 2 536 831 | 3 193 257 |
| Cameroun | 6 160 893 | 8 004 120 | 8 636 652 | 10 486 614 | 13 108 058 | 15 664 666 | 17 270 312 |
| Centrafrique | 570 000 | 863 641 | 979 232 | 992 444 | 1 143 114 | 1 360 300 | 1 155 620 |
| Congo | 1 807 000 | 2 948 304 | 3 718 748 | 3 884 757 | 4 283 134 | 4 659 762 | 4 930 100 |
| Gabon | 1 300 000 | 1 450 000 | 1 610 000 | 2 370 227 | 2 930 000 | 3 590 000 | 2 932 731 |
| Guinée Equatoriale | 180 000 | 200 000 | 399 290 | 478 860 | 501 077 | 510 783 | 516 540 |
| RD Congo | 9 937 622 | 9 458 557 | 11 820 348 | 15 644 877 | 20 092 678 | 29 506 617 | 37 102 958 |
| Sao Tomé & Príncipe | 50 551 | 80 829 | 102 730 | 115 038 | 122 172 | 125 329 | 128 500 |
| Tchad | 1 600 000 | 2 281 320 | 2 875 304 | 3 665 661 | 4 402 282 | 4 561 243 | 5 251 560 |
| Total | 28 860 006 | 34 316 941 | 41 223 698 | 50 250 374 | 61 614 750 | 75 800 729 | 86 534 136 |

Pour la période d'observation 2008 à 2014, la Figure I- 5 met en évidence la croissance des abonnés mobiles dans la totalité des pays d'Afrique centrale. Durant cette période, le parc d'abonnés a été multiplié presque par trois dans la plupart des pays, cependant, cette croissance doit être relativisée du fait de la double souscription possible.

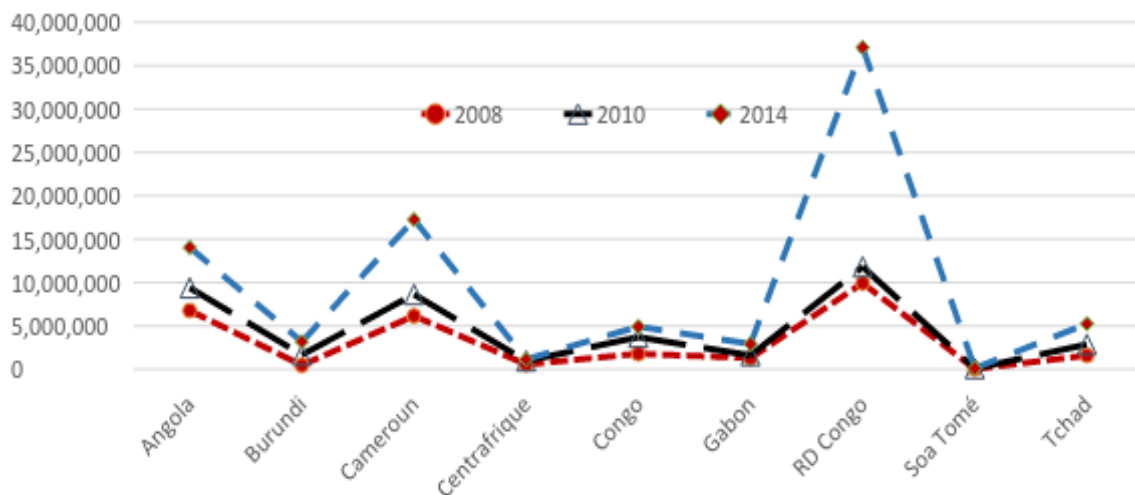


Figure I- 5 : Evolution du nombre d'abonnés téléphonie mobile

Le graphique Figure I- 6 montre que le taux de pénétration mobile varie de 25% en Centrafrique à 171,4% au Gabon. Sur la période d'observation de cinq ans, le nombre d'abonnés mobiles connaît une croissance de 200%, ainsi 51,77% de la population de l'Afrique centrale est abonnée au réseau de téléphonie mobile (**sans écarter l'effet multi-Sim**).

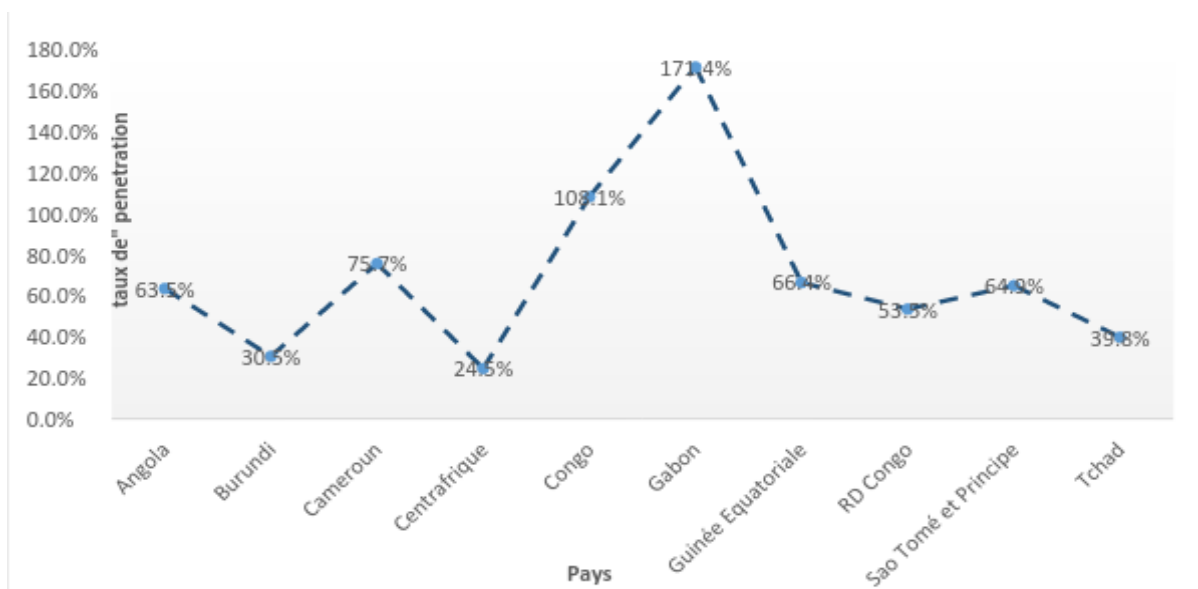


Figure I- 6: Taux de pénétration de la téléphonie mobile en Afrique centrale (2014).

I.2.2.3 Indicateurs de Service Internet (Data)

En Afrique centrale, seulement 11 223 834 personnes sur une population de 146 392 999 utilisent Internet soit un taux de pénétration de 7,66%. Ce faible taux de pénétration des services

liés à Internet s'explique d'une part par le manque d'infrastructures de transport adéquates, le caractère prohibitif des tarifs et le faible taux d'alphabétisation et d'autre part par la non-maîtrise des politiques visant la vulgarisation des TICs. Le Tableau I- 7 donne les détails de l'évolution du nombre d'utilisateurs d'Internet de 2008-2014.

Tableau I- 7: Evolution du nombre d'utilisateurs Internet en Afrique centrale (2008-2014)

| | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | Population |
|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-------------|
| Angola | 842 464 | 1 135 599 | 1 954 912 | 2 981 869 | 3 526 416 | 4 101 079 | 4 564 866 | 21 471 618 |
| Burundi | 69 857 | 80 340 | 92 328 | 105 898 | 120 165 | 132 113 | 140 243 | 10 162 532 |
| Cameroun | 666 231 | 771 991 | 886 847 | 1 057 814 | 1 236 659 | 1 424 253 | 2 447 935 | 22 253 959 |
| Centrafrique | 43 340 | 76 792 | 86 998 | 97 597 | 135 756 | 161 575 | 186 042 | 4 616 417 |
| Congo | 166 204 | 179 782 | 205 586 | 236 620 | 264 850 | 293 544 | 316 227 | 4 447 632 |
| Gabon | 92 085 | 101 783 | 112 515 | 127 523 | 140 674 | 153 797 | 163 995 | 1 671 711 |
| Guinée Equatoriale | 11 976 | 14 417 | 41770 | 82 340 | 102 663 | 124 150 | 142 773 | 757 014 |
| RD Congo | 258 804 | 338 723 | 447 776 | 767178 | 1 103 820 | 1 500 389 | 2 045 985 | 68 199 504 |
| Sao Tomé &Principe | 26046 | 28 429 | 33 418 | 36 931 | 40 577 | 44 388 | 47 110 | 192 993 |
| Tchad | 131 264 | 165 598 | 228 305 | 542 954 | 707 870 | 694 079 | 1 168 659 | 12 619 619 |
| Total | 2 308 270 | 2 893 455 | 4 090 454 | 6 036 723 | 7 379 451 | 8 629 368 | 11 223 834 | 146 392 999 |

La Figure I- 7 montre l'évolution du nombre d'abonnés d'Internet de 2008 à 2014 des pays de l'Afrique centrale.

La corrélation entre la vulgarisation de l'internet et l'accessibilité des tarifs est démontrée par la Figure I- 8 et la Figure I- 9. Le taux d'utilisation de l'Internet pour 100 habitants varie entre 1,3% à 23% (données de 2014).

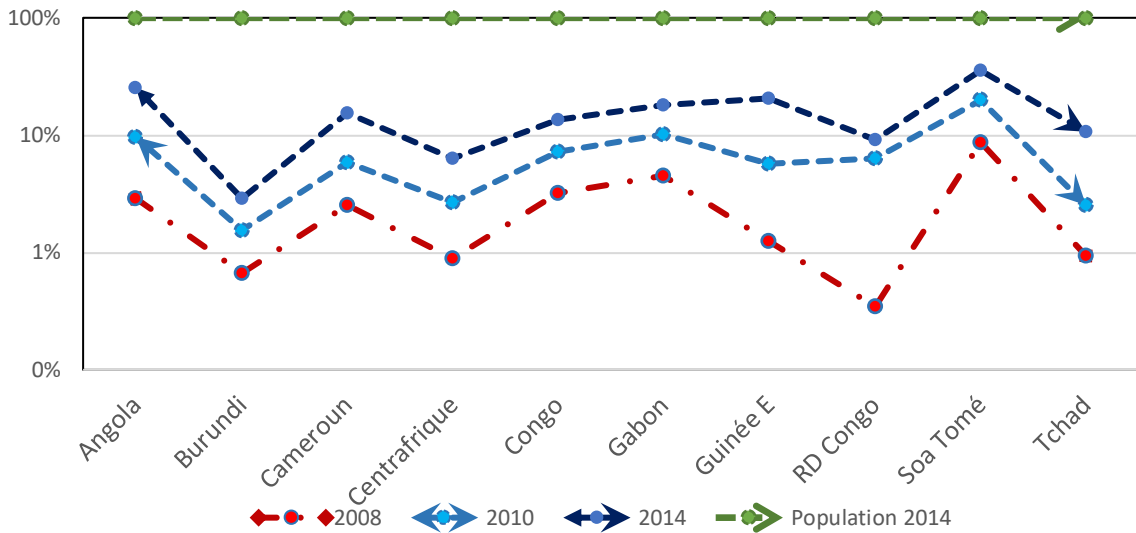


Figure I- 7: Evolution du Nombre d'abonnés Internet en Afrique centrale de 2008 à 2014

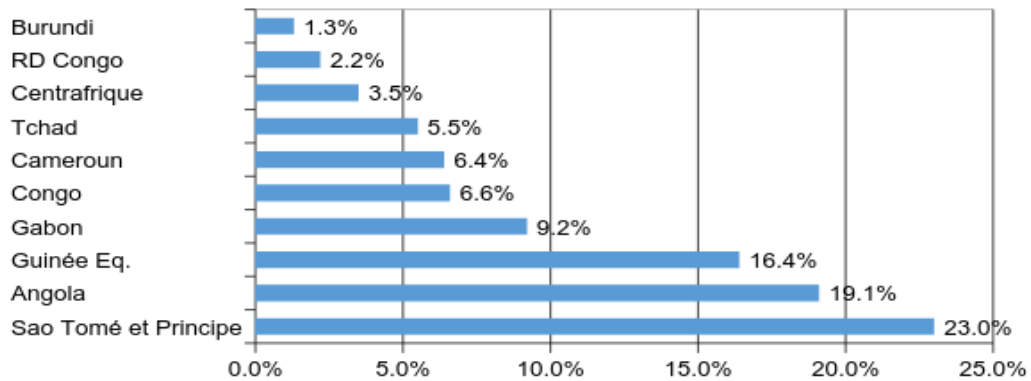


Figure I- 8: Taux d'utilisation de l'Internet pour 100 habitants (données 2014)

L'analyse de la Figure I.9 confirme qu'en Afrique centrale, l'accès à l'Internet n'est pas à la portée de plus 85% de la population car le prix des accessoires et d'abonnement est presque le double du SMIC.

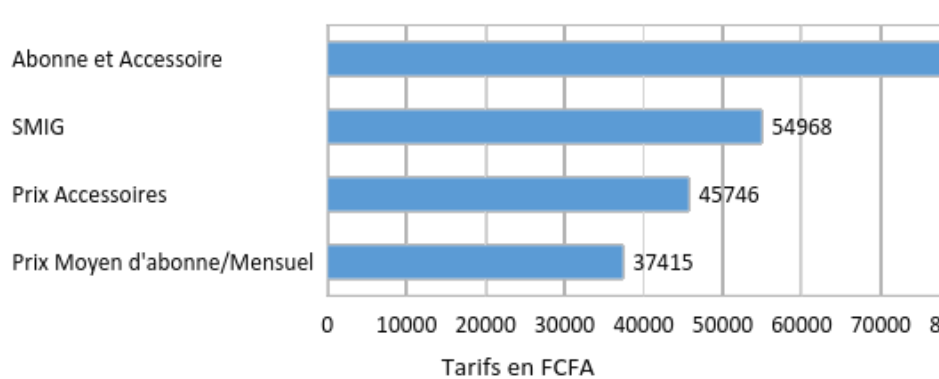


Figure I- 9: Comparaison SMIC et Tarif Internet

I.3 Identification des Problématiques liées au développement de l'Accès Universel en Afrique centrale

Après analyse de l'observatoire et identification des problématiques dans cette partie, il sera établi une cartographie cible qui permettra de fixer les schémas des solutions à étudier afin de ressortir les architectures réseaux optimales pour l'Accès Universel en Afrique centrale.

En effet, les concepts de l'Accès et du Service Universel sont définis de manière générale comme étant un développement harmonieux et équilibré des technologies permettant la vulgarisation et l'appropriation des TICs par la population.

A ce titre, après lecture des données TICs de 2008 à 2014 [7][8][9] et analyse de la situation existante des technologies de l'Afrique centrale, cinq types de problématiques liées au développement de l'Accès et Service Universel ont été identifiées. Elles sont de nature :

- Technico-Géographique ;
- Socio-Générale ;
- Economique.

I.3.1 Les Problématiques technico-géographiques

Les problématiques techniques qui entravent le développement des communications électroniques en Afrique centrale prennent leurs sources dans l'absence d'infrastructure de transmission due à une insuffisance d'investissement dans les infrastructures de base. L'alimentation électrique (énergie primaire) irrégulière voire inexistante dans certaines zones, la faible qualification du personnel, et les difficultés d'intervention (maintenance) sur les sites isolés (où le réseau routier est limité voire absent) sont aussi des facteurs de premier rang.

I.3.1.1 Energétique

Il est important de relever que la plupart des états d'Afrique centrale ont des sources d'énergie primaire peu fiables, de qualité médiocre, voire absentes. De ce fait, la consommation d'électricité en kWh/hbt/an n'est estimée qu'à 92 kWh, tandis que le taux d'électrification est de 13% (**électrification urbaine 37% et 6% électrification rurale**) [11].

Les problèmes de qualité de l'énergie primaire sont souvent contournés par les opérateurs en installant des générateurs de tension.

Dans les régions où le réseau électrique est médiocre ou absent, il n'est pas facile de trouver des solutions à la disponibilité de l'alimentation. Bien souvent les groupes électrogènes sont utilisés pour pallier ces absences. Il se pose souvent la problématique de l'approvisionnement en carburant. Le fonctionnement d'une source d'énergie requiert dans la majorité des cas deux générateurs fonctionnant en mode dual et ceci 24 heures sur 24. Bien entendu cette solution, en termes d'exploitation est très coûteuse. Certaines solutions palliatives sont mises en œuvre telles que : des solutions hybrides intégrant des batteries cycliques et des générateurs diesel sur des sites où l'alimentation électrique est inexistante ou peu fiable.

D'autres alternatives existent : la solution à base d'énergie solaire. Mais, s'il est vrai que les coûts d'exploitation, pour ce type de solution, sont nettement moindres, les coûts d'investissement (CAPEX) sont, par contre, beaucoup plus élevés.

Le faible taux d'électrification du continent handicape le déploiement des réseaux de télécommunications (fixe, mobile, Internet).

I.3.1.2 Infrastructures de transmission

Aussi, en Afrique centrale l'insuffisance des infrastructures terrestres et d'autres difficultés connexes (problèmes de signalisation et de propagation, les défauts de maintenance et difficultés d'approvisionnement en pièces de rechange) limitent l'efficacité de ces réseaux et induit un fort recours au satellitaires.

Les réseaux de téléphonie fixe sont particulièrement peu étendus et faiblement évolutifs, principalement à cause de la lourdeur des investissements nécessaires pour leur extension et leur modernisation. De plus, la téléphonie fixe affiche une rentabilité peu attractive pour les investisseurs privés, alors qu'elle pourrait constituer une réponse pérenne au coût de la communication voix en Afrique. A titre d'illustration, des études de la Banque Mondiale et de l'UIT [2][3][10] ont montré que pour réaliser un bénéfice d'un franc CFA, il faut investir trois fois plus en téléphonie fixe qu'en téléphonie mobile.

Pour les infrastructures et la connectivité Internet, la situation n'est pas meilleure que le cas de la téléphonie, en effet, le continent africain globalement pris ne représentait en 2011 que 0,8% de la capacité mondiale d'Internet.

A l'insuffisance des infrastructures de télécommunication, s'ajoutent des difficultés d'interfaçage entre les réseaux nationaux et une vétusté quasi permanente des équipements qui affectent la qualité des services de communication et réduisent les possibilités d'innovation et de création de nouvelles offres, mieux adaptées aux besoins spécifiques des utilisateurs.

Si les infrastructures sont actuellement peu développées en Afrique centrale, les technologies déployées affichent quant à elles une certaine diversité et se répartissent globalement en deux catégories : le filaire et la voie hertzienne.

Les réseaux filaires se renforcent grâce au déploiement graduel de la fibre optique qui constitue de plus en plus le cœur des backbones des opérateurs. Tandis que l'hertzien est beaucoup plus utilisé pour atteindre les consommateurs finaux.

I.3.1.3 Problématique de la maintenance

Compte tenu de la pénurie de techniciens qualifiés et des difficultés posées par l'accès aux sites isolés ou accidentés, se pose la problématique de la maintenance des sites ainsi que l'acheminement des pièces de rechange sans oublier l'acheminement du carburant pour les sites à groupes électrogènes. Les solutions devront être robustes et faciles à entretenir. Même si les équipementiers ont mis en place des programmes de maintenance stricts, des problèmes directement liés à des plans de maintenance médiocres surviennent malgré tout. L'établissement d'un service approprié et d'une stratégie de maintenance doivent être une priorité absolue.

I.3.1.4 Problématique géographique

En outre, le paramètre géographique est un critère dont l'importance est facilement quantifiable car c'est une des variables de premier degré pour la détermination des paramètres technico-économiques. Dans le contexte de l'Afrique centrale, la plupart des pays sont enclavés et ont difficilement accès aux points d'atterrissage des câbles sous-marin, aussi la densité de leur population est déséquilibrée dans la définition des zones rurales et/ou urbaines. Pour mieux déterminer la solution adéquate de déploiement des réseaux, deux sous-facteurs à savoir la densité de la population et le type de zone (noire ou blanche) doivent être considérés comme paramètre d'ordre géographique.

I.3.2 Socio-Général

Trois facteurs d'ordre général à savoir le taux de croissance par habitant (PIB), le nombre de population par pays suivant la zone urbaine ou rurale et la superficie peuvent être classés comme problématiques de type général. Ces paramètres peuvent varier selon l'appartenance économique du pays. Leur quantification et leur équilibrage implique d'agir sur des facteurs tels que le pouvoir d'achat qui d'ailleurs a un fort impact (assises sociales) sur les populations concernées.

I.3.3 Economique

L'un des principaux handicaps à une large utilisation des services de télécommunications en Afrique centrale est posé par les coûts d'accès élevés, corollaire de la faiblesse des infrastructures et de la faible connectivité intracontinentale.

La Figure I- 10 montre que la répartition des coûts des opérateurs dans leurs chaînes des charges d'exploitation et de maintenance est déséquilibrée et les charges liées à la connexion sur l'international représentent 50% des totaux. Ceci montre le manque d'infrastructures adéquates de transmission et mesure leur poids sur l'échiquier de l'économie nationale.

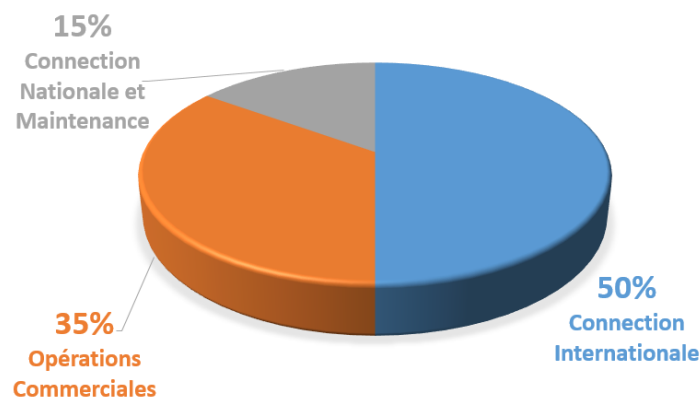


Figure I- 10 : Répartition des coûts des opérateurs

En outre, les problématiques économiques et financières à prendre en compte pour équilibrer les coûts tout en facilitant le déploiement d'infrastructures de télécommunications, sont celles liées aux coûts des investissements (CAPEX), les coûts récurrents (OPEX), les projections de revenus et les sources de financement.

I.3.3.1 Coût des investissements versus coût récurrents

Les deux principaux sous-systèmes impliquant des choix technologiques en fonction de critères économiques sont les transmissions et les sources d'énergie. En fonction de contraintes financières propres, les opérateurs optimisent les coûts d'investissements (CAPEX) ou les coûts d'exploitation (OPEX).

Ces choix dans la grande majorité des cas vont ainsi conditionner l'architecture des infrastructures. Pour les transmissions, on peut imaginer des solutions de type radio (par faisceau hertzien), filaire (fibre optique) ou satellitaire. Les deux premières technologies ont des CAPEX élevés et des OPEX faibles contrairement aux solutions technologiques de types satellitaires qui ont des CAPEX faibles avec des OPEX très élevés (coût du segment spatial).

L'approche est la même en ce qui concerne les sources d'énergie. S'il est admis qu'un groupe électrogène coûte beaucoup moins cher qu'un atelier d'énergie solaire de même puissance, les coûts d'exploitation sont très élevés pour les ateliers thermiques du fait de la consommation de carburant.

Pour la projection des revenus, il est généralement admis qu'on peut facilement projeter le résultat d'une étude de faisabilité technique, mais il est loin d'en être de même pour l'étude de faisabilité financière qui s'opère à partir d'études statistiques, de benchmarks ou autres projections marketing. Beaucoup d'études de faisabilité économique se sont ainsi révélées inexactes aussi bien dans les sous-estimations (cas des projections de la Banque mondiale pour le GSM au Gabon² qui ne prévoyait que 10.000 abonnés à l'horizon 2005) que dans les surestimations (cas des projections des abonnés « Internet » aux Comores³).

Les projections de revenus devront établir essentiellement le nombre d'utilisateurs potentiels, les revenus moyens par utilisateur (ou abonné), par service proposé, par zone géographique, etc.

I.3.3.2 Evaluation de la bande passante nécessaire

Afin de proposer une solution optimale de développement de l'Accès et Service Universel de l'Afrique centrale, il serait pertinent de déterminer les projections à long terme des besoins en capacités de cette zone. Pour y parvenir, nous devons sur la base des données de la cartographie

² Projections réalisées en 1999

³ Projections réalisées en 2009

existante projeter le nombre d'utilisateurs internet mobile sur une période de cinq ans, faire l'inventaire des débits offerts par les nouvelles technologies (3G/4G) et enfin quantifier l'augmentation prévisionnelle des besoins en bande passante.

En effet, pour évaluer convenablement les besoins en bande passante nous devons estimer les nombres d'internautes ainsi que les débits offerts par les technologies existantes. Cependant il n'existe pas, à ce jour, de statistiques précises sur le nombre d'abonnés mobiles Internet, il existe des estimations sur le nombre d'utilisateurs Internet. Un utilisateur Internet n'est pas forcément abonné au service mais utilise le moyen physique d'un abonné au service. Le nombre d'utilisateurs Internet est ainsi estimé par l'UIT à partir de données telles que : nombre d'abonnés Facebook, Twitter, adresses emails, etc.[3].

Le besoin en bande passante est directement proportionnel au nombre d'utilisateurs et au débit engendré par les nouveaux usages. Afin d'estimer les besoins supplémentaires en bande passante pour la période [2015-2020], nous avons projeté l'augmentation :

- du nombre d'abonnés ;
- du débit lié aux nouvelles technologies.

Cette projection tiendra compte des dates d'obtention des licences 3G et 4G.

L'année 2010 qui correspond à la date de déploiement des premiers sites 3G, a vu une augmentation très conséquente du parc des abonnés puis une croissance plus faible par la suite. Le déploiement de la 4G n'a pas inversé cette tendance.

Pour les autres pays du panel ayant obtenu une licence 3G, Burundi et Congo, la faiblesse des infrastructures de transmission (le Burundi est un pays enclavé n'ayant pas un accès direct aux câbles sous-marins), les données sur l'impact de la 3G sur le nombre d'abonnés internet n'est pas significatif.

Pour les pays n'ayant pas déployé la 3G ou la 4G, l'augmentation du parc des abonnés sur la base de technologies 2G+ à savoir GPRS ou EDGE se situe dans une fourchette comprise entre 6 et 30% en 2013. L'augmentation relative à la RDC n'est pas significative, elle est due essentiellement au faible nombre d'abonnés internet dans le pays.

Sur la base des observations précédentes on prendra les hypothèses suivantes :

- Augmentation de 55% du parc abonné internet pour les deux premières années suivant la date de délivrance plus douze mois de la licence 3G puis 15% les années suivantes ;
- Augmentation de 12% du parc des abonnés internet en technologie 2G+.

Pour les pays du panel n'ayant pas délivré de licences 3G et/ou 4G on prend comme hypothèse une date de délivrance en 2016 pour des licences 3G et 4G.

On traitera les cas du :

- Burundi comme celui des pays n'ayant pas déployé la 3G (Cameroun, RCA, etc.) ;
- Congo comme celui du Tchad ou du Gabon. Un backbone à fibre optique est actuellement en chantier et devrait être achevé à fin 2016.

Tableau I- 8 : Utilisateurs mobiles Internet en pourcentage de la population

| Pays | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Angola | 4,60 | 6,00 | 10,00 | 14,78 | 16,94 | 19,10 | 21,97 |
| Burundi | 0,81 | 0,90 | 1,00 | 1,11 | 1,22 | 1,30 | 1,50 |
| Cameroun | 3,40 | 3,84 | 4,30 | 5,00 | 5,70 | 6,40 | 7,17 |
| Congo | 4,29 | 4,50 | 5,00 | 5,60 | 6,11 | 6,60 | 7,39 |
| Gabon | 6,21 | 6,70 | 7,23 | 8,00 | 8,62 | 9,20 | 10,30 |
| Guinée Eq. | 1,82 | 2,13 | 6,00 | 11,50 | 13,94 | 16,40 | 18,37 |
| RCA | 1,00 | 1,80 | 2,00 | 2,20 | 3,00 | 3,50 | 3,92 |
| RDC | 0,44 | 0,56 | 0,72 | 1,20 | 1,68 | 2,20 | 2,46 |
| Sao Tome | 15,48 | 16,41 | 18,75 | 20,16 | 21,57 | 23,00 | 25,76 |
| Tchad | 1,19 | 1,50 | 1,70 | 1,90 | 2,10 | 2,30 | 2,58 |

Le Tableau I- 8 détaille par pays et par année le pourcentage d'utilisateurs mobiles Internet en pourcentage de la population.

Tableau I- 9 : Pourcentage prévisionnel (2015-2020)

| | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Angola | 25,26 | 29,05 | 33,41 | 38,42 | 44,18 | 50,81 |
| Burundi | 1,72 | 1,98 | 2,27 | 2,61 | 3,01 | 3,46 |
| Cameroun | 8,03 | 12,44 | 19,29 | 22,18 | 25,51 | 29,33 |
| Congo | 8,28 | 12,83 | 19,89 | 22,87 | 26,31 | 30,25 |
| Gabon | 15,97 | 24,76 | 28,47 | 32,74 | 37,65 | 43,30 |
| Guinée Eq. | 20,57 | 31,89 | 49,42 | 56,84 | 65,36 | 75,17 |
| RCA | 4,39 | 6,81 | 10,55 | 12,13 | 13,95 | 16,04 |
| RDC | 2,76 | 4,28 | 6,63 | 7,62 | 8,77 | 10,08 |
| Sao Tome | 28,85 | 44,72 | 69,32 | 79,71 | 91,67 | 105,42 |
| Tchad | 3,99 | 6,19 | 7,12 | 8,18 | 9,41 | 10,82 |

Les données consignées dans le Tableau I- 8 ont servi d'éléments de base pour la projection du nombre d'Internet pour la période indiquée (2015-2016). Ainsi, on obtient pour les pays du panel le pourcentage prévisionnel détaillé dans le Tableau I- 9.

Le déploiement de nouvelles technologies d'accès induit des besoins en bande passante plus importants. Ainsi en prenant comme débits « pratiques⁴» pour les technologies suivantes :

- 2,5/2,75G (GPRS/EDGE) : 64Kbits/s
- 3G (UMTS) : 330Kbits/s
- 4G (LTE) : 40Mbits/s

les besoins en débit liés aux usages individuels devraient ainsi passer de :

- 64Kbits/s à 330Kbits/s pour le passage de la 2G+ vers la 3G soit un rapport de 1 à 5 ;
- 330Kbits/s à 40Mbits/s pour le passage de la 3G vers la 4G soit un rapport de 1 à 120.

L'observation de l'augmentation du nombre d'abonnés Internet en Angola (cf. § I.2.2.3) ne permet pas de déterminer le pourcentage d'abonnés ayant opté pour une technologie 3G/4G parmi les nouveaux abonnés et les abonnés déjà existants 2G+.

Le parc des nouveaux abonnés à partir de l'introduction de la 3G/4G⁵ en Angola varie de la manière suivante :

Tableau I- 10 : Impact de l'introduction de 3G/4G sur les utilisateurs mobiles d'Internet

| | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 |
|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Angola | 40,00% | 59,39% | 64,58% | 68,59% |

En prenant comme hypothèse, les nouveaux entrants sont en grande majorité des abonnés 3G/4G et une partie des abonnés 2G+ migre vers des technologies 3G/4G, on peut admettre la répartition du parc d'abonnés internet par technologie de la manière suivante :

Tableau I- 11 : Répartition du nombre d'utilisateurs internet par technologie

| AN1 | | AN2 | | AN3 | | AN4 | | AN5 | |
|------------|-----------|------------|-----------|--------------|-----------|------------|-----------|--------------|-----------|
| 40% | | 65% | | 72,5% | | 85% | | 97,5% | |
| 3G | 4G | 3G | 4G | 3G | 4G | 3G | 4G | 3G | 4G |
| 35% | 5% | 55% | 10% | 60% | 12,5% | 70% | 15% | 80% | 17,5% |

En appliquant les hypothèses prises dans les parties précédentes on peut prévoir l'augmentation des besoins en bande passante de la manière suivante :

⁴ Ainsi, par exemple pour la LTE, on ne prend pas en compte le débit théorique de ITO annoncé mais le débit « pratique »

⁵ Ainsi, par exemple pour la LTE, on ne prend pas en compte le débit théorique de ITO annoncé mais le débit « pratique » à partir de 2009

Tableau I- 12 : Taux d'augmentation des besoins en bande passante

| | 2015 | | 2016 | | 2017 | | 2018 | |
|-------------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
| | 3G | 4G | 3G | 4G | 3G | 4G | 3G | 4G |
| Angola | 1 80,0% | 1 17,5% | 1 80,0% | 1 17,5% | 1 80,0% | 1 17,5% | 1 80,0% | 1 17,5% |
| | 2754% | | 3167% | | 3642% | | 4188% | |
| Burundi | 1 0,0% | 1 0,0% | 1 35,0% | 1 5,0% | 1 55,0% | 1 10,0% | 1 60,0% | 1 12,5% |
| | 2% | | 64% | | 143% | | 205% | |
| Cameroun | 0 | 0 | 1 35,0% | 1 5,0% | 1 55,0% | 1 10,0% | 1 60,0% | 1 12,5% |
| | 8% | | 403% | | 1217% | | 1736% | |
| Congo | 1 35,0% | 0 5,0% | 1 55,0% | 1 10,0% | 1 60,0% | 1 12,5% | 1 70,0% | 1 15,0% |
| | 268% | | 810% | | 1557% | | 2142% | |
| Gabon | 1 35,0% | 1 5,0% | 1 55,0% | 1 10,0% | 1 60,0% | 1 12,5% | 1 70,0% | 1 15,0% |
| | 517% | | 1562% | | 2228% | | 3066% | |
| Guinée Eq. | 0 | 0 | 1 35,0% | 1 5,0% | 1 55,0% | 1 10,0% | 1 60,0% | 1 12,5% |
| | 21% | | 1032% | | 3119% | | 4449% | |
| RCA | 0 | 0 | 1 35,0% | 1 5,0% | 1 55,0% | 1 10,0% | 1 60,0% | 1 12,5% |
| | 4% | | 220% | | 666% | | 949% | |
| RDC | 0 | 0 | 1 35,0% | 1 5,0% | 1 55,0% | 1 10,0% | 1 60,0% | 1 12,5% |
| | 3% | | 138% | | 418% | | 597% | |
| Sao Tomé | 0 | 0 | 1 35,0% | 1 5,0% | 1 55,0% | 1 10,0% | 1 60,0% | 1 12,5% |
| | 29% | | 1447% | | 4374% | | 6239% | |
| Tchad | 1 35,0% | 1 5,0% | 1 55,0% | 1 10,0% | 1 60,0% | 1 12,5% | 1 70,0% | 1 15,0% |
| | 129% | | 391% | | 557% | | 767% | |

NB :

Technologie X (3G, 4G)=1, signifie que la licence afférente à ces technologies est octroyée aux opérateurs dans ces pays et cette dernière est déployée.

Technologie X (3G, 4G)=0, les technologies de 3G et 4G sont inexistantes.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un bref aperçu de la situation de développement des TICs, une analyse des paramètres économiques et une identification des problématiques liées au développement de l'Accès Universel en Afrique centrale. En vue de procéder à la mise en place d'une cartographie cible, nous avons procédé à l'évaluation des besoins en bande passante.

Cette évaluation des besoins montre que cette dernière évoluera de manière très importante lors des années à venir. Ceci implique la mise en place d'infrastructures de transmissions adéquates pour pallier les besoins identifiés. Cependant le déploiement de ces infrastructures demande des investissements conséquents et vue la cartographie économique de cette région, cela nécessite des efforts considérables. Ces efforts sont de natures techniques, politiques et stratégiques que tous les acteurs concernés à savoir les opérateurs, les chercheurs et les pouvoirs publics doivent faire. Dans un premier temps il est primordial d'apprécier l'existence du fonds dédié au Service Universel dans les pays où les gouvernants l'ont instauré et encouragé les autres à la mise en place de ce système. Ce fonds servira sans nuls doutes à la subvention des zones nécessitant la mise en œuvre de l'Accès et Service Universel et ainsi contribuera à la baisse des tarifs dans l'intérêt des populations ayant un pouvoir d'achat symbolique.

Cependant, il est aussi important et nécessaire de trouver des solutions techniques contextualisées au Service et à l'Accès adaptées au monde rural. A cet effet, une méthodologie d'évaluation du niveau de développement des TICs doit être proposée dans la suite de ces travaux. Après une analyse des technologies existantes, il est aussi obligatoire de proposer des métriques permettant de faire un choix judicieux des technologies radio et/ou filaires optimales pour le développement des TICs.

CHAPITRE 2 : Généralités sur les technologies large bande

Introduction

Ce chapitre traite de la description des réseaux large bande basés sur les technologies optiques et radio en vue de relater les notions de base nécessaires de ces différentes technologies.

Dans la perspective de proposer des solutions pour le développement de l'Accès et Service universel, cette description permet d'appréhender les avantages et les inconvénients de chacune de ces technologies.

Ainsi, la première partie de ce chapitre s'intéresse aux réseaux larges bande basés sur les technologies optiques. Elle décrit les différentes composantes ainsi que les caractéristiques techniques.

La deuxième partie traite des techniques de modulation et la troisième propose une modélisation d'une liaison optique sous forme de structure puis l'applique au cas du réseau métropolitain du Tchad.

Dans la dernière partie de ce chapitre, quelques technologies radio terrestres et spatiales sont analysées de manière descriptive afin d'en déterminer leurs limites et avantages. Une étude comparative est aussi faite dans le but de proposer des architectures radio optimales et vérifier leurs compatibilités aux services universels.

II.1 Technologies optiques

II.1.1 Structure générale d'une liaison optique

La structure d'une liaison optique est composée principalement de trois parties [12][13] :

- l'émission;
- la transmission ;
- la réception.

La Figure II- 1 présente le schéma synoptique d'un système de transmission optique, ses éléments constitutifs sont décrits dans la suite.

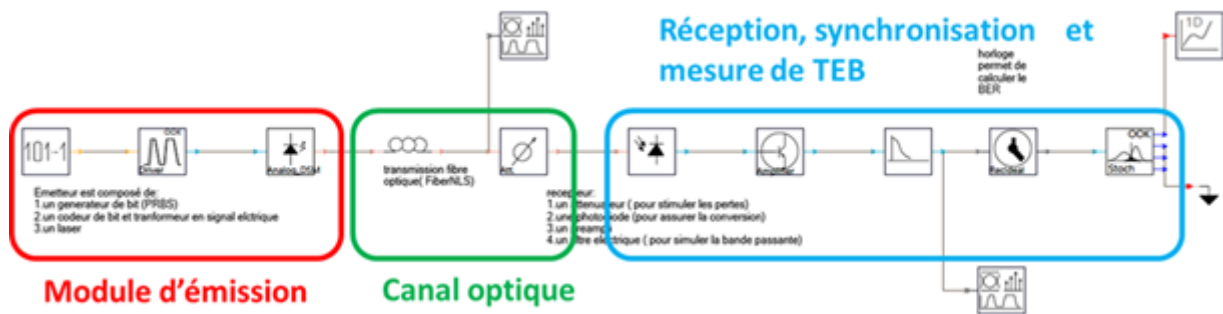


Figure II- 1 : Structure générale d'une liaison optique

II.1.2 Le module d'émission

La transformation du signal électrique en signal optique est assurée par l'interface d'émission. Elle est composée principalement d'éléments optoélectroniques d'émission chargé de convertir le signal électrique sous forme de lumière, qui peut être une diode électroluminescente (DEL) ou une diode laser (DL). Le module d'émission contient également des circuits d'adaptation et de protection et est relié au câble soit par une embase de connecteur, soit par une fibre amorce [15][16] et [17]. Il intègre un générateur de format de modulation et une interface réseau-service.

II.1.3 Les Sources Optiques

Comme mentionné juste avant, pour véhiculer une information dans le canal de communication optique, elle doit être faite sous forme de lumière. Pour transformer l'information en lumière, on doit nécessairement utiliser un semi-conducteur. Des porteurs électriques doivent être amenés aux semi-conducteurs afin que ces dernières puissent émettre des photons lumineux. Une émission spontanée ou stimulée entraîne leur génération [18][19][20]. En injectant des porteurs de charge via une jonction p-n on obtient la transmission. Ainsi, la luminescence à injection découle du processus de l'injection de porteurs et de l'émission résultante [15]. Ce qui fait que les Diodes électroluminescentes (DEL) et les diodes lasers (DL) sont l'exemple des applications à sources lumineuses.

▪ Les diodes électroluminescentes

Une diode électroluminescente est un composant optoélectronique qui convertit le signal électrique en un signal optique lorsque la tension (signal électrique) est appliquée à travers ses

deux entrées. Les diodes électroluminescentes sont classées comme moins performantes, ceci est dû à leur faible puissance d'émission et leur mauvais rendement de couplage.

Ainsi les principales caractéristiques des diodes électroluminescentes sont :

- leur émission d'une puissance optique limitée ;
- leur importante largeur spectrale large ($\Delta\lambda = 50-70\text{nm}$) ;
- leur faible coût par rapport aux diodes laser ;
- leur grande dimension.

En résumé, pour les raisons ci-dessus évoquées, les diodes électroluminescentes ne peuvent être utilisées aisément que pour des applications à faible coût nécessitant la transmission de données (quelques kilomètres) à des débits inférieurs à 100Mbt/s. Elles ne sont donc pas retenues pour les transmissions optiques et ne sont pas utilisées dans les réseaux déployés.

▪ Les Lasers

Les sources lasers sont également des dispositifs qui convertissent un signal électrique en un signal optique correspondant afin de véhiculer ce dernier dans un canal optique. Elles sont considérées comme des sources optiques très adaptées pour les télécommunications optiques à cause de leurs petites dimensions en rapport avec celles du cœur de fibres optiques, de la facilité de modulation directe, de leur spectre optique relativement étroit et de leur faible consommation en énergie [15][16].

Vu les besoins en sources robustes pour les systèmes optiques, le développement des lasers à semi-conducteurs a très vite été fait et des progrès considérables ont été aussi enregistrés. A ce jour, il existe différents types de diodes laser à semi-conducteurs tels que les diodes laser de type Fabry-Pérot (DFP), les lasers distribués à rétroaction répartie (DFB) et les lasers à cavité (VCSEL) [15]. Les plus utilisées pour les transmissions optiques sont les lasers DFB qui présentent des caractéristiques des lasers intéressantes :

- l'émission de fortes puissances (jusqu'à 100mW pour les lasers télécom) ;
- une fréquence stabilisée à température contrôlée ;
- une largeur spectrale relativement étroite qui permet un fonctionnement à des débits supérieurs à 40Gbits (la dispersion des fibres devient alors moins critique) ;
- la possibilité d'être modulée à des fréquences élevées.

Malgré la complexité technologique et le coût assez élevé des lasers, la majorité des systèmes de communications optiques utilise les lasers à semi-conducteurs comme une source optique idéale en raison de leur rendement supérieur à celui des diodes électroluminescentes [64]. Il

faut noter cependant que ces lasers présentent une émission de bruit spontané (RIN du laser : Relative Intensity Noise).

II.1.4 Le module de transmission

Les fibres optiques sont généralement conçues en verres de silice avec des qualités optiques et d'indice de réfraction différents. Étant des guides d'ondes lumineuses cylindriques, elles sont composées d'une gaine avec un indice de réfraction faible. Les impuretés des verres peuvent absorber de la lumière, ce qui crée l'atténuation de l'onde [16]. Lors de la transmission de la lumière dans une fibre, quand le signal optique correspond à un étalement temporel de l'impulsion on qualifie cela de dispersion. Dans ce document nous allons focaliser notre analyse sur les fibres monomodes. La raison qui justifie cela, est leur utilisation dans la quasi-majorité des systèmes de communications optiques (plus de 80% des réseaux déployés).

II.1.5 Le phénomène d'atténuation

L'atténuation est la résultante de l'interaction onde électromagnétique-matière et aussi des défauts géométriques lors de la fabrication de la fibre [21]. Elle se caractérise par l'affaiblissement du signal au cours de la propagation et impacte la distance maximale de transmission.

- **L'interaction onde électromagnétique/matière**

L'intensité de la lumière qui arrive sur le détecteur doit absolument dépasser un seuil pour qu'elle soit détectable. Mais nous notons qu'entre l'émetteur et le récepteur, la puissance optique diminue (atténuation du signal). Pour la transmission par fibre optique, la baisse de puissance est enregistrée au niveau des connecteurs, des autres dispositifs en ligne ainsi que dans la fibre elle-même. L'effet d'atténuation dans la fibre limite la distance maximale entre l'émetteur et le récepteur et est quantifié par le coefficient d'atténuation/absorption.

- **Coefficient d'absorption**

On peut définir le coefficient d'absorption de la manière suivante :

Soit L , la longueur de la fibre, I_0 et I_l représentent, respectivement, l'intensité de la lumière à l'entrée et à la sortie de cette fibre. On peut déduire qu'il y a atténuation dans la fibre si :

$$I_l < I_0 \quad (2.1)$$

$$\frac{dI}{dz} = -\alpha I(z) \quad (2.2)$$

$$I(z) = Ae^{-\alpha z} \text{ alors } I(z) = I_0 e^{-\alpha z} \quad (2.3)$$

$$\frac{I(z)}{I_0} = e^{-\alpha z} \text{ donc } \alpha = -\frac{\ln\left(\frac{I(L)}{I_0}\right)}{L} \quad (2.4)$$

α est appelé coefficient d'atténuation ; elle est exprimée en m^{-1} et définie dans l'expression ci-après :

$$\alpha \left(\frac{db}{km} \right) = -\frac{10}{L} \times \log\left(\frac{I(L)}{I_0}\right) \quad (2.5)$$

Pour illustrer le phénomène d'affaiblissement induit par la fibre, nous avons simulé sous VPI une liaison simple en modulation directe en imposant la dispersion de la fibre à 0 et en ne laissant que le paramètre d'affaiblissement. La longueur de la fibre varie de 0 à 200km et le débit est de 5 et 10Gb/s et le coefficient d'atténuation est de 0,2 db/km. La Figure II- 2(a) montre, quel que soit le débit, l'affaiblissement à le même impact sur la puissance et ne dépend que de la longueur de transmission. En revanche la Figure II- 2(b) montre l'impact de l'affaiblissement sur le TEB. A un TEB de 10^{-9} , on perd une distance de 8km.

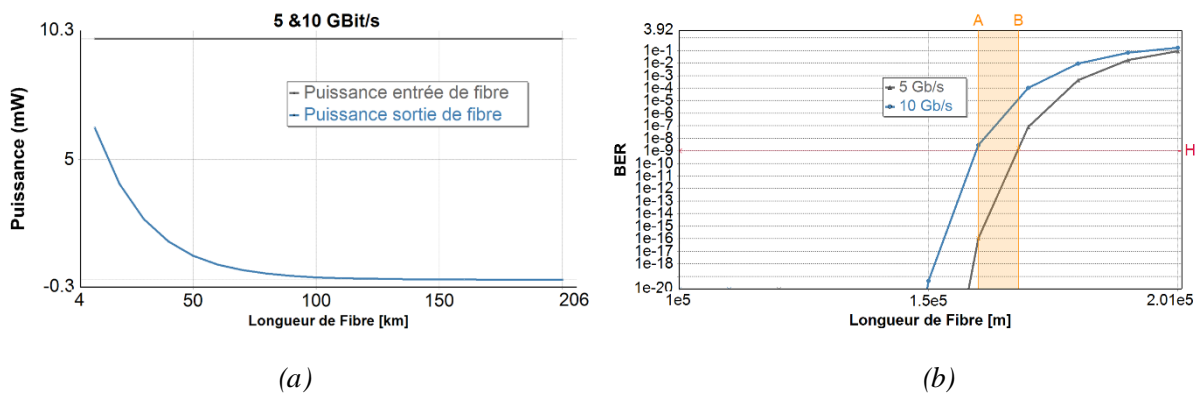


Figure II- 2 : Impact de l'affaiblissement de la fibre (a) sur la puissance optique ; (b) sur le TEB

Des répéteurs régulièrement espacés sont souvent employés dans les transmissions optiques pour augmenter les distances de transmission et compenser les pertes. Il existe trois types d'amplificateurs : amplificateur à fibre dopée à l'erbium (EDFA), amplificateur Raman (RFA), amplificateur optique à semi-conducteur (SOA). Les plus couramment utilisés sont les EDFA qui amplifient le signal sur toutes les longueurs d'onde transmises dans la fibre sans avoir à convertir le signal, mais il s'avère qu'ils génèrent un bruit d'amplification spontanée qui induit également une limitation dans la propagation.

II.1.6 Les défauts géométriques lors de la fabrication de la fibre

▪ Pertes par diffusion

La connexion des molécules SiO₂ est faite sous une structure aléatoire [16][17][18] et ceci produit des fluctuations de l'indice de réfraction, sur des longueurs d'onde d'ordre inférieur ou égale à 0,1µm. Dès que le signal optique rencontre une irrégularité de dimension inférieure à sa longueur d'onde, le signal est dispersé dans toutes les directions et une partie du signal est perdue. Ce phénomène est appelé la diffusion de Rayleigh. Cette diffusion est due à la nature amorphe du verre et son coefficient d'atténuation varie de λ^{-4} .

▪ Pertes par absorption

Les pertes d'absorption découlent de l'absorption d'une partie d'énergie du signal par le verre. Nous pouvons énumérer trois types de pertes par absorption, il s'agit de :

- l'absorption due aux transitions électroniques entre la bande de valence et la bande de conduction et elle n'est possible que pour des longueurs d'onde inférieures à $\lambda = \frac{hc}{Eg}$;
- l'absorption liée à l'excitation de vibrations du réseau formé par les atomes du matériau, ce dernier n'est quantifiable que si la fréquence de l'onde électromagnétique est voisine de la fréquence d'oscillation de la liaison entre les atomes ;
- le troisième mécanisme d'absorption est lié à la présence inévitable d'impuretés dans le verre.

II.1.6.1 Dispersions

Le signal optique peut posséder plusieurs composantes spectrales avec des vitesses ou modes de propagation différentes dans la fibre et peuvent atteindre le photorécepteur à des temps de propagation différents. Ce phénomène d'étalement temporel du signal optique est dénommé dispersion et on peut en distinguer deux types à savoir la dispersion intermodale et la chromatique [17][22].

▪ Dispersion intermodale

La dispersion intermodale [17][22] découle de la décomposition en plusieurs modes de l'impulsion injectée dans une fibre multimode. Chaque mode peut parcourir une distance différente et certaines composantes du "pulse" peuvent arriver avant d'autres. Ce phénomène de dispersion est responsable de la limitation des systèmes de transmission. Comme dans les

systèmes de télécommunications optiques haut débit, seules les fibres monomodes sont utilisées, un seul mode se propage dans la fibre et ce paramètre intermodal est inexistant et n'est pas limitant. C'est d'ailleurs tout l'intérêt des fibres monomodes.

- **Dispersion chromatique**

La dispersion chromatique, quant à elle est présente dans toutes les fibres. Elle induit un élargissement du spectre des impulsions lors de la transmission du signal et crée des distorsions [16][23].

Soit D étant le paramètre qui caractérise la dispersion chromatique (ps/nm.km) et résultant de la dispersion du matériau D_{mat} et du guide D_g , alors $D = D_{mat} + D_g$.

Des études ont été menées par des chercheurs pour réduire au maximum la valeur de ce paramètre (fibre panda par exemple), mais en contrepartie, l'atténuation est pénalisée et la distance de transmission également quand on utilise des fibres à dispersion décalée ou nulle.

De même, on a simulé une liaison à modulation directe à 5Gb/s et 10Gb/s, en ne prenant en compte que l'effet de la dispersion avec une puissance d'entrée de fibre à 10mW (effets non linéaires non activés).

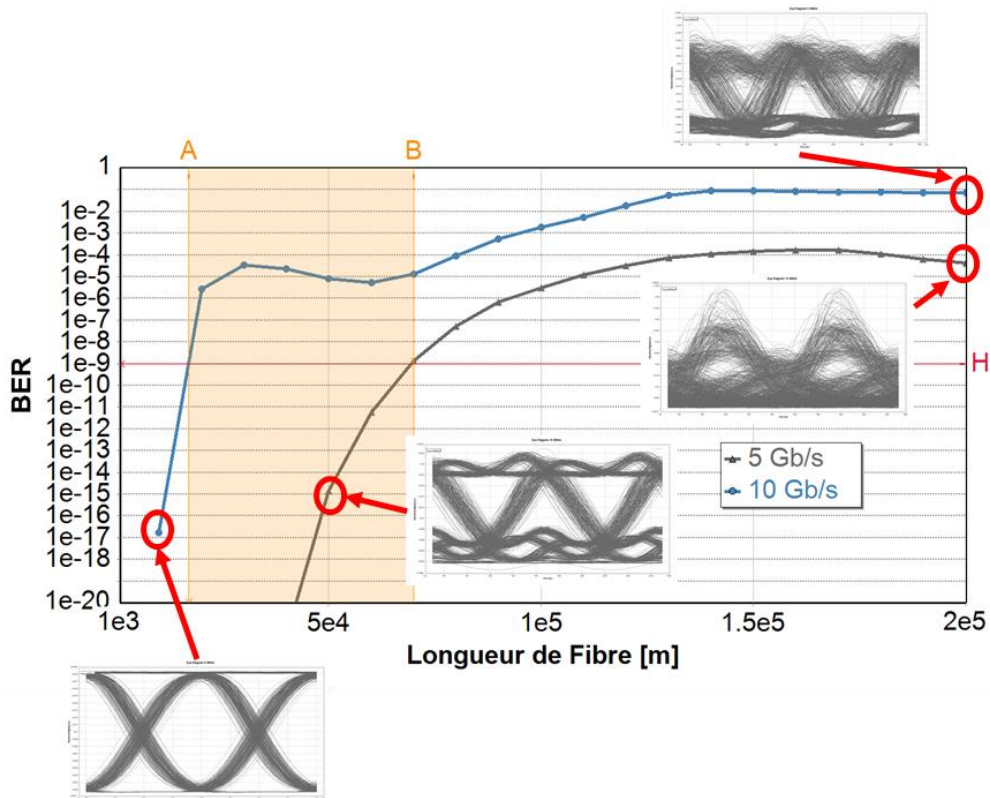


Figure II- 3 : TEB et diagrammes de l'œil en sortie de transmission optique : impact de la dispersion

Comme illustré sur la Figure II- 3, ce paramètre est très pénalisant lors des transmissions haut-débit. Pour un TEB de 10^{-9} une augmentation de débit de 5Gb/s à 10Gb/s entraîne une perte de distance de transmission de 53km. On peut observer les diagrammes de l'œil de la Figure II- 3 qui illustrent l'effet de la dispersion sur les données au fur et à mesure de l'augmentation de la distance et ceci pour les 2 débits.

▪ Dispersion Modale de polarisation (PMD)

Lors de la conception industrielle de la fibre, on peut dénombrer quelques imperfections de fabrication notamment l'ellipticité du cœur et/ou des contraintes résiduelles. Ces imperfections peuvent provoquer de la biréfringence dans la fibre en faisant apparaître un axe rapide et un autre lent de propagation. Ainsi lors de l'injection du signal dans la fibre sous forme d'impulsion, il apparaît une dégénérescence entre les modes de propagation et la lumière subira des fluctuations aléatoires. Ce phénomène conduit au dédoublement de l'impulsion initiale (élargissement temporel) dû à la non synchronisation de deux parties (DGD), c'est ce qu'on appelle la dispersion modale de polarisation.

La caractéristique principale de la PMD est que c'est un phénomène stochastique de dispersion de l'impulsion lumineuse le long d'une fibre, dû à l'interaction entre la lumière et le matériau constituant la fibre optique. Elle se traduit par une perte de puissance et une dispersion temporelle, augmentant ainsi les erreurs de transmissions [16]. Sa mesure repose sur une approche statistique et elle est donnée en ps ou en ps/\sqrt{Km} .

II.1.6.2 Effets sur la Transmission

La dispersion chromatique d'une fibre entraîne différents temps de propagation et un élargissement temporel des impulsions émises si celles-ci ne sont pas parfaitement monochromatiques. Au bout d'une certaine distance, si cet étalement devient relativement important, un recouvrement générateur d'interférences entre symboles est possible. Pour corriger ce facteur de limitation de performances sur les fibres à très haut débit, on doit passer principalement par deux techniques de compensations, à savoir, l'utilisation des fibres ayant la dispersion chromatique modifiée ou ajoutée à la première ayant la dispersion chromatique positive une seconde fibre ayant la dispersion négative. Il existe également la compensation électronique de dispersion (EDC) [17].

Les Figure II- 4 et Figure II- 5 montrent le phénomène de dispersion chromatique appuyé par une compensation partielle à l'aide de fibres adaptatives.

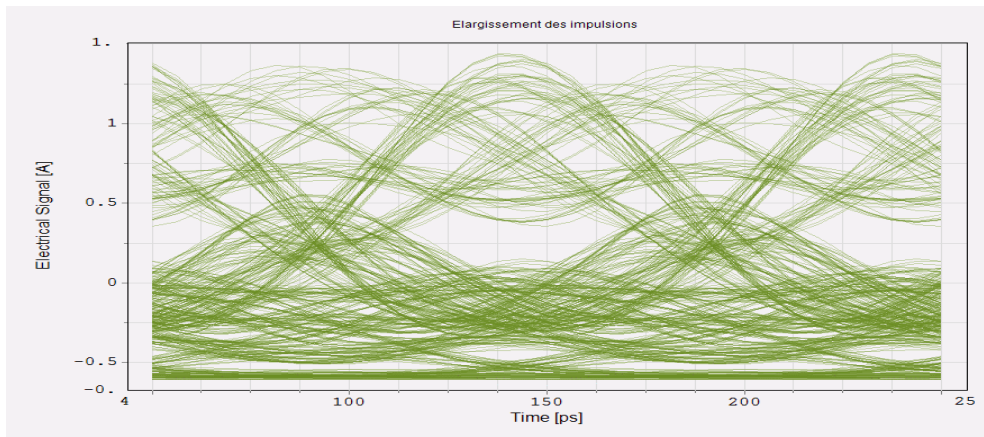


Figure II- 4 : Diagramme de l'œil en sortie de transmission optique sans compensation de dispersion

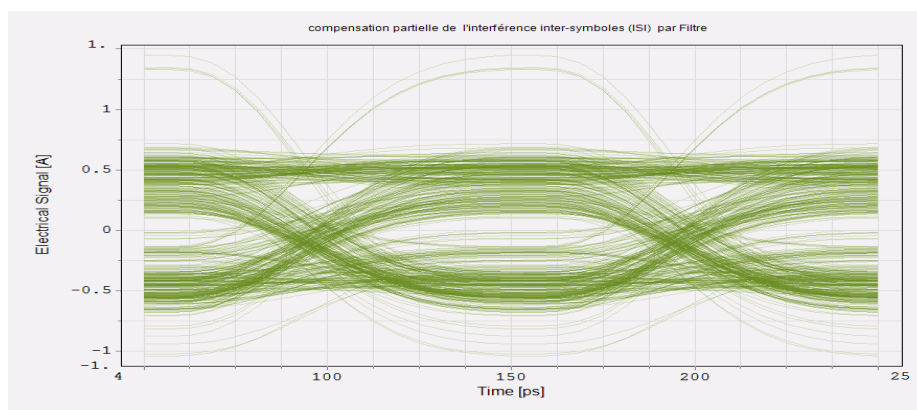


Figure II- 5 : Diagramme de l'œil en sortie de transmission optique avec compensation de dispersion

II.1.7 Le module de réception

Dans les communications électroniques, le récepteur est un module aussi essentiel que nécessaire qui demande un choix judicieux de composants. Il est composé de plusieurs éléments répartis en trois blocs (Figure II- 6).

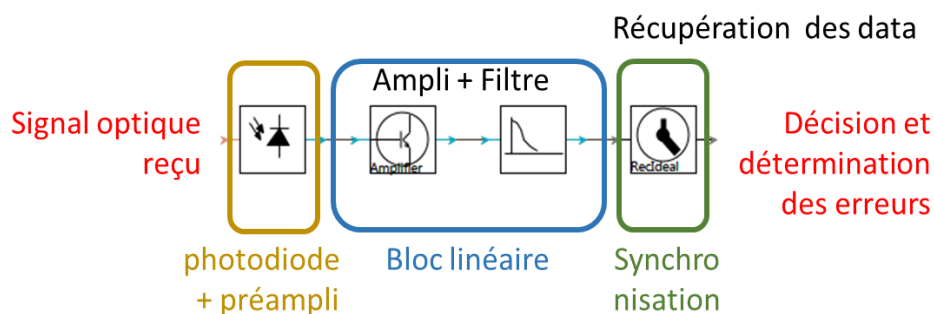


Figure II- 6 : Synthèse du module de réception

Le premier bloc du récepteur comprend un photo-détecteur qui, par ses caractéristiques, est l'élément primordial du module récepteur. Il a pour rôle de convertir le signal optique venant

du canal optique en un signal électrique. Il est nécessaire qu'il ait une très bonne sensibilité, autour de -19dBm sur des fréquences électriques allant jusqu'à 40GHz. Il est très souvent accompagné par un préamplificateur à faible bruit. Le deuxième bloc est composé d'un amplificateur électrique à gain et un filtre réducteur de bruit. La dernière partie « récupération de data » est constituée d'un circuit de récupération d'horloge et de démodulateur de format de modulation numérique.

II.1.7.1 Les photodiodes

Les photodiodes sont à base de matériaux semi-conducteurs qui absorbent plus ou moins le rayonnement incident venant de la fibre. Ils ont pour rôle de transformer les flux des données optiques en un signal électrique. Les photodiodes PIN et APD sont analysées et comparées pour donner les avantages et inconvénients de chacune d'elles.

- **Une photodiode PIN (couche-P, couche Intrinsèque, couche-N)**

Une photodiode PIN est utilisée comme photo-détecteur dans la majorité des systèmes des communications électroniques. C'est un semi-conducteur du genre optoélectronique. Elle se distingue des autres photodiodes par sa jonction composée d'une zone intrinsèque intercalée entre une région dopée p et une autre dopée n . Les régions de type p et de type n fortement dopées sont utilisés pour les contacts ohmiques.

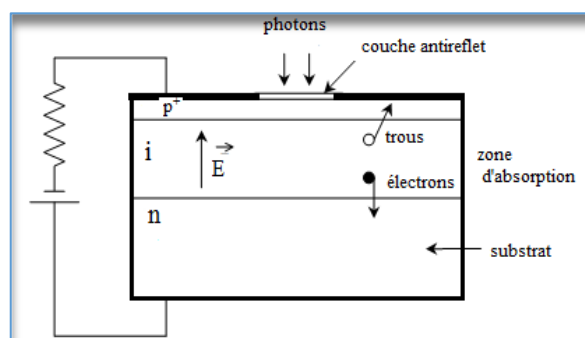


Figure II- 7 : Schématique simple d'une photodiode PIN [14]

- **Une photodiode APD**

Une photodiode à avalanche (APD) est un dispositif électronique très sensible qui convertit la lumière en électricité via l'effet photoélectrique. Elle peut multiplier de façon interne le courant obtenu par absorption photonique. En faisant croître le champ électrique dans la jonction PIN, l'énergie des porteurs s'élève, jusqu'au point d'ioniser un atome en cas d'impact avec celui-ci. Des ionisations en chaîne se produisent alors et les porteurs se multiplient [15]. Une APD permet de

gagner en seuil de détectivité par rapport à une PIN. La photodiode à avalanche montre un effet courant interne de gain (environ 100) en raison de l'ionisation par impact (effet d'avalanche).

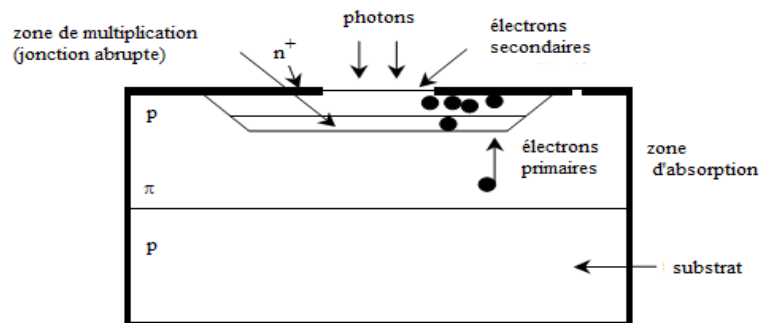


Figure II- 8 : Schématique simple d'une photodiode APD [14]

Après comparaison entre la photodiode PIN et APD, la PIN reste plus performante pour les puissances élevées au-delà de 0,7W mais nous notons que la photodiode APD est particulièrement avantageuse pour les puissances faibles [14].

II.1.7.2 Les amplificateurs et filtres de réception

Le deuxième bloc du module de réception comprend deux types d'éléments à savoir les amplificateurs et les filtres. Les amplificateurs sont utilisés en complément des préamplificateurs pour augmenter la puissance du signal à la sortie de la photodiode. En effet, pour compenser 1dB optique, il faut nécessairement 2dB électriques. Aussi, le signal amplifié en sortie du récepteur peut contenir du bruit, afin de réduire ce bruit le signal doit être filtré dans la bande $0-\Delta F$ [12] [15].

II.1.7.3 Le circuit de décision et de récupération d'horloge

Le circuit de décision, après détection du signal électrique, il génère un signal binaire « 1 » si le signal détecté est supérieur à une valeur seuil de décision, sinon un « 0 ». Ensuite le système de récupération d'horloge extrait le signal horloge à partir du signal détecté précédemment et s'ensuivra la reconstruction du signal électrique.

II.2 Techniques de modulation

Pour assurer la transmission des données dans les systèmes de communications numériques optiques, il faut caler l'information sur le signal à transmettre dans la fibre, ce procédé est appelé

communément la modulation. En effet, ce procédé ne peut être fait que de deux manières, à savoir, la modulation directe et la modulation externe.

II.2.1 Modulation directe

La modulation directe consiste, à travers les possibilités offertes par les lasers à semi-conducteur à moduler directement le courant de la pompe du laser (Figure II- 9). Ce procédé provoque une modulation parasite de phase du signal optique causée particulièrement par le laser que l'on appelle le chirp (facteur de Henry + chirp adiabatique) [24]. Aussi les oscillations et le bruit créés par le laser conduisent la modulation directe à engendrer la dégradation du signal optique lors des transmissions à haut débit au-delà de 5Gb/s.

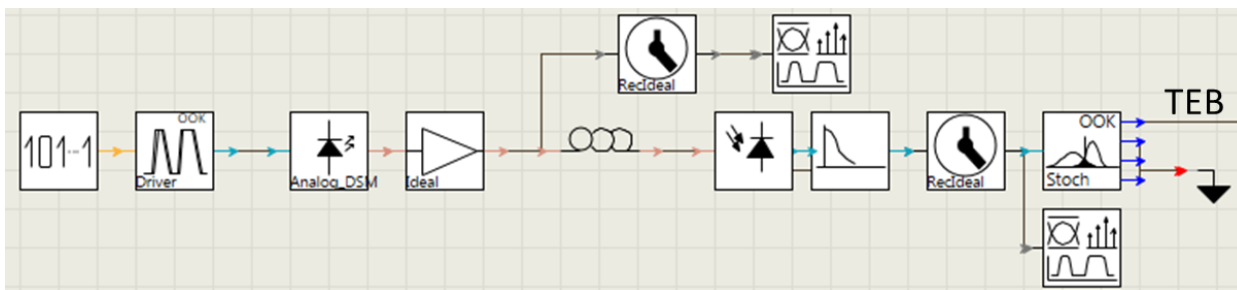


Figure II- 9 : Schéma synoptique d'une liaison optique à modulation directe

II.2.2 Modulation Externe

Le concept de la modulation externe consiste à écrire les données électriques sur un signal optique continu en utilisant un modulateur externe (Figure II- 10). Cette manière de moduler permet d'éviter un chirp trop important (cf. modulation directe). Les modulateurs externes sont classés en deux familles, à savoir, les modulateurs d'amplitudes (modulateurs à électro-absorption EAM et les Mach-Zehnder MZM) et les modulateurs de phase (PM).

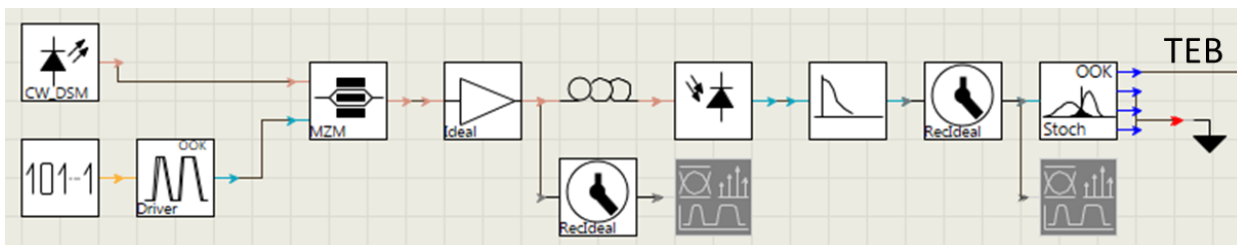


Figure II- 10 : Schéma synoptique d'une liaison optique à modulation externe à base de MZM

Les modulateurs à électro-absorption (EAM) sont des composants optiques basés sur des matériaux semi-conducteurs. Leur principe de fonctionnement repose sur les modifications du spectre d'absorption d'un semi-conducteur soumis à un champ électrique. Cet effet est connu

sous le nom d'effet Franz-Keldysh dans un matériau massif et d'effet Stark connue dans un matériau quantique.

L'inconvénient des EAMs est que leur fonction de transfert en intensité dépend fortement de la longueur d'onde du signal optique [25].

Pour rendre compte de l'avantage d'utiliser la modulation externe, nous avons simulé les liaisons illustrées sur les Figure II- 9 et Figure II- 10. La puissance en entrée de la fibre est de 10mW, la longueur de transmission varie de 0 à 200 km. Tous les phénomènes précités sont intégrés dans les modèles et 2 débits sont testés (5 et 10Gb/s) à une longueur d'onde de 1550 nm.

Les résultats (Figure II- 11) confirment que la modulation directe est beaucoup limitative que la modulation externe : 16km (curseur A) contre 117km (curseur B) à 10 Gb/s et 60km contre 165km à 5Gb/s.

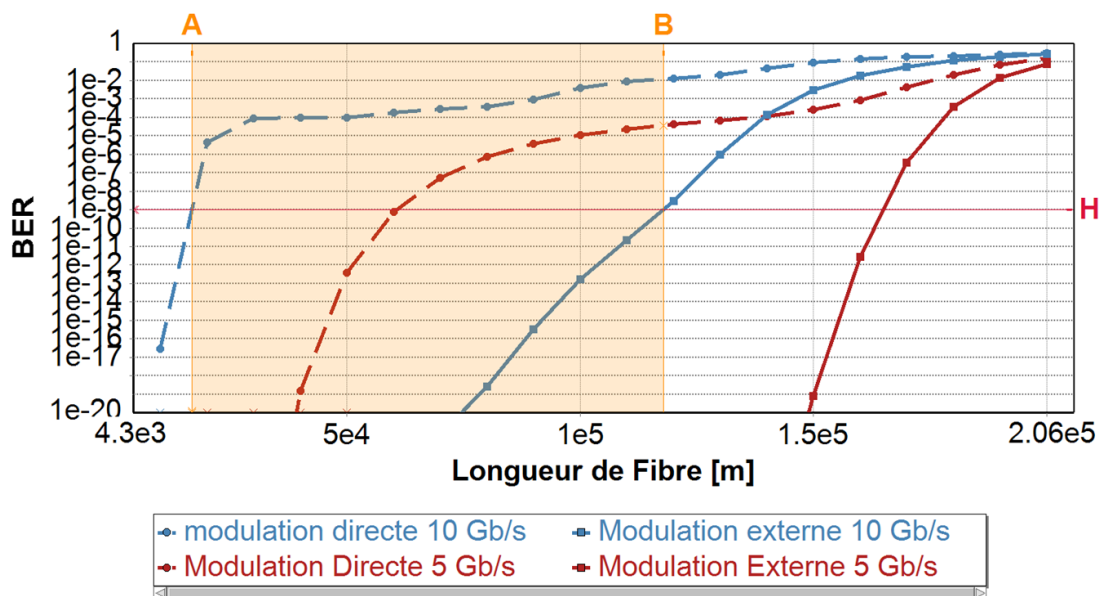


Figure II- 11 : TEB en fonction de la distance de transmission et de la méthode d'injection de la lumière à 5 et 10 Gb/s

On retiendra par la suite la modulation externe et des simulations présentées dans le chapitre 5 étayeront nos choix entre les MZM et EAM pour la liaison qui nous intéresse, déployée au Tchad (cf. chapitre 1).

II.3 Etude d'un réseau métropolitain

Après avoir décrit les différentes caractéristiques des fibres optiques à savoir, l'atténuation, la dispersion, les effets non-linéaires et les impacts sur les transmissions ; une analyse descriptive d'une structure de liaison optique est faite dans la suite. Dans cette section, nous allons introduire la notion de réseaux optiques à longues et très longues distances. Les réseaux très longue distance sont de type point à point variant entre 6 000 à 13 000km et sont faits pour relier deux continents à travers la fibre optique.

Dans cette thèse nous nous intéresserons aux réseaux optiques longue distance. En effet, suivant une distance donnée de transport de l'information un réseau est dit « longue distance », métropolitain ou très longue distance. Le réseau longue distance est déployé pour transporter des informations entre les villes ou les pays, ils peuvent relier les continents, leur distance varie entre 500 et 3 000km [16][26]. Ces types de réseaux sont composés de tronçons de 80 à 100km de fibre standard monomode ou de Large Effective Area Fiber (LEAF fiber). Les différents tronçons sont séparés par des amplificateurs de type Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA) et des fibres de compensation sont insérées entre les différents étages. Afin de contextualiser et en guise d'illustration, nous allons décrire le projet longue distance en cours de déploiement au Tchad (Projet Ndjamen-Adré) [27].

II.3.1 Projet fibre optique au Tchad

Dans le but de désenclaver le pays et offrir des services haut débit à ses citoyens, le Gouvernement Tchadien a déployé dans une première phase un tronçon d'environ 800km de fibre sur le long du trajet Ndjamen-Gangui (frontière Camerounaise). Aussi la phase 2 de construction des infrastructures haut débit à fibres optiques [28] [27] sur les segments N'Djaména–Adré–Frontière Soudan a été lancée en 2015. C'est cette phase qui sera support d'analyse dans ce document pour illustrer les différentes études rapportées.

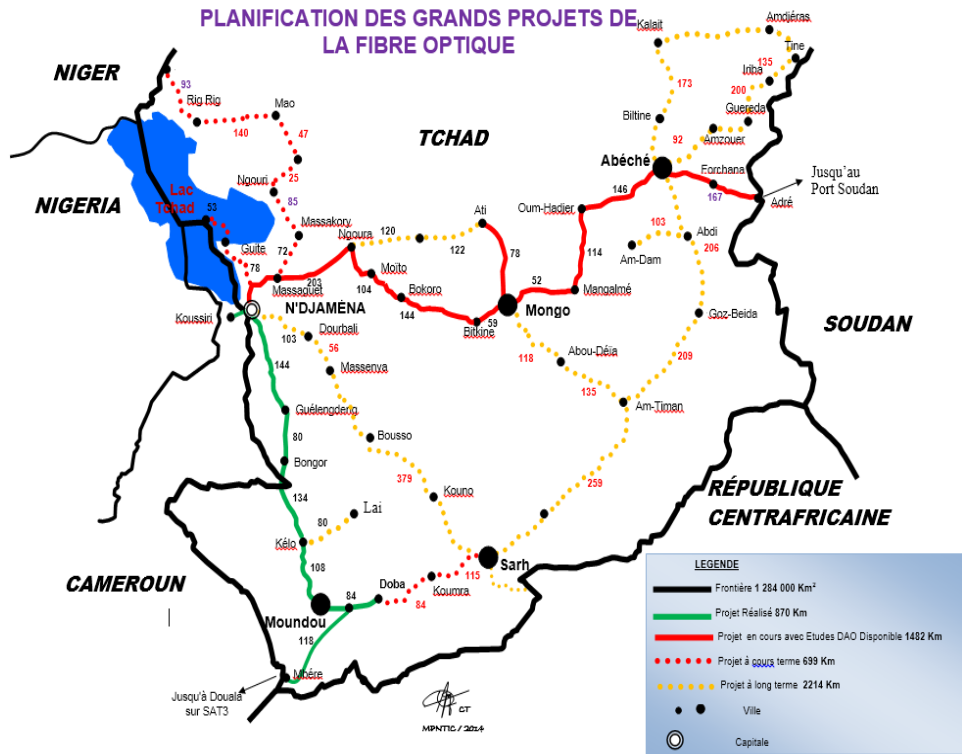


Figure II- 12: Carte des réseaux longue distance du Tchad.

II.3.2 Description du projet

Le projet de 1 482km est réparti sur 11 villes comme le montre la Figure II- 13.

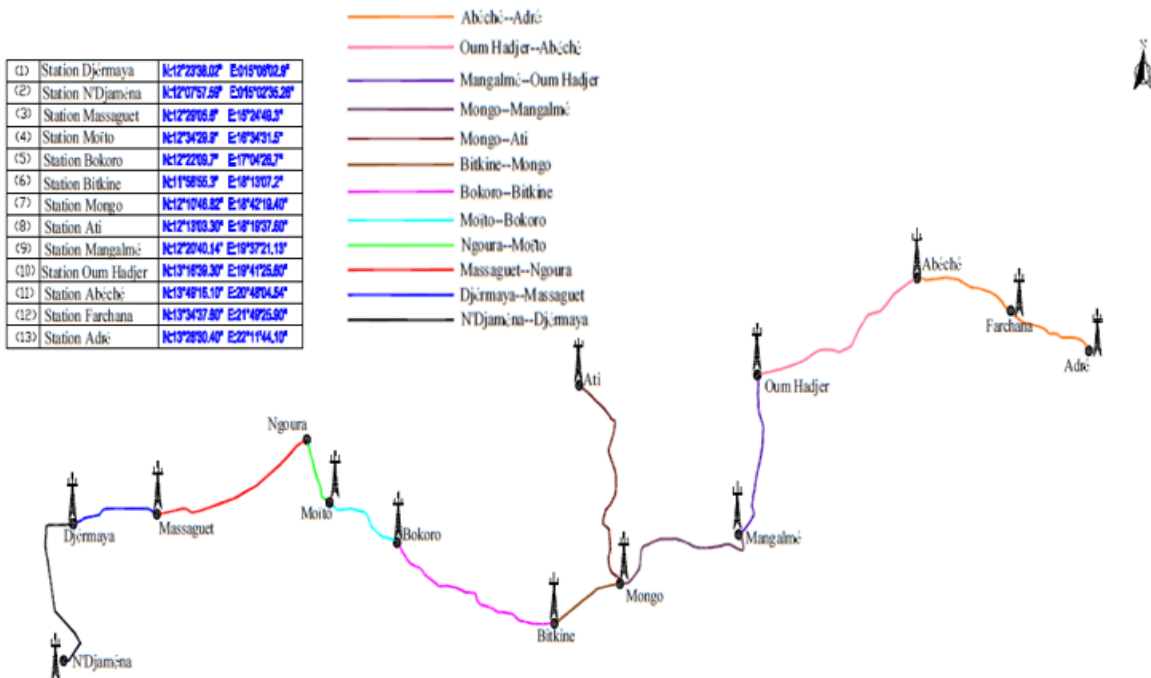


Figure II- 13: Long haul N'djaména-Adré du Tchad.

II.3.2.1 Les principes généraux du tracé du câble à fibres optiques

Pour un projet de fibre optique longue distance et du haut débit, le choix du tracé du câble optique est très important, il affecte de manière directe le coût de la mise en œuvre. Aussi les principes suivants [27] [28][29] sont à adopter.

- Tout d'abord, le tracé doit garantir la qualité des transmissions, la sécurité de la ligne du câble, sa fiabilité, son caractère économique et adapté, tout en étant facile à installer et à entretenir ;
- La longueur de l'artère sera la plus courte. Le niveau de difficulté de la construction sera moindre. Le coût de l'installation sera le plus bas et la ligne en câble optique sera d'un entretien facile ;
- Le tracé du câble optique suivra celui de la route principale, en se tenant, dans la mesure du possible, à l'écart des autres infrastructures existantes. Le tracé se fera également le plus éloigné possible des lignes haute-tension ;
- Si le câble optique traverse des rivières, un pont ou une zone fluviale à faible débit, il ne faudra pas ancrer le câble mais privilégier un emplacement sûr ;
- Lorsque le câble optique traversera des rivières souterraines, il faudra utiliser un tuyau HDPE de 33/40mm. Si nécessaire, ce tuyau pourra être protégé par une enveloppe en béton ;
- Le tracé de câble optique ne traverse généralement pas les villes et villages qui ne sont pas concernés par le projet de canal de communication. Il sera éloigné autant que possible des bâtiments et établissements architecturaux au sol, des lignes électriques, et des infrastructures souterraines (canalisations d'eau, conduites de gaz, câbles électriques, etc.). Si le tracé doit passer par ces câbles ou ces conduites, la distance entre les deux éléments doit être respectée et les mesures de protection nécessaires devront être prises ;
- Le tracé du câble optique sera éloigné des lieux où il serait facilement affecté par l'électricité haute tension, la foudre, des dommages mécaniques, l'érosion chimique et l'attaque par des termites. Si cela n'est pas possible, les mesures de protection idoines doivent être prises afin d'assurer la sécurité de la ligne de câbles.

Pour ce projet, il a été préconisé d'utiliser des câbles de structure libre tubée, tubes remplis de vaseline, tubes et tiges de remplissage entourant une âme centrale de renforcement non métallique FRP (Fiber-glass Reinforced Plastic), composé rempli dans les ouvertures du fil conducteur, manchon protecteur intérieur en PE, manchon protecteur extérieur en HDPE et renforcé par un ruban de verre [27]. Le détail des câbles et fibres préconisés pour ce lien métropolitain sont reportés en annexe 1.

II.3.2.2 Technique de transmission utilisée

Cette section présente de façon plus détaillée les modalités de conception de la solution réseau proposée. Elle concerne la solution *optical transport network* (OTN). Dans un projet *dense wavelength division multiplexing* (DWDM), la distance de transmission est généralement limitée par l'atténuation, le ratio OSNR (Optical Signal-Noise Ratio) et la dispersion. Raison pour laquelle la configuration du réseau en dix stations OTM et optical add drop multiplexer (OADM) et six stations optical liner amplifier (OLA) a été adoptée.

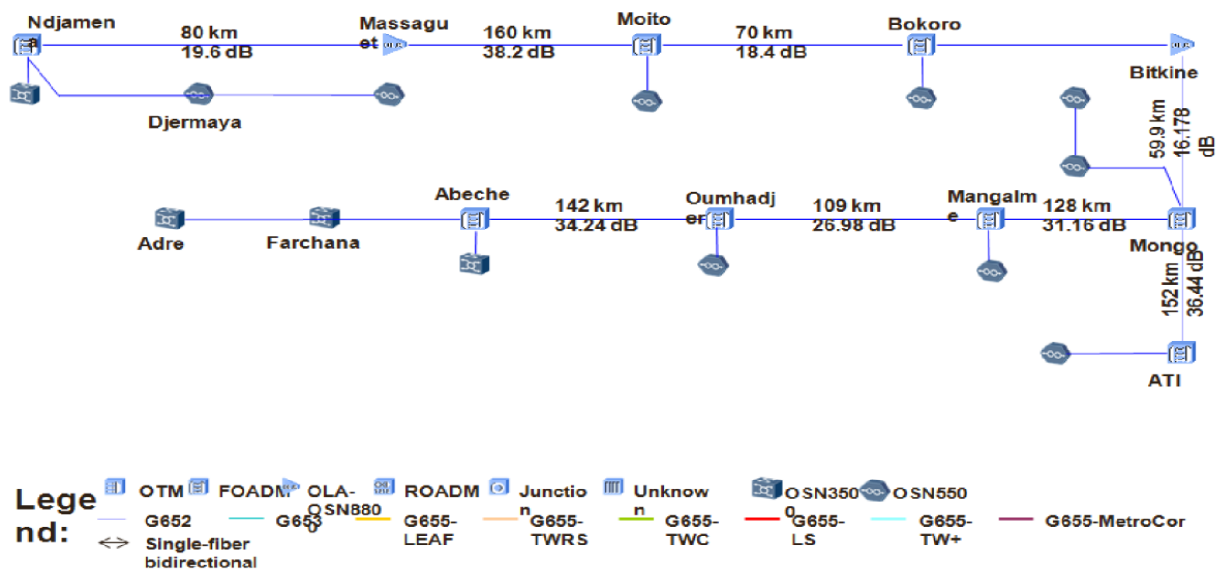


Figure II- 14 : Solution réseau OTN

La solution réseau OTN permet d'envoyer les signaux des 12 autres stations vers la station N'Djamena, les douze longueurs d'ondes sont intégralement utilisées dans le réseau [27][28].

II.4 Technologies Radio terrestres et spatiales

II.4.1 Présentation des différentes technologies sans fil

Dans cette partie nous nous appesantirons sur l'architecture et le fonctionnement des technologies d'accès radio en nous axant précisément sur leur apport à l'Accès Universel. En effet, les réseaux radio ou sans fil visent à la longue à remplacer les réseaux d'accès filaire, ils sont classés en quatre catégories suivant leurs portées et leurs débits. Dans un premier temps nous rappelons dans le Tableau II- 1 les différentes technologies de transmission sans fil en spécifiant leurs caractéristiques.

Tableau II- 1 : Caractéristiques techniques des technologies sans fil [30]

| Nom Commercial | Type | Standard | Débit Max | Portée | Bande de Fréquence |
|---------------------|------------|----------------|-------------------|-------------|--|
| UWB | WPAN | IEEE 802.15.3a | 110-480Mb/s | 10m | 3,1, 10,6 GHz |
| Bluetooth | | IEEE 802.15.1 | 1Mb/s | 100m | 2.4GHz |
| ZigBee | | IEEE 802.15.4 | 250 Kb/S | | |
| WiFi | WLAN | IEEE 802.11a | 54 Mb/s | 100m | 5GHz |
| WiFi | | IEEE 802.11b/g | 11 Mb/- 54Mb/S | | |
| WiMAX | WMAN fixe | IEEE 802.16d | 74 Mb/S | 4 à 10Km | Moins de 11GHZ |
| WiMAX | WMAN Mobil | IEEE 802.16e | 30 Mb/s | 1 à 5Km | 2 à 6GHz |
| EDGE/GPRS | WWAN | 2.5G | 384 Kb/s | 1 à 15km | 1.900 MHz |
| CMDA200/1xE V-DO | | 3G | 2.4 Mb/s | | 400, 800, 900, 1.700, 1800,1.900, 2.100 MHz |
| UMTS/WCDMA | | | 2 Mb/S | | 1800, 1.900,2.100 MHz |

II.4.1.1 WiFi et WiMAX

Le WiFi appartient à la norme IEEE 802.11 qui est un réseau classé comme WLAN avec une portée de 100-500m. Plusieurs sous normes ont été créés pour répondre à un certain nombre d'exigences liées à l'interopérabilité et à la sécurité. Les deux normes IEEE 802.11b et IEEE 802.11g fonctionnant sur la bande 2.4GHZ sont les plus déployées au monde, cependant la nouvelle norme IEEE 802.11n opérant dans la bande 2,4-5GHz est tout aussi utilisée [32].

En tenant compte de l'interopérabilité de ses équipements et les facilités technico-financières de son déploiement, le WiFi peut être classé comme technologie de choix dans le cadre de la mise en œuvre de l'Accès Universel aussi bien dans les milieux urbains que ruraux compte tenu des services (Internet, VoIP) et débits offerts. Le WiFi facilite les organisations décentralisées tout en leur offrant une souplesse. Il est à noter que les fréquences WiFi sont exemptées de toutes taxes, ce qui facilite l'émergence de cette technologie malgré sa portée limitée. Elle est plus adaptée en tant que technologie de distribution [33][34].

Vu les limites de normes IEEE 802.11b et IEEE 802.11g pour de déploiement longue portée, les standards WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) avec pour normes IEEE 802.16d et IEEE 802.16E ont été créés pour pallier les problèmes des réseaux de distribution. Ces normes opèrent dans les bandes de fréquences de 2 à 6GHz et de 11GHz. Elles sont classées comme réseau WMAN ayant une portée de plusieurs kilomètres.

Les normes IEEE 802.16d et IEEE 802.16E proposent des accès fixes et mobiles fiables, tout en facilitant des économies grâce à leur simplicité de déploiement et aux coûts faibles d'exploitation qu'elles nécessitent. Aussi, elles permettent d'obtenir des débits élevés aussi bien dans les zones urbaines que rurales ou isolées. Ainsi, le WiMAX peut offrir des débits allant jusqu'à 40Mbps et une portée de 8km pour les réseaux fixes, et des débits de 15Mbps avec une portée de 3km pour les réseaux mobiles. Le WiMAX, vu sa mobilité et sa capacité à fournir des services triple play, peut donc fortement servir comme application de proximité dans les zones urbaines et comme technologie potentielle pour la mise en œuvre de l'Accès et Service Universel [35].

II.4.1.2 Les réseaux mobiles

Nous considérons ici les technologies mobiles cellulaires WWAN qui opèrent dans la bande 400-2100MHZ, suivant les standards CDMA (Code Division Multiple Access), le GSM (Global System for Mobile communication), le GPRS (General Packet Radio Service) ou l'UMTS (Universal Mobile Telecommunications System). Ces technologies sont orientées couverture et facilitent l'accès à l'internet via leurs infrastructures d'accès.

CDMA

En général, la norme CDMA et le CDMA 450EVDO en particulier constituent une technologie de choix pour l'Accès Universel de par son débit offert, son efficacité spectrale et sa fréquence basse [35][36].

En effet, cette basse fréquence permet de recouvrir de vastes superficies et assure une bonne pénétrabilité des bâtiments tout en offrant des services haut débit. Son déploiement ne nécessite pas de grands investissements au niveau des OPEX (Operating Expenditure). De plus, les terminaux utilisateurs sont des téléphones fixes ou mobiles sans fil, modems de bureau, modules machine-to-machine de faibles coûts du fait que ces derniers n'ont pas besoin de puissances élevées d'émission pour communiquer avec les antennes du réseau [37][38].

UMTS (Universal Mobile Telecommunications System)

Standard UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) est une technologie de la famille des IMT2000 (International Mobile Telecommunications for the year 2000) qui définit les principes des réseaux de troisième génération. Dans cette section nous allons présenter cette technologie qui a permis d'augmenter les débits de données mobiles tout en justifiant les paramètres qui pourraient faire opter pour cette dernière dans le cadre de l'Accès Universel. De plus, cette technologie répond au problème croissant de saturation des réseaux GSM, notamment dans les grandes villes.

Les technologies développées autour de la norme UMTS conduisent à une amélioration significative des vitesses de transmission pouvant atteindre 2 Mbit/s [39]. De tels débits sont significativement supérieurs à ceux permis par les réseaux GSM (9,6 kbit/s) ou par le GPRS.

Cette amélioration des débits est rendue possible par l'évolution des technologies radio qui autorise une meilleure efficacité spectrale et l'exploitation de bandes de spectre de fréquence supérieure à celles utilisées par la technologie GSM.

En effet, l'UMTS exploite les zones du spectre de 1920-1980 MHz et de 2110-2170 MHz en utilisant la technique de multiplexage basée sur la répartition de codes [39]. Sans faire de redondance, chaque utilisateur est différencié du reste des utilisateurs par un code N qui lui a été alloué au début de sa communication. Ce code est orthogonal au reste des codes liés à d'autres utilisateurs. Ainsi pour écouter l'utilisateur, le récepteur multiplie le signal reçu par le code N associé à cet utilisateur.

En somme, l'UMTS constitue une technologie de choix pour l'Accès Universel dans les zones urbaines et péri-urbaines, le concept d'Accès Universel impliquant un rendu notable en termes de débit chez une certaine tranche de la population. Certes son déploiement est coûteux et complexe mais, compte tenu de la demande et de la proportion de la population qui le sollicite, les coûts de déploiement et d'exploitation sont vite amortis. Cependant les opérateurs d'Accès Universel du monde ne peuvent s'octroyer une licence UMTS du fait du coût élevé et des

contraintes réglementaires qui ne sont pas encore réunies pour l'obtention d'une telle licence. A la limite, cette technologie pourrait être étendue aux zones rurales pour des structures comme les Organisations Non Gouvernementale (ONG), des services publics, des grandes entreprises en échange d'une diminution des droits de licence.

La LTE 4G (Long Term Evolution 4G)

La technologie LTE est une technologie de 4^{ème} génération qui découle du projet mené par 3GPP et qui permet d'atteindre de très hauts débits à de longues distances. Elle est donc une technologie de choix pour favoriser le concept de l'Accès Universel. En effet, les débits offerts sont de l'ordre de 100Mbit/s en descendant et de 50Mbit/s en ascendant. Il est à mentionner que cette technologie nécessite un nouveau type d'accès radio, un nouveau cœur de réseau appelé EPC (Evolved Packet Core) mais aussi de nouveaux terminaux mobiles.

La LTE fonctionne sur le tout IP (Internet Protocol), les techniques de transmission et d'accès de cette technologie permettent d'atteindre des débits très élevés tout en garantissant une fiabilité du système. Elle utilise plusieurs bandes de fréquence ce qui fait qu'elle est adaptable suivant la zone à couvrir et les exigences des utilisateurs d'un milieu donné [38][39][40]. Le déploiement de cette technologie est plus rapide et moins complexe que celui de l'UMTS. Le réseau mobile LTE pourrait donc être une solution pour desservir les zones urbaines et péri-urbaines à faibles revenus en haut débit pour des applications multimédias. Cependant, le coût élevé de sa licence est à prendre en compte dans les CAPEX de déploiement de solutions orientées Accès Universel.

II.4.1.3 Technologie d'accès VSAT

VSAT (Very Small Aperture Terminal) qui veut dire terminal à très petite ouverture désigne une technique de communication par satellite bidirectionnelle qui utilise des antennes paraboliques. Dans cette section nous allons présenter l'architecture et le fonctionnement des VSAT. Son architecture est basée sur le principe d'un site principal (le HUB), d'une multitude de points distants (les stations VSAT) et d'un satellite (Figure II- 15) [73].

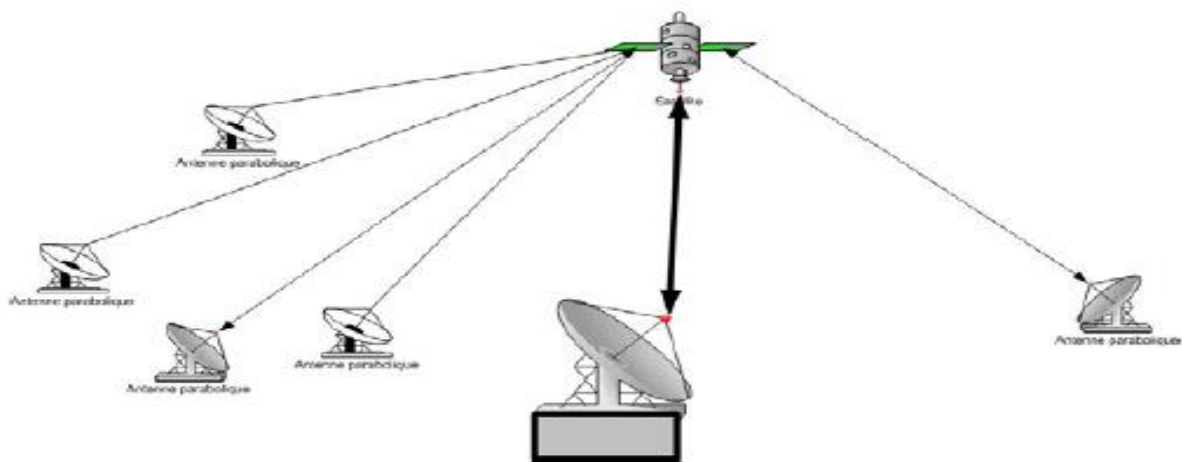


Figure II- 15: Schéma d'Architecture réseau VSAT [73]

La technologie VSAT, de par sa configuration satellitaire, permet de fournir des services voix et données à des débits acceptables aux populations des zones reculées et/ou isolées. Cependant, compte tenu des coûts élevés d'exploitation liés à la location du segment spatial et ses limites en transmission, cette technologie serait plus utile pour relier des sites isolés par des contraintes géographiques dans le but de contribuer au développement de l'Accès et Service Universel.

II.4.2 Etude comparative des technologies radio

Le tableau suivant présente une comparaison entre les différentes technologies d'accès répertoriées dans le chapitre précédent. L'étude comparative ci-dessous est faite selon les critères suivants : le type de service, le débit maximum offert, la bande de fréquence, le coût des équipements, la portée de couverture. Aussi les caractéristiques de déploiement (géographie adaptée) et les contraintes économiques (Capex et Opex) des différentes technologies sont considérées comme des critères permettant de faire un choix judicieux. Pour terminer sur cette partie nous avons souhaité reporter et comparer dans le Tableau II- 2 les techniques précédemment décrites en termes de performances mais également de coût d'implantation et exploitation et les lieux où elles sont les plus adéquates.

Tableau II- 2 : Comparaisons des technologies radio

| Technologies | CDMA 450 | UMTS | LTE | WIFI | WIMAX Mobile |
|----------------------------|---|---|--|---|-----------------------------------|
| Services | Voix, données, internet | Voix, données, internet | VoIP, données, internet | VoIP, données, Internet | VoIP, données, Internet |
| Coût des terminaux (USD) | Feature phone : 12 Phone data:50 | Phone : 50 | Phone : 150 | Laptop : 250 Phone : 50 | Phone : 50 Laptop : 250 |
| Débit Utilisateur (Mbit/s) | CDMA1x :153.6Kbit/s (UL et DL) 1xEV-DO release A : 3.1 (DL) 1.8 (UL) 1xEV-DO release 0 : 2.4 (DL) 15.3 (UL) | HSDPA:14.4 (DL) 3.84 Kbit/s(UL) HSUPA:14.4 (DL) 5.76(UL) HSPA+:28(DL) 11.5 (UL) | SISO:100(DL) 50 (UL) 2x2MIMO:172.8(DL) 57.6(UL) 4x4MIMO:326.4(DL) 86.4(UL) | 802.11b:11 802.11a/g :54 802.11n:>100 | 15 pour une canalisation de 5 MHz |
| Portée (km) | 50 | 5-8 (terrain accidenté) 50-70 (terrain plat) | 3-5 (milieu urbain) 8-11 (milieu rural) | 0.25 soit 250 m (outdoor) | 2-5 |
| Fréquences Utilisées (MHz) | 410-490 | 1920-1980 2110-2170 | 700,850, IMT 2500, GSM900,UMTS 1900/2100,GSM 1800,PCS 1900 | 2400, 5000 | |
| Zones Adaptées | Rurale | Dense, Urbaine, Péri-urbaine et rurale selon l'utilisation | Dense, Urbaine | Urbaine, péri-urbaine et rurale | Urbaine,péri-urbaine,rurale |
| Géographie | Terrain accidenté, terrain plat | Terrain accidenté, terrain plat | Terrain accidenté, terrain plat | Terrain accidenté, terrain plat | Terrain accidenté, terrain plat |
| Complexité de déploiement | Simple | Complexe | Simple | Simple | Simple |
| CAPEX | Modéré | Modéré | Modéré | Faible | Modérément élevé |
| OPEX | Modéré | Elevé | Modéré | Faible | Faible |
| Tout-IP | Non | Non | Oui | Oui | Oui |

Conclusion

Ce chapitre a permis de décrire les généralités sur les réseaux à large bande et leur évolution. Ces réseaux large bande décrits sont issus des technologies à base de fibre et radio (terrestre ou spatiale). Nous avons abordé de manière synthétisée l'étude d'une structure générale d'une liaison à fibre optique tout en commençant par la description d'un système optique classique.

Le système optique étudié est une architecture d'une liaison comprenant un émetteur optique composé principalement des éléments optoélectroniques chargés de convertir le signal sous forme de lumière, un système de transmission optique permettant de véhiculer les informations et enfin un module de réception composé d'une photodiode, des amplificateurs, des filtres et des circuits de décision et de récupération d'horloge. Nous avons présenté une liaison métropolitaine en cours de déploiement au Tchad qui contribue à l'Accès et Service universel.

Les technologies radio terrestres et spatiales décrites dans ce chapitre sont les quatre catégories répertoriées suivant leurs portées et leurs débits. Elles sont de type WPAN, WLAN, WMAN ou WWAN classifiées suivant les standards IEEE respectifs. Les caractéristiques techniques de ces technologies sans fil sont analysées de manière synthétique afin de mesurer les facilités qu'offre chacune des technologies dans la mise en œuvre de l'Accès et Service universel. Aussi, l'étude comparative des technologies radio faite dans ce chapitre permet de faire un choix optimal des technologies à déployer dans une zone selon les "*inputs*" des localités considérées.

CHAPITRE 3 : Modélisation de l'Indice d'Accès Universel

Introduction

Les communications électroniques et particulièrement les technologies de l'information et de la communication (TICs) sont les vecteurs de l'évolution de l'économie mondiale. En Afrique, la mise en œuvre partielle des infrastructures de transmission large bande a favorisé l'évolution des TICs dans les ménages, toutefois cette évolution fulgurante a concerné particulièrement les services liés à la téléphonie mobile dans les zones urbaines.

Dans la majorité des pays, il est important de relever que cette ascension technologique n'est pas observée de manière équilibrée entre les différents types de localités (urbaines et rurales). Pour pallier l'isolement technologique des localités rurales d'Afrique et aider à un développement raisonné et efficace, une approche globale d'évaluation et d'optimisation de l'indice d'Accès au Service Universel dans un pays, dénommé *UAI* (Universal Access Index), est proposée dans ce chapitre.

Notre démarche d'optimisation proposée se base sur le Fonds de Service Universel (FSU) pour corriger l'*UAI* des localités tout en prenant en compte les contraintes technico-économiques intrinsèques à chacune d'entre elles.

En effet, dans ce chapitre nous ferons un rappel du contexte de l'étude qui a permis de mettre en œuvre l'*UAI*. En deuxième section de ce chapitre une démarche théorique de modélisation de l'approche est décrite. Dans le but de prendre en compte la définition actualisée de l'Union Internationale des Télécommunications (UIT) sur l'Accès Universel, nous avons intégré dans l'approche de modélisation deux indicateurs significatifs représentant les services voix et données.

La problématique de la mise œuvre de cette approche a été analysée par un cas d'étude dans la dernière section de ce chapitre.

III.1 Contexte

La fracture numérique, qui a été au cœur des préoccupations du Sommet Mondial sur la Société de l'Information (SMSI) organisé en 2003 à Genève [42] et en 2005 à Tunis [43], divise certes les pays du nord et ceux du sud. Mais il ne faut pas oublier qu'elle se décline également à l'intérieur de chaque pays, surtout en Afrique, créant ainsi deux types de citoyens, ceux qui bénéficient des opportunités offertes par les technologies de l'information et de la communication (TICs) et ceux qui en sont exclus compte tenu de leur situation géographique, économique, sociale, etc.

Dans la plupart des pays africains, les progrès enregistrés en matière d'accès et d'utilisation des TIC ont pour l'essentiel été enregistrés dans les zones urbaines. Par exemple, au Tchad, compte tenu des politiques de décentralisation mises en œuvre, depuis plusieurs années, et dans la perspective d'un aménagement du territoire visant un développement équilibré de l'ensemble des régions, il est essentiel de porter une attention particulière aux zones rurales qui cumulent plusieurs handicaps (enclavement, absence d'électrification, faiblesse du pouvoir d'achat, etc.). La nécessité de s'intéresser à ces zones répond à l'exigence démocratique qui fait obligation à l'État de mettre en œuvre des politiques permettant d'offrir à tous les citoyens les mêmes opportunités de développement au nom de l'égalité des chances reconnue par les textes fondamentaux et au-delà par la Déclaration universelle des Droits de l'Homme.

Ainsi, la mise à disposition des populations de services TICs diversifiés et adaptés aux contextes spécifiques des pays et des sous-régions est devenue une nécessité.

Il est aujourd'hui indéniable que l'atteinte du développement d'infrastructures de télécommunications ne sera atteinte sans une autoroute de transmission moderne, fiable, sécurisée et accessible à toutes les couches sociales y compris les communautés rurales.

Au regard de l'offre actuelle d'équipements en télécommunications, le service et l'accès universel sont devenus des fondements des politiques publiques en Afrique. Orienté au départ sur le service téléphonique fixe, le service universel devrait suivre l'évolution des progrès technologiques, les essors du marché et l'évolution des besoins des utilisateurs. Ainsi, les deux domaines visés en priorité sont l'accès à Internet et les communications mobiles.

De manière générale, le concept de Service et d'Accès Universel peut être défini comme étant un développement harmonieux et équilibré des technologies permettant la vulgarisation et l'appropriation des TICs par la population. Spécifiquement, pour un pays ou une zone, la quantification de ce concept (Figure III- 1) passe par la détermination de [44] :

- la liste et la couverture des réseaux nationaux et liaisons transfrontalières existantes ;
- l'analyse des indicateurs TICs des localités et des pays concernés ;
- l'état des lieux sur les projets d'infrastructures large bande en cours ;
- l'état des lieux des politiques d'harmonisation du marché des TICs ;
- l'identification des problématiques techniques, sociétales, géographiques et économiques ;
- la cartographie cible de développement de l'Accès Universel ;
- la déduction du modèle de solution orienté au développement de l'Accès universel.

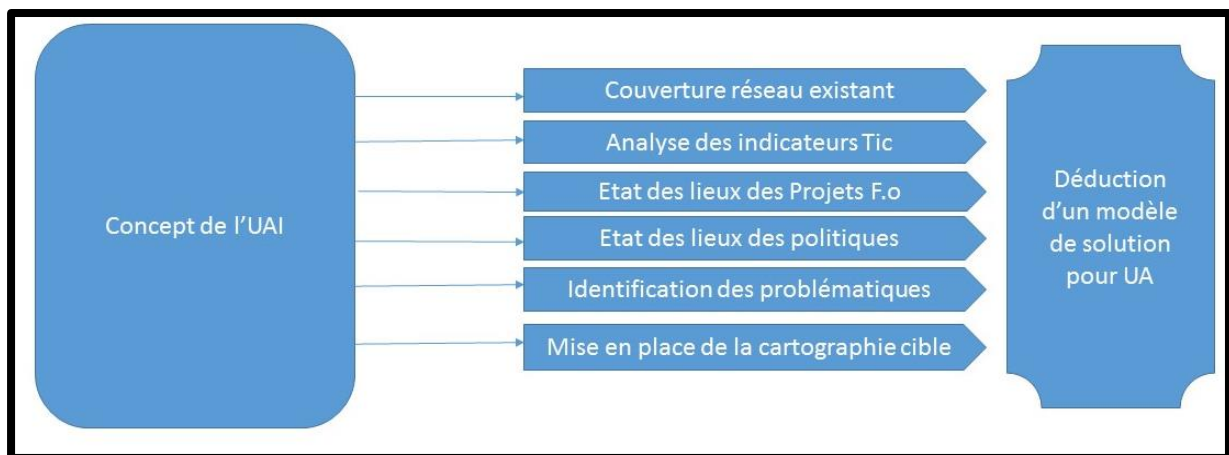


Figure III- 1: Concept de base de la mise en place de l'UAI

Dans ce chapitre, on se propose d'établir une métrique de quantification du concept de l'accès universel dénommée *UAI* (Universal Access Indicator). L'approche présentée devrait permettre de classer les différentes zones ou pays. En outre, elle propose un modèle permettant d'optimiser l'*UAI*, en tenant compte des différentes contraintes spécifiques de chaque localité. Cette approche présente aussi l'avantage de tenir compte de la nouvelle dimension de l'accès universel qui est étroitement liée aux solutions larges bandes, pour une meilleure vulgarisation non seulement de la voix mais aussi des services de données.

Pour y parvenir, nous avons abordé dans un premier temps la démarche théorique de modélisation, suivi de la présentation d'une étude de cas permettant de montrer la faisabilité de l'approche de modélisation. Enfin, une conclusion dégage les perspectives.

III.2 Démarche théorique de modélisation

Evaluer l'indice d'accès au Service Universel (*UAI*) est une tâche complexe depuis que l'accès à l'information par les TICs est devenu une activité très importante pour les sociétés humaines.

Suivant le concept décrit dans la Figure III- 1, l'Indice d'Accès Universel d'une zone donnée est un indicateur exprimant le rapport du nombre de localités disposant d'un accès individuel et/ou communautaire sur le nombre de localités totales de la zone. Suivant un modèle de découpage défini, une localité est un élément de la décomposition de la zone considérée suivant un rayon donné. Ce rayon dépend de la nature de la localité (rurale, péri-urbaine et urbaine). L'indice global d'une zone est quantifié suivant les services voix, données ou autres, il est l'agrégat des cas individuel et/ou collectif. Améliorer l'*UAI* d'une localité, consiste à subventionner le déploiement des infrastructures permettant d'offrir plus de services. Pour cette raison, il est important de tenir compte des paramètres comme l'Average Revenu Per User (l'*ARPU*), le nombre d'utilisateurs potentiels de services TICs et les contraintes technico-économiques propres à celle-ci.

Aussi, l'Alliance pour l'internet abordable et l'Union Internationale des Télécommunications ont publié des rapports mettant en évidence l'importance du Service et de l'Accès Universel à travers le monde [46][47][48][49]. L'Accès Universel est une préoccupation mondiale soulevée par les différents acteurs il y a plus de dix ans. Les moyens de communications proposés par les opérateurs de télécommunications sont devenus une nécessité pour tous quels que soient sa localité et son pouvoir d'achat. L'ambition majeure des opérateurs étant de faire du bénéfice, les localités rurales ou à faible pouvoir d'achat sont marginalisées dans le déploiement des infrastructures appropriées au service universel. Le fonds d'Accès Universel a été introduit par les Etats pour subventionner les efforts des opérateurs à déployer des solutions dans les zones à faible rentabilité de manière à les viabiliser. Ceci permet de réduire le gap d'accès aux TICs dans la zone ou le pays considéré [50][51]. Le passage au numérique des réseaux de télécommunications ont favorisé l'émergence de plusieurs services téléphoniques ayant un impact incontestable sur le développement des pays. Ce passage de l'analogique au numérique a permis aux opérateurs de diversifier leurs services tout en mettant en place des offres attractives pour les utilisateurs. Cette révolution numérique a conduit l'UIT à proposer un indicateur permettant de mesurer le niveau de développement numérique des TIC dénommé *DAI* [9]. Il est élaboré sur la base de huit variables couvrant les cinq domaines que sont les infrastructures, les finances, l'éducation, la qualité de service et l'internet. Il est l'objet de publications annuelles dans les bases de données de l'UIT.

Brièvement, l'indice d'accès numérique (*DAI*) évalue, dans un pays, la possibilité générale qui serait donnée aux particuliers d'avoir accès aux technologies de l'information et de la communication et de les utiliser. Il se compose de huit variables répartis en cinq catégories.

Chaque variable est converti en sous-indicateur dont la valeur se limite entre zéro et un. Un coefficient pondérateur est affecté à chaque catégorie. L'on divise chaque variable par la valeur maximale théorique. Ainsi on établit une moyenne des valeurs obtenues pour avoir la valeur finale de l'indice *DAI*. Cette notion de *DAI* est différente de la nouvelle métrique proposée dans cette thèse qui est l'*UAI* avec pour objectif de proposer un indicateur permettant de quantifier l'Accès Universel et de la relever si nécessaire par des fonctions correctives.

Il est orienté vers l'évaluation spécifique de l'Accès et du Service Universel d'une zone et à la détermination d'une fonction corrective si nécessaire, permettant à la population délaissée d'avoir la chance d'accéder aux services minimum requis dans le cadre du service universel. Le degré de correction de l'*UAI* dépendra sans doute du fonds orienté au développement du service universel, du pouvoir d'achat des populations concernées et du taux d'électrification. En d'autres termes il s'agit de l'Average Revenu Per User (l'ARPU), le nombre d'utilisateurs de services TICs, la subvention liée au développement du Service Universel (SU) et les contraintes technico-économiques.

Les efforts en matière d'Accès Universel bien que largement discutés avec l'introduction du fonds d'accès au Service Universel dénommé *USAF*, pour Universal Service Access Funds, dont les rapports sont annuellement publiés [46][51] par l'Alliance for Abordable Internet ne sont toujours pas mis en valeur de manière globalement quantifiable [24]. L'importance de l'*USAF* et son impact sur la réduction du gap d'accès est indéniable. Toutefois, les actions correctives réalisées dans les différents pays sont difficilement appréciables, C'est ce qui justifie la première contribution de ces recherches qui introduit un nouvel indicateur et la seconde, une fonction corrective permettant d'améliorer ce dernier au besoin.

A cet effet, on se propose dans un premier temps d'établir une métrique de quantification de l'Accès Universel : l'*UAI*. L'approche présentée devrait permettre de classer les différentes zones ou pays. En outre, elle propose un modèle permettant d'optimiser l'*UAI*, en tenant compte des différentes contraintes spécifiques de chaque localité. Cette approche présente aussi l'avantage de tenir compte de la nouvelle dimension de l'Accès Universel qui est étroitement lié aux solutions larges bandes, pour une meilleure vulgarisation non seulement de la voix mais aussi des services de données

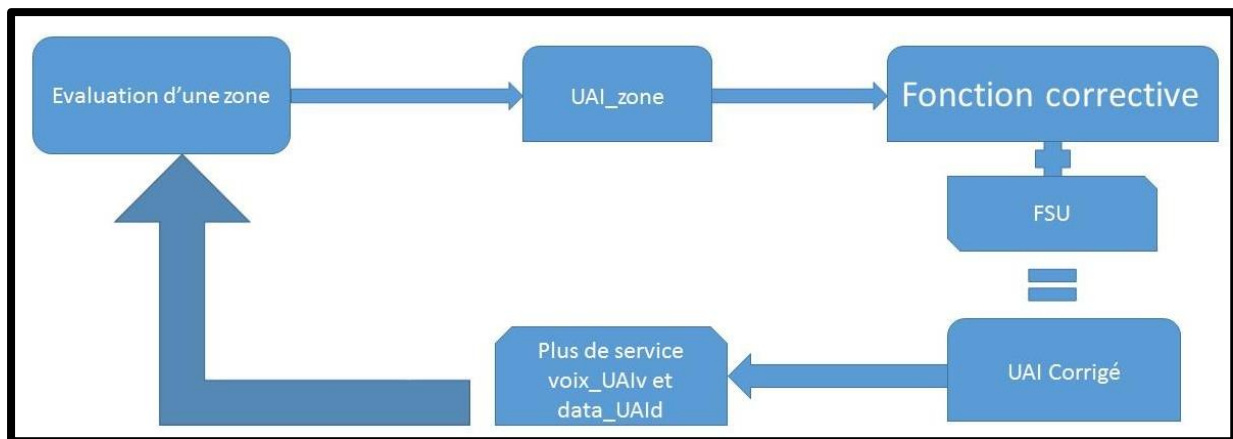


Figure III- 2: Démarche de modélisation

De l'analyse des indicateurs utilisés couramment, il ressort qu'il serait plus approprié, dans la détermination de l'indicateur, d'intégrer les principes du fonds de solidarité universel (FSU), c'est ainsi qu'on propose de considérer une correction sur l'UAI. Pour ce faire, on propose une démarche de modélisation en deux étapes comme le montre la Figure III- 2 :

- l'évaluation de Service Universel l'Accès et du Service Universel ;
- la détermination d'une fonction corrective $f(X)$ permettant de rechercher une solution optimale.

Dans cette démarche de modélisation en deux étapes, plusieurs paramètres interviennent à savoir le FSU, lors de la phase d'identification de la fonction corrective et les nombres d'abonnés individuels et de communautés disposant d'un centre de communication électronique publique lors de la phase corrective.

III.2.1 L'évaluation de l'Accès et du Service Universel

La méthodologie d'évaluation préconisée est de mettre en place une approche mathématique permettant d'apprécier le niveau de développement d'une zone donnée.

Cette approche a pour objectif de déterminer si le développement de l'Accès et Service Universel est satisfaisant ou non. Il s'agit donc d'évaluer de manière objective l'indice d'Accès Universel (UAI).

Considérant la définition actualisée du Service Universel (SU) par l'UIT [20], on peut définir l'Accès Universel (AU) comme étant l'opportunité pour chaque membre d'une communauté de pouvoir accéder à un centre de communication électronique publique sans pour autant disposer nécessairement d'un terminal d'accès à domicile.

L'indice global d'Accès Universel (UAI) d'un pays permet d'apprécier le niveau d'atteinte des objectifs de l'accès et du service universel. Et au regard des tendances actuelles, on peut distinguer deux services principaux que sont le service voix et le service données. Subséquemment, l'indice UAI global d'un pays ou d'une zone, variant entre 0 et 1, est donné par l'expression suivante :

$$UAI = \frac{(UAI_v + UAI_d)}{2} \quad (3.1)$$

avec UAI_v , représentant l'indice d'Accès Universel du service voix et UAI_d l'indice d'Accès Universel du service données.

L' UAI lié à un service dépendra des paramètres comme le nombre d'abonnés individuels, le nombre d'abonnés communautaires et les taux de couverture des réseaux de la zone évaluée. En considérant, pour une localité l , les cas des abonnés individuels et ceux de la communauté disposant ou non d'un centre de communication électronique dans un rayon de 2km, on définit alors les indices d'Accès Universel pour les services voix UAI_{v_l} et donnée UAI_{d_l} relativement à une localité l par l'expression ci-après :

$$\begin{cases} UAI_{v_l} = (\alpha_{v_l} \times spp_{v_l} + \beta_{v_l} \times spc_{v_l}) \\ UAI_{d_l} = (\alpha_{d_l} \times spp_{d_l} + \beta_{d_l} \times spc_{d_l}) \end{cases} \quad (3.2)$$

où :

- spp (subscription per person rate) est le nombre d'abonnés individuels ;
- spc (subscription per community rate) est le nombre de communautés disposant d'un centre de communication électronique publique ;
- les coefficients α_{v_l} , α_{d_l} , β_{v_l} et β_{d_l} dépendent des localités (urbaine, suburbaine et rurale en fonction de la présence des réseaux publics ou de centres de communication électroniques).

Une zone géographique doit nécessairement être répartie en localités, donc l'évaluer consiste avant tout à déterminer le degré de développement des services de ses localités.

Ainsi, l'ensemble des localités évaluées permettent de déduire le taux de couverture global du Service Universel d'un pays ou d'une zone à partir du taux de couverture global du service voix et le taux de couverture global du service données des localités. Ainsi les indices liés aux services s'expriment par l'expression ci-dessous :

$$\begin{cases} UAI_v = \frac{\sum l(UAI_{v_l} > T_{UAI_v})}{\sum l} \\ UAI_d = \frac{\sum l(UAI_{d_l} > T_{UAI_d})}{\sum l} \end{cases} \quad (3.3)$$

avec T_{UAI_d} et T_{UAI_v} représentant les seuils moyens acceptables de l'indice liés au service de voix et donnée, $\sum l$ représentant le nombre total de localités de la zone évaluée.

Par analogie avec l'appréciation des seuils de *DAI* de l'UIT [11] et en tenant compte de l'appréciation "*bonne*" on fixe le seuil T_{UAI_v} ou T_{UAI_d} comme suit :

$$\begin{cases} T_{UAI_v} = 0.5 \\ T_{UAI_d} = 0.5 \end{cases} \quad (3.4)$$

Après comparaison de l'indice de la localité au seuil, la valeur de l'*UAI* sera déterminée et classée. Ainsi, une localité sera dite *verte* dans l'évaluation de l'indice d'Accès Universel au regard d'un seuil fixé de l'*UAI* considéré T_{UAI_v} ou T_{UAI_d} :

$$\begin{cases} UAI_{v_l} > T_{UAI_v} \\ UAI_{d_l} > T_{UAI_d} \end{cases} \quad (3.5)$$

III.2.2 Modèle de solution et fonction correctrice

A travers l'évaluation d'une zone, nous allons élaborer un modèle permettant de corriger son *UAI* en tenant compte du fond de Service Universel (FSU) et des contraintes (techniques, économiques, géographiques, sociales, générales) du pays ou de la zone.

Le modèle de solution peut être exprimé de la manière suivante :

$$UAI + f(X) = 1 \quad (3.6)$$

avec $f(X)$ représentant la fonction correctrice permettant de rehausser le niveau de développement de la zone.

Il est toutefois important de noter que cette solution n'est pas exacte mais plutôt approximative de $X \rightarrow f^{-1}(1 - UAI)$. On désignera par S la solution optimale.

Après l'évaluation de la zone et détermination de l'indice concerné, deux approches peuvent être envisagées pour déterminer la fonction correctrice et proposer ainsi un modèle optimal :

- l'évaluation complète et fastidieuse ;
- le choix d'échantillons représentatifs.

Dans un premier temps, nous allons procéder à une approche statistique consistant à un choix d'échantillons représentatifs. Cette approche choisie est combinée avec une stratégie d'amélioration permettant de différencier les localités selon leurs natures, urbaine, semi-urbaine ou rurale, comme expliqué dans le Tableau III- 3.

En considérant les expressions (3.1) et (3.6), on peut écrire la fonction correctrice par l'expression suivante :

$$f(X) = 1 - \frac{UAI_v + UAI_d}{2} \quad (3.7)$$

En d'autres termes, en considérant l'expression de l' UAI_v et de l' UAI_d comme défini dans l'équation (3.3), on peut réécrire la fonction correctrice par :

$$f(X) = 1 - \frac{\sum_l (UAI_{v_l} > T_{UAI_v})}{2 \times \sum l} - \frac{\sum_l (UAI_{d_l} > T_{UAI_d})}{2 \times \sum l} \quad (3.8)$$

$$f(X) = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{\sum_l (UAI_{v_l} > T_{UAI_v})}{\sum l} \right] + \frac{1}{2} \left[1 - \frac{\sum_l (UAI_{d_l} > T_{UAI_d})}{\sum l} \right] \quad (3.9)$$

En considérant le principe que la borne inférieure plus la borne supérieure est égale à la valeur idéale de l'indice, alors nous avons :

$$\left[\frac{\sum_l (UAI_{s_l} > T_{UAI_s})}{\sum l} \right] + \left[\frac{\sum_l (UAI_{s_l} < T_{UAI_s})}{\sum l} \right] = 1 \quad (3.10)$$

avec s_l représentant le service TIC de la localité l .

Ainsi, en combinant, pour chaque type de service, les équations (3.9) et (3.10), on obtient l'expression suivante :

$$f(X) = \frac{1}{2} \left[\frac{\sum_l (UAI_{v_l} < T_{UAI_v})}{\sum l} \right] + \frac{1}{2} \left[\frac{\sum_l (UAI_{d_l} < T_{UAI_d})}{\sum l} \right] \quad (3.11)$$

En intégrant l'équation (3.2), on obtient :

$$f(X) = \frac{1}{2} \left[\frac{\sum_l (\alpha_{v_l} * spp_{v_l} + \beta_{v_l} * spc_{v_l}) < T_{UAI_v}}{\sum l} \right] + \frac{1}{2} \left[\frac{\sum_l (\alpha_{d_l} * spp_{d_l} + \beta_{d_l} * spc_{d_l}) < T_{UAI_d}}{\sum l} \right] \quad (3.12)$$

On peut exprimer ainsi $f(X)$ en fonction d'une autre fonction $g(X)$ de la manière suivante :

$$f(X) = \frac{1}{2 \sum l} [g(X)] \quad (3.13)$$

avec $g(X)$:

$$g(X) = \sum_l (\alpha_{v_l} \times spp_{v_l} + \beta_{v_l} \times spc_{v_l}) < T_{UAI_v}) \\ + \sum_l (\alpha_{d_l} \times spp_{d_l} + \beta_{d_l} \times spc_{d_l}) < T_{UAI_d}) \quad (3.14)$$

Au regard de l'équation (3.6), il s'agit de trouver la solution technique optimale permettant de corriger l' UAI de la zone en minimisant $f(X)$, ce qui équivaut aussi à minimiser $g(X)$ puisque le coefficient multiplicateur tel qu'exprimé dans l'équation (3.13) est positif.

En considérant, l'idéal de l'indice d'une localité l pour un service donné $UAI_{s_l} = 1$, c'est-à-dire que chaque personne ait sa souscription, ce qui réduirait la nécessité des souscriptions communautaires. Les nouvelles valeurs de α et β pour un service s donné sont :

$$\begin{cases} \alpha_{s_l} = 1 \\ \beta_{s_l} = 1 - spp_{s_l} \end{cases} \quad (3.15)$$

spp et spc sont inversement proportionnel, au fur et à mesure que le nombre d'abonnés individuel augmente dans une localité, celui des communautés doit nécessairement diminuer, cette approximation est possible dans le sens où la variation de spp impacte sur la pertinence de spc . Elle est d'autant plus vraie que si tout le monde dispose de sa propre souscription, l'utilité d'une souscription communautaire est moins pertinente. Cela se traduit par $spp = 1$, ce qui entraîne $\beta = 0$.

En intégrant les expressions (3.14) et (3.15), on peut écrire :

$$g(X) = \sum_l (spp_{v_l} + spc_{v_l} - spp_{v_l} \times spc_{v_l}) < T_{UAI_v}) + \sum_l (spp_{d_l} + spc_{d_l} - spp_{d_l} \times spc_{d_l}) < T_{UAI_d}) \quad (3.16)$$

Les valeurs de UAI_v et UAI_d dépendent des appréciations en termes de classification, cela fait ressortir le niveau de développement du service et de l'Accès Universel d'un pays.

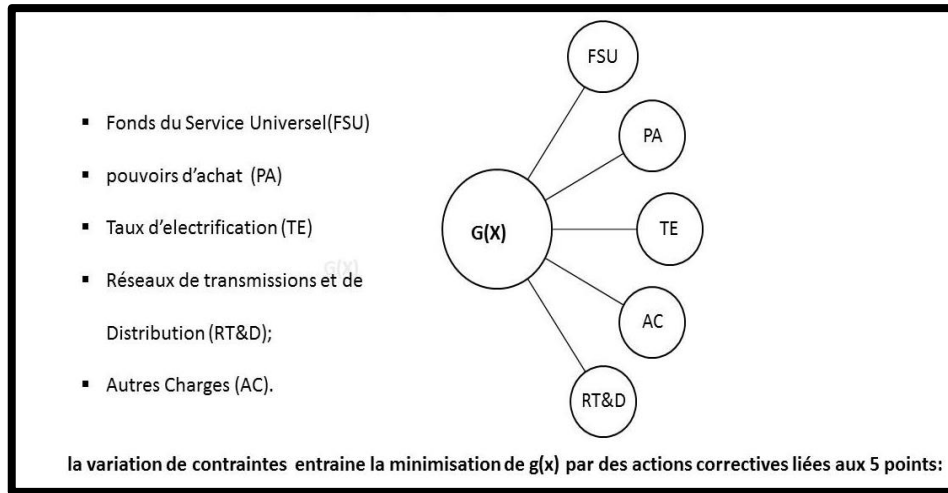


Figure III- 3 : Processus de minimisation de la fonction corrective $g(x)$

Conformément à la Figure III- 3, la minimisation de $g(X)$ liée à une localité ou zone donnée dépend de la variation des contraintes suivantes :

- les pouvoirs d'achat des populations (ceux pour acquérir une ligne individuelle et ceux pour une ligne communautaire) ;
- le taux d'électrification E de la zone en énergie conventionnelle, solaire, biogaz, etc. ;
- la couverture et la capacité du réseau caractéristique de la technologie de distribution C_1 ;
- la capacité et la portée de la technologie de transmission de la bretelle C_2 ;
- la capacité et la portée de la technologie de transmission sur le segment national C_3 ;
- la subvention liée au développement de l'Accès Universel l'Accès Universel (FSU) ;
- l'ensemble des autres charges additionnelles.

Si pour une localité l et un service donné s , la condition suivante est vérifiée :

$$(spp_{s_l} + spc_{s_l} - spp_{s_l} \times spc_{s_l}) < T_{UAI_s} \quad (3.17)$$

alors une action corrective de l'UAI est nécessaire en proposant une solution X dans cette zone afin que $g(X)$ soit minimisée. En d'autres termes, de nouvelles valeurs, avec l'allocation d'un fond de service universel (FSU), permettent de substituer respectivement spp_{s_l} et spc_{s_l} par $spps_{s_l}$ et $spcs_{s_l}$ pour qu'on ait l'effet correctif attendu pour cette localité. Ainsi, on a :

$$(spps_{s_l} + spcs_{s_l} - spps_{s_l} \times spcs_{s_l}) > T_{UAI_s} \quad (3.18)$$

L'effet correctif doit jouer sur l'UAI de la localité afin qu'il soit supérieur au seuil T_{UAI_s} .

En outre, dans une localité considérée et pour un service donné, on peut classer la population en quatre groupes selon l'appartenance technologique des individus et des communautés :

- N_{0_l} , la population dont le pouvoir d'achat PA_0 permet d'avoir une ligne personnelle ;
- N_{1_l} , la population ayant un pouvoir d'achat PA_1 permettant d'acquérir un terminal chez eux ;
- N_{2_l} , la population dont le pouvoir d'achat PA_2 permettrait l'accès au centre communautaire mais pas la possibilité d'acquérir un terminal chez eux ;
- N_{3_l} , la population qui n'est pas intéressée par le service.

Ainsi, on peut exprimer l'effet correctif de la manière suivante :

$$spps_{s_l} = spp_{s_l} + \frac{N_{1_l}}{N} \quad (3.19)$$

$$spcs_{s_l} = spc_{s_l} + \frac{N_{2_l}}{N} \quad (3.20)$$

avec $N = N_{0_l} + N_{1_l} + N_{2_l} + N_{3_l}$, la population totale de la localité.

Suivant les règles générales qui régissent les modalités pratiques de la subvention et sachant que les charges de mise en service d'une nouvelle solution sont conditionnées par le principe que toute subvention doit être ponctuelle pour assurer la pérennité de l'accès et des services. Ainsi on a :

$$PA_{1_{sl}} \times N_{1_{sl}} + PA_{2_{sl}} \times N_{2_{sl}} + FSU = C_1 + C_2 + C_3 + ChA \quad (3.21)$$

où ChA représente les charges liées à l'énergie E et toutes les autres charges additionnelles non prises en compte par C_1 , C_2 et C_3 .

Cette équation (3.21) montre le rôle que doit jouer le FSU pour équilibrer la relation entre les charges liées à l'installation et l'exploitation du réseau et les chiffres d'affaires générés.

III.3 Mise en œuvre

Dans le but d'appliquer et d'évaluer l'approche proposée, un échantillon représentatif est examiné. A titre illustratif, on considère la région du Ouaddaï au Tchad. Elle présente une superficie de 36 685km² avec une population de 1 367 166 habitants. Cette zone comprend trois localités réparties en communautés selon la règle du rayon de couverture, on considère ainsi 2km pour les localités rurales, 800m pour les périurbaines et 500m pour les urbaines [20]. Il a

été aussi jugé plus pertinent dans l'approche d'optimisation de considérer des souscriptions communautaires de type centres multimédia car cela englobe les différents services et réduit de fait les coûts. L'ensemble des données collectées et les différents résultats de simulation sont résumés dans les Tableaux III.1, III.2 et III.3 ci-dessous.

Le Tableau III.1 représente les données réelles de la région du Ouaddaï, avec les trois cas de figure de localités. Cette répartition correspond au découpage administratif : la zone correspond à la région, les localités correspondent aux trois départements qui sont répartis en communautés.

Ainsi, le Figure III- 1 fait ressortir, pour chaque localité considérée, les éléments suivants :

- les données démographiques (l'aire géographique, le nombre d'habitants) ;
- le parc d'abonnés aux différents services (clients mobiles, internet et fixe) ;
- les différents centres communautaires (Télécentre et Cyber-Café) ;
- le pouvoir d'achat en termes d'Average Revenu Per User (ARPU) par groupe de population tel que défini dans la section 2.2 ;
- le montant du fonds de Service Universel (FSU).

Ce tableau donne une cartographie existante de développement des TICs par localité. L'analyse de ce tableau montre que pour toutes les localités considérées se pose un problème d'accès qui se manifeste par une insuffisance de centres communautaires et un faible taux d'accès à l'internet. Le pouvoir d'achat est caractéristique des pays sous-développés [49][51][52], ce qui nécessite un fonds de Service Universel conséquent.

Tableau III- 1 : Données de base sur les communications électroniques dans la zone du Ouaddaï (Source ARCEP TCHAD)

| Données | Localité 1 | Localité 2 | Localité 3 |
|------------------------------------|------------|------------|------------|
| Superficie (Km²) | 11 611 | 15 229 | 9 845 |
| Population globale | 852 389 | 388 448 | 126 329 |
| Abonnés mobiles | 371 456 | 169 278 | 55 051 |
| Abonnés internet mobile | 587 | 1 032 | 896 |
| Abonnés fixes | 85 | 435 | 127 |
| Abonnés internet fixe | 5 | 11 | 7 |
| Centre téléphonique | 5 | 8 | 3 |
| Cybercafé | 1 | 2 | 1 |
| PA_{1v} (ARPU) | 9.926 | 10.94 | 10.252 |
| PA_{2v} (ARPU ccp) | 12.514 | 16.804 | 16.21 |
| PA_{1d} (ARPU) | 3.69 | 4.19 | 3.528 |
| PA_{2d} (ARPU ccp) | 4.752 | 6.284 | 5.702 |

| | |
|-----|---------|
| FSU | 321 739 |
|-----|---------|

Le Tableau III- 2 donne une évaluation des *UAI* voix et données de la région du Ouaddaï à partir des équations (3.1) à (3.5). On y retrouve le nombre de centres communautaire requis déterminé à partir des rayons de couverture des types de localités. Dans la suite, on a les paramètres relatifs au service voix et ceux relatifs au service données. Cela a permis ensuite d'estimer les différents *UAI* de chaque localité pour chaque type de service et d'en déduire l'*UAI* globale. L'analyse des éléments de ce tableau confirme l'insuffisance de solution d'accès individuel et la quasi absence de centre d'accès communautaires dans cette région. Globalement ce tableau dresse l'observatoire des TICs de la région du Ouaddaï.

Tableau III- 2 : Evaluation de l'*UAI* de la région du Ouaddaï

| Evaluation <i>UAI</i> | Localité 1 (zone urbaine) | Localité 2 (zone péri urbaine) | Localité 3 (zone rurale) |
|--|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Nombre de centre communautaires Requis (Cybercafés et Télécentre) | 14791 | 7578 | 784 |
| spp_{vi} | 0.437 | 0.437 | 0.436 |
| spc_{vi} | 0.001 | 0.004 | 0.000 |
| β_{vi} | 0.563 | 0.563 | 0.564 |
| spp_{di} | 0.003 | 0.007 | 0.001 |
| spc_{di} | 0.000 | 0.001 | 0.000 |
| β_{di} | 0.997 | 0.993 | 0.999 |
| UAI_{vi} | 0.437 | 0.439 | 0.436 |
| UAI_{di} | 0.003 | 0.008 | 0.001 |
| UAI_v | 0.00 | | |
| UAI_d | 0.00 | | |
| UAI | 0.00 | | |

Le Tableau III- 3, représente un exemple de stratégie de correction de l'*UAI* de la région du Ouaddaï (Tchad) au regard des résultats du Tableau III- 2. L'objectif étant d'améliorer l'*UAI* grâce à l'apport du FSU et en tenant compte des pouvoirs d'achat des populations de la zone. Une simulation a été réalisée pour obtenir un UAI_{su} de 0.333 (Tableau III- 4). Les valeurs ayant permis d'aboutir à ce résultat sont consignées dans le Tableau III 3. Il faut noter qu'il existe une corrélation entre le nombre de centres communautaires et la population susceptible d'y accéder. Cela se déduit de la population globale et des populations pouvant obtenir un accès individuel pour chaque type de service.

Tableau III- 3 : Exemple de Stratégie d'amélioration de l'UAI

| Données | Localité 1 | Localité 2 | Localité 3 |
|-------------------|------------|------------|------------|
| N_{1vi} | | | 10 |
| N_{2vi} | 4 330 | 8 170 | 813 |
| N_{1di} | 200 | 71 | 300 |
| N_{2di} | 5 110 | 63 970 | 1 439 |
| Cybercafés | 100 | 400 | 25 |
| Télécentre | 150 | 90 | 25 |

III.3.1 Résultats de simulations

A l'analyse de l'observatoire des TICs de la région du Ouaddaï et après détermination de l'indice de la zone citée, sur la base des données du Tableau III.2, et l'application d'une correction sur l'UAI, conformément à la stratégie d'amélioration proposée dans le Tableau III.3 (équations 3.19, 3.20, 3.21), on obtient les résultats consignés dans le Tableau III.4. Le coût de la technologie X intègre tous les apports y compris la subvention dédiée au service universel. Ce coût permettra de faire un choix judicieux sur les technologies à déployer au niveau la région du Ouaddaï afin de combler le vide technologique relevé lors de l'évaluation.

Tableau III- 4 : Résumé des résultats de divers calculs relatifs à l'UAI dans une zone et aux coûts associés

| Evaluation UAI | Localité 1 (zone urbaine) | Localité 2 (zone péri urbaine) | Localité 3 (zone rurale) |
|----------------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| $spps_{vi}$ | 0.437 | 0.437 | 0.436 |
| $spcs_{vi}$ | 0.021 | 0.119 | 0.002 |
| β_{svi} | 0.563 | 0.563 | 0.564 |
| UAI_{vsi} | 0.449 | 0.504 | 0.437 |
| UAI_{suv} | 0.333 | | |
| $spps_{di}$ | 0.003 | 0.008 | 0.001 |
| $spcs_{di}$ | 0.013 | 0.512 | 0.002 |
| UAI_{sdi} | 0.017 | 0.515 | 0.003 |
| UAI_{dsu} | 0.333 | | |
| UAI_{su} | 0.333 | | |
| $PA_{1vi} * N_{1vi}$ | 0.000 | 0.000 | 99.260 |
| $PA_{2vi} * N_{2vi}$ | 72 754.598 | 132 428.193 | 10 170.328 |
| $PA_{1di} * N_{1di}$ | 838.000 | 250.488 | 1 107.000 |
| $PA_{2d} * N_{2di}$ | 32 108.156 | 364 756.286 | 6 839.110 |
| Total | 105 700.755 | 497 434.966 | 18 215.698 |

| | |
|-----------|-------------|
| Coût de X | 943 090.419 |
|-----------|-------------|

III.3.2 Elaboration des solutions possibles

Les différentes solutions énumérées dans le Tableau III- 5 constituent des possibilités pour remédier aux contraintes technologiques liées au développement de l'Accès Universel. Mais le choix de la solution appropriée dépend du coût C de la localité ou zone i calculé sur la base de ses valeurs.

Tableau III- 5 : Scénario techniques possibles de mise en œuvre de l'Accès Universel l'Accès Universel

| Choix solution X | Réseaux d'accès | Bretelle | Artère Nationale | Interconnexion et divers | Coût total |
|------------------|-----------------|-----------|------------------|--------------------------|------------|
| 1 | WiFi/WiMAX | FH | FH | Y | T1 |
| 2 | WiFi/WiMAX | FH | Satellite | Y | T2 |
| 3 | WiFi/WiMAX | Satellite | Satellite | Y | T3 |
| 4 | WiFi/WiMAX | FH | Fibre | Y | T4 |
| 5 | WiFi/WiMAX | Fibre | Fibre | Y | T5 |
| 6 | Cuivre | FH | FH | Y | T6 |
| 7 | Cuivre | FH | Satellite | Y | T7 |
| 8 | Cuivre | Satellite | Satellite | Y | T8 |
| 9 | Cuivre | FH | Fibre | Y | T9 |
| 10 | Cuivre | Fibre | Fibre | Y | T10 |
| 11 | CDMA | FH | FH | Y | T11 |
| 12 | CDMA | FH | Satellite | Y | T12 |
| 13 | CDMA | Satellite | Satellite | Y | T13 |
| 14 | CDMA | FH | Fibre | Y | T14 |
| 15 | CDMA | Fibre | Fibre | Y | T15 |
| 16 | GSM/UMTS | FH | FH | Y | T16 |
| 17 | GSM/UMTS | FH | Satellite | Y | T17 |
| 18 | GSM/UMTS | Satellite | Satellite | Y | T18 |
| 19 | GSM/UMTS | FH | Fibre | Y | T19 |
| 20 | GSM/UMTS | Fibre | Fibre | Y | T20 |
| 21 | Other solution | FH | FH | Y | T21 |
| 22 | Other solution | FH | Satellite | Y | T22 |
| 23 | Other solution | Satellite | Satellite | Y | T23 |
| 24 | Other solution | FH | Fibre | Y | T24 |
| 25 | Other solution | Fibre | Fibre | Y | T25 |

Le choix de la solution optimale est fait après comparaison du coût lié aux contraintes C et du coût T des technologies X . Ainsi, le choix final sera porté sur la solution dont le coût T de la technologie est inférieur aux coûts liés aux contraintes C .

Deux stratégies de déploiement des centres multimédia ont été évaluées :

- déploiement orienté des localités urbaines vers les localités rurales ;
- déploiement orienté des localités rurales vers les localités urbaines.

Les Figure III- 4, Figure III- 5 et Figure III- 6 illustrent ces deux stratégies différentes de déploiement de centres multimédia à travers l'ensemble des localités considérées.

La Figure III- 4 compare UAI_v et UAI_d dans une stratégie de déploiement équiréparti orientée des localités urbaines vers les localités rurales. Ce graphe permet de voir l'évolution de UAI_v et UAI_d de la zone considérée. Au regard de ce dernier, l'indice UAI_v atteint la valeur idéale de 1 après l'installation de 4 000 centres multimédias alors que UAI_d atteint la valeur idéale qu'après l'installation de 15 000 centres multimédia (*spc*). Cela montre que le choix de déploiement de centres multimédia ne fait pas évoluer nécessairement l'indice des services de la même façon, étant donné que le service voix est plus utilisé que celui des données. Nous notons que l'atteinte des objectifs voix est plus facile à maîtriser que ceux liés aux données.

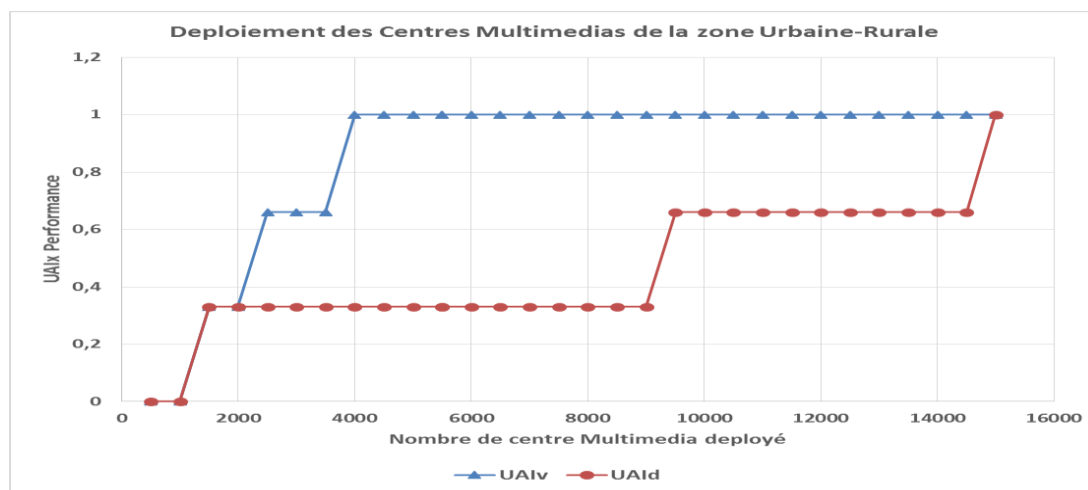


Figure III- 4 : Stratégie de déploiement équi-réparti de centres multimédias des zones urbaines vers les zones rurales

La Figure III- 5 confirme que les besoins technologiques pour rendre idéal UAI_v sont plus faciles à mettre en œuvre que ceux liés à l' UAI_d . D'une manière générale, la Figure III-6 donne l'évolution de ces indices lorsque le déploiement est fait dans le sens rural vers urbain. Elle montre que l'indice UAI_v prend la valeur idéale 1 après installation de 6500 centres multimédias tandis que UAI_d atteindra la valeur 1 après l'installation de 10000 centres de plus que l' UAI_v . Par contre les UAI évoluent pratiquement de manière discontinue jusqu'au seuil de 16500.

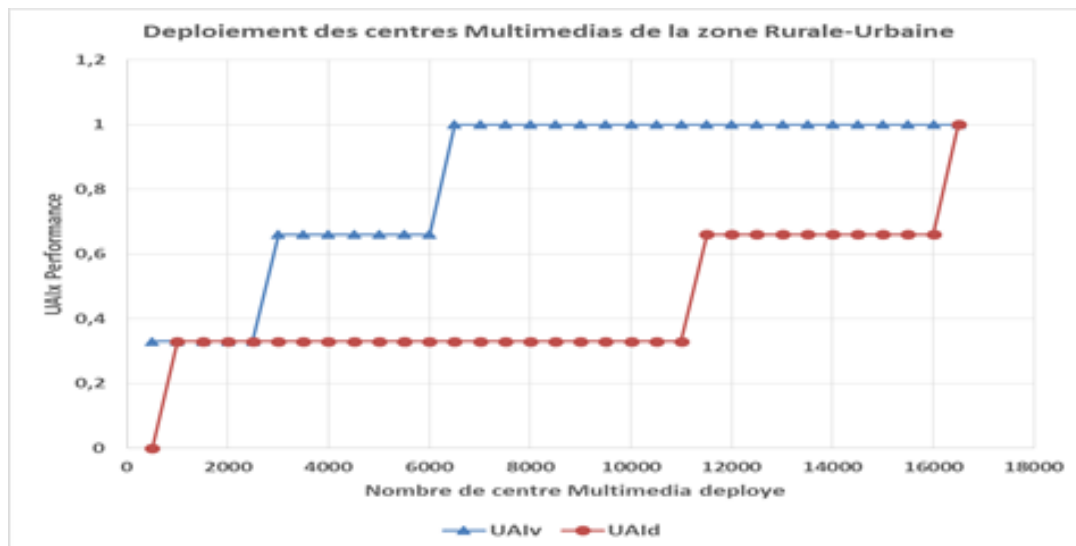


Figure III- 5 : Stratégie de déploiement équi-réparti de centres multimédias des zones rurales vers les zones urbaines.

La Figure III- 6 illustre l'évolution comparative de l'UAI sur la base des deux approches stratégiques précédemment énoncées dans le Tableau III- 3. Elle montre que l'évolution comparative de l'UAI global des deux approches se fait de manière discrète.

En comparant les deux approches, on conclut que la première présente une avancée significative de l'atteinte de l'objectif idéal ($UAI=1$) par rapport à la deuxième qui est plus coûteuse puisqu'elle nécessite plus de centres multimédias.

On retient de ces travaux que l'étude de la stratégie de déploiement de solutions techniques intégrant les contraintes économiques revêt un caractère important pour assurer une accessibilité globale optimisée voire idéale. Toutefois les Figure III- 4, Figure III- 5 et Figure III- 6 montrent qu'un minimum d'efforts équivalent au seuil initial doit être fait pour ne pas avoir un UAI nul.

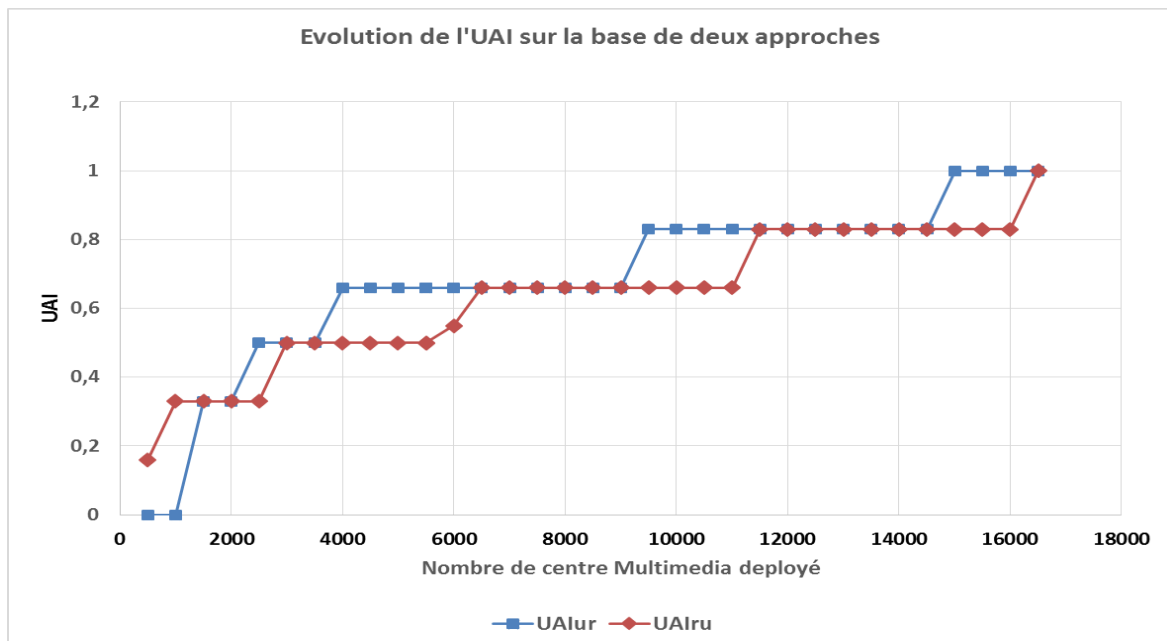


Figure III- 6 : Comparaison d'UAI basé sur les stratégies de déploiement équi-réparti de centres multimédias

Conclusion

Dans ce chapitre, un indice d'Accès Universel a été proposé afin de quantifier le niveau de développement d'une zone suivant une approche basée sur l'étude de l'existant en termes d'infrastructures techniques, identification de la problématique et proposition d'une stratégie de mise en place d'une cartographie cible.

L'approche globale proposée ici pour l'évaluation de l'indice d'Accès Universel dans un pays s'appuie sur une stratégie de minimisation d'une fonction révélant, d'une part le gap technologique à combler et d'autre part, prédisant le niveau d'accès technologique à atteindre en fonction des politiques d'investissement du fonds de Service Universel (FSU). Cette approche novatrice diffère des travaux précédents sur l'indice d'accès au service universel. Elle conduit à la mise en place d'actions correctives liées au fonds de Service Universel (FSU) et prend en compte les contraintes technico-économiques intrinsèques à chaque localité.

Bien que l'approche proposée dans ce chapitre soit appliquée à un exemple de complexité moyenne, les résultats obtenus permettent néanmoins de vérifier que sa mise en œuvre peut

constituer un outil d'aide à la décision pour l'ensemble des décideurs du secteur des communications électroniques.

Après analyse des scénarios techniques possibles de mise en œuvre de l'Accès Universel présentés dans le Tableau III- 5, selon les contextes de l'étude, il s'est avéré que les solutions radios permettent plus aisément de corriger l'*UAI* d'une zone nécessitant le Service Universel. Suivant cette logique, dans le chapitre suivant, nous allons analyser les points forts des différentes technologies radio afin d'en sortir celles les mieux indiquées.

CHAPITRE 4 : Modélisation de l'architecture réseau basée sur les technologies radio

Introduction

L'apport des technologies radio au développement de l'Accès et du Service Universel n'est plus à démontrer. Dans ce chapitre, compte tenu de l'analyse précédente et du contexte d'Accès et de Service Universel, on se propose d'établir un modèle d'architecture réseau basé sur les technologies radio [56][57]. Nous proposons une modélisation et des hypothèses techniques qui permettent d'analyser les points forts de chacune des technologies sous un angle contextualisé afin d'en déduire la plus indiquée pour une zone donnée. Pour ce faire, il nous semble indispensable que l'architecture soit basée sur une approche méthodologique consistant à intégrer les différentes variables impliquées dans le choix des technologies radio pour l'Accès et le Service Universel.

Ainsi, dans la première partie de ce chapitre, on présente l'approche de modélisation permettant de déterminer les différents éléments du réseau d'accès, du réseau de transmission, du modèle de rentabilité et une étude de cas qui permet de conclure sur la faisabilité de l'approche. La deuxième partie de ce chapitre traite de l'impact de la technologie radio sur l'indice d'accès universel en proposant un modèle d'évaluation et une fonction corrective.

Enfin, nous terminerons par l'applicabilité du modèle d'évaluation précédemment développé et une conclusion.

IV.1 Approche de modélisation d'accès radio pour le Service Universel

La mise à la disposition des populations d'équipements et services TICs est devenue une priorité pour les pouvoirs publics Africains. Cependant la question qui persiste est de savoir à quel prix [56].

Cette question nous amène à faire un choix judicieux de solutions techniques à déployer qui, dans le contexte du service universel, doivent découler de l'évaluation dans les zones ou pays de l'indice *UAI* proposé dans le chapitre précédent.

Dans ce contexte, ce paragraphe apporte une contribution pour évaluer l'impact des architectures réseaux basées sur les technologies radio pour l'accès et le service universel. Canalisé au départ sur le service téléphonique fixe, le Service Universel vise maintenant en

priorité l'accès à Internet et les communications mobiles. Dans l'optique de cette nouvelle orientation, plusieurs auteurs ont orienté leurs travaux dans cette direction, c'est ainsi que Bachar et *al.*[44] ont proposé une approche globale d'évaluation et d'optimisation de l'indice d'accès au Service Universel dans un pays comme le Tchad. Gasmi & Recuero Virto [53] ont examiné les politiques pour la fourniture de services de télécommunications dans les zones rurales des pays en développement. Ils ont montré que ces politiques diffèrent nettement de celles habituellement appliquées dans ces pays dans leurs objectifs fondamentaux, les stratégies technologiques, le rôle du marché et les environnements institutionnels. Falch & Henten[54] ont étudié les mesures politiques appropriées à mettre en place en Europe pour promouvoir l'accès universel, ils ont montré qu'il fallait aussi mettre en œuvre une combinaison de différentes technologies et de stratégies. Xavier [55] donne un aperçu des principales questions relatives à l'Accès Universel et à la fourniture du service universel.

La méthodologie de modélisation du réseau proposée dans ce chapitre consiste à déterminer l'architecture réseau optimal [59] pour l'Accès et Service Universel dans une zone en s'appuyant sur ses propres données. Ainsi, la démarche pour l'obtention de ce modèle se base sur le concept de l'architecture du réseau d'accès et sur celui du réseau de transmission. Aussi, elle met en évidence la détermination des coûts d'investissements (CAPEX) et des opérations (OPEX) pour déduire une équation de rentabilité.

IV.1.1 Modèle du réseau d'accès

La détermination du modèle du réseau d'accès d'une zone se base sur des indicateurs de télécommunications, notamment ceux liés aux aspects démographiques et financiers. Ainsi, à travers les données de cette zone, on détermine la population adressable au Service Universel et la bande passante, le nombre nécessaire de stations de base, ensuite on évalue les coûts des investissements (CAPEX) et des opérations (OPEX), puis on définit les charges connexes d'énergie et des éléments passifs.

IV.1.1.1 Détermination de la population adressable et de la bande passante requise

La population adressable (P_A) au Service Universel est donnée par l'expression :

$$P_A = (P - P_S) \times T_N \quad (4.1)$$

avec P la population de la zone cible, P_S la population ayant accès au Service Universel et T_N le taux de pénétration du service.

La bande passante rapportée à la population adressable est déterminée sur la base du besoin en débit/abonné, du débit par utilisateur offert par une technologie d'accès et du taux de contention. Elle s'exprime par la relation suivante :

$$Bp_A = P_A \times D_A \times T \text{ avec } D_X > D_A \times T \quad (4.2)$$

où (D_A) représente le débit/abonné, D_X le débit par utilisateur offert par la technologie X et T le taux de contention.

Notons que le débit par abonné prend en compte le débit voix et données simultanément et que le taux de contention doit être pris de sorte que, même dans le cas le plus défavorable, le débit minimum voix soit conservé pour l'utilisateur, ce qui se traduit par la contrainte exprimant que la technologie d'accès doit supporter aisément les besoins en débit des abonnés.

IV.1.1.2 Détermination du nombre optimal de stations de base

La détermination du nombre nécessaire de stations de base de la zone d'accès combine une approche en couverture avec une approche en capacité dans le but d'éviter les problèmes de surdimensionnement et sous-dimensionnement du réseau. Ainsi, ce nombre est donné par la relation suivante :

$$BS_{Nx} = m \times BS_C + n \times BS_B \quad (4.3)$$

où $BS_C = \frac{S_c}{S_{BSC}}$ et $BS_B = \frac{Bp_A}{CapBS_x \times T_u}$

De l'équation (4.3) on exprime le nombre de station de bases BS_x par une combinaison pondérée des besoins en couverture et en capacité comme suit :

$$BS_{Nx} = \left(m \times \frac{S}{S_c} + n \times \frac{BP}{CapBS_x} \right) = \left(m \times \frac{S}{S_c} + (1 - m) \times \frac{BP}{CapBS_x \times T_u} \right) \quad (4.4)$$

avec S_C la surface à couvrir et S_{BSC} la surface couverte par une station de base, $CapBS_x$ la capacité de la station de base en bande passante rapportée à une technologie X et T_u le taux d'utilisation de cette station, m et n sont des coefficients de pondération liés aux besoins de couverture et de la capacité. Les valeurs de m et n sont compris entre 0 et 1.

IV.1.1.3 Planification du coût des investissements et du coût des opérations

Le coût total des frais d'investissements (*CAPEX*) d'une technologie X est donné par l'expression :

$$C_C = BS_N \times capex(BS_X) \quad (4.5)$$

où $capex(BS_X)$ est le coût unitaire d'investissement d'une technologie X donnée.

En ce qui concerne le coût total des frais d'exploitation (*OPEX*) d'une technologie X , en tenant compte de son pourcentage réducteur r , il est déterminé par l'expression :

$$C_O = BS_N \times opex(BS_{XN}) \quad (4.6)$$

avec $opex(BS_{XN}) = opex(BS_{X(N-1)}) \times (1 - r)$ où $opex(BS_{XN})$ est le coût unitaire en exploitation d'une station de base à l'année N rapportée à la technologie X .

En effet le coût unitaire en exploitation décroît chaque année d'un pourcentage réducteur constant positif r . Cette décroissance est due au fait qu'au fur et à mesure qu'on utilise un équipement, l'on acquiert une certaine maîtrise qui réduit les coûts d'exploitation au fil des années.

IV.1.1.4 Détermination du coût total en accès

On définit le coût total en accès d'une technologie X par la somme des *CAPEX* plus des *OPEX* sur toute la durée du projet et des frais connexes. Ces frais connexes comprennent les frais d'investissements et d'exploitation des infrastructures passives ainsi que ceux des ateliers d'énergie.

En considérant d'une part, que le coût des *OPEX* représente 5% du coût des *CAPEX* et d'autre part, que le coût des *OPEX* en énergie représente 25% des *CAPEX* en énergie [62], on détermine les coûts d'investissements et d'exploitation des infrastructures passives ainsi que ceux des ateliers d'énergie, tout en intégrant simultanément les coûts des *OPEX* et des *CAPEX*, par les expressions suivantes :

$$CTI_X = 1,05 \times BS_N \times c_i \quad (4.7)$$

$$CTE_X = (1,25 \times c_e) \times \sum_{k=0}^T BS_{Nk} \quad (4.8)$$

avec c_i le coût unitaire en infrastructure passive et c_e le coût unitaire en énergie.

Ainsi, les frais connexes (CC) sont donnés par l'expression :

$$CC = CTI_X + CTE_X \quad (4.9)$$

Tandis que le coût total en accès est donné par la relation ci-après :

$$CTA_X = CC + C_C + \sum_{k=0}^T C_{OXk} \quad (4.10)$$

En exprimant la sommation des OPEX de la technologie d'accès et en utilisant l'équation (4.5), on peut écrire :

$$\sum_{k=0}^T C_{OXk} = BS_0 \times opex(BS_{X0}) + BS_1 \times opex(BS_{X1}) + \dots + BS_T \times opex(BS_{XT}) \quad (4.11)$$

or $opex(BS_{X1}) = opex(BS_{X0}) \times (1 - r)$ et $opex(BS_{X2}) = opex(BS_{X1}) \times (1 - r)$, par conséquent on obtient $opex(BS_{X2}) = opex(BS_{X0}) \times (1 - r)^2$, donc en généralisant la sommation, on obtient l'expression :

$$\sum_{k=0}^T C_{OXk} = opex(BS_{X0}) \times [BS_0 + BS_1 \times (1 - r)^1 + \dots + BS_T \times (1 - r)^T] \quad (4.12)$$

Ainsi, le coût total du réseau d'accès est déterminé par l'expression globale suivante :

$$CTA_X = CC + C_C + opex(BS_{X0}) \times [BS_0 + BS_1 \times (1 - r)^1 + \dots + BS_T \times (1 - r)^T] \quad (4.13)$$

$$CTA_X = CC + BS_N \times capex(BS_X) + opex(BS_{X0}) \times [BS_0 + BS_1 \times (1 - r)^1 + \dots + BS_T \times (1 - r)^T] \quad (4.14)$$

$$CTA_X = 1,05 \times BS_N \times c_i + (1,25 \times c_e) \times \sum_{k=0}^T BS_{NXk} + BS_N \times capex(BS_X) + opex(BS_{X0}) \times [BS_0 + BS_1 \times (1 - r)^1 + \dots + BS_T \times (1 - r)^T] \quad (4.15)$$

Dans la pratique, une région ou une zone est l'objet d'un lancement commercial lorsque l'ensemble des stations est déployé. Ceci simplifie l'expression (4.14) qui devient :

$$CTA_X = BS_X \times \{1,05 \times c_i + (1,25 \times c_e) \times (T + 1) + capex(BS_X) + opex(BS_{X0}) \times [1 + (1 - r)^1 + \dots + (1 - r)^T]\} \quad (4.16)$$

$$CTA_X = BS_X \times \{1,05 \times c_i + (1,25 \times c_e) \times (T + 1) + capex(BS_X) + opex(BS_{X0}) \times [1 + (1 - r)^T] / [-r]\} \quad (4.17)$$

Pour une technologie donnée, il est possible d'établir un rapport entre $opex(BS_{X0})$ et $capex(BS_X)$. Supposons dans notre cas que ce rapport est α , l'expression (16) devient alors :

$$CTA_X = BS_X \times \{1,05 \times c_i + (1,25 \times c_e) \times (T + 1) + capex(BS_X)[-r + \alpha + \alpha \times (1 - r)^T] / (-r)\} \quad (4.18)$$

Alors on peut obtenir le nombre de stations nécessaires pour la technologie X par l'expression :

$$BS_X = \frac{CTA_X}{\{1,05 \times c_i + (1,25 \times c_e) \times (T + 1) + \alpha - \alpha \times \frac{[1 + (1 - r)^T]}{[-r]}\}} \quad (4.19)$$

Dans une localité donnée, la technologie d'accès X à choisir sera celle qui aura le coût total en accès CTA_X le plus faible parmi toutes les technologies soumises à cet algorithme.

Cette équation permet d'évaluer le montant total de la subvention nécessaire pour atteindre le projet, mais aussi le pouvoir d'achat suffisant (ARPU) nécessaire pour assurer l'accessibilité de la population au service. L'analyse du modèle montre que l'ensemble des dépenses quand on soustrait la subvention sur la durée du projet doit être inférieure au bénéfice de l'opérateur sur la même durée (nombre d'abonnés au cours de la durée de l'étude du projet multiplié par l'ARPU).

IV.1.2 Modèle du réseau de transmission

La modélisation du réseau de transmission consiste dans un premier temps, à évaluer le nombre nécessaire de stations relais reliant la zone d'accès au backbone national et dans un deuxième temps, à vérifier la capacité totale en bande passante. Ensuite, afin de choisir la technologie de transmission la mieux adaptée, on détermine les différentes composantes des coûts de la technologie de transmission, à savoir les coûts des investissements et les coûts des opérations, pour en déduire le coût total de la technologie de transmission.

IV.1.2.1 Dimensionnement de l'artère de transmission

Le nombre de stations relais est déterminé sur la base de l'expression suivante :

$$N_{XT} = \frac{d}{P_{XT}} \quad (4.20)$$

où d est la distance entre la zone d'accès et le backbone et P_{XT} la portée offerte par une station relais rapportée à la technologie de transmission.

Il faut remarquer cependant, qu'il faut s'assurer que la technologie de transmission qui sera choisie, puisse supporter le débit récupéré en accès. Pour ce faire, la contrainte ci-dessous doit être vérifiée :

$$Bp_{XT} > Bp_A \quad (4.21)$$

IV.1.2.2 Planification des coûts d'investissement et d'exploitation

Ces différents coûts du réseau de transmission sont calculés après la détermination du nombre de relais nécessaires et l'estimation de la bande passante.

Ainsi, le coût d'investissement de la technologie de transmission est donné par l'expression suivante :

$$C_{CT} = Capex(XT) \times (1 + N_{XT}) \quad (4.22)$$

où $Capex(XT)$ représente le coût d'investissement d'une station de la technologie X du réseau de transmission. Le coût d'exploitation peut être exprimé par l'expression ci-après :

$$C_{OT_N} = Opex_N(XT) \times (1 + N_{XT}) \quad (4.23)$$

où $Opex_N(XT)$ représente le coût d'exploitation à l'année N du réseau de transmission.

Étant donné que les stations seront exploitées durant toute la durée du projet, elles engendreront annuellement des coûts d'exploitation. De plus sachant qu'au fil du temps, plus la technologie déployée sera maîtrisée, plus les coûts d'exploitation diminuent, ainsi, on introduit un coefficient réducteur r permettant d'exprimer la variation annuelle du coût d'exploitation. On peut donc exprimer l'évolution du coût d'exploitation en fonction de celui de l'année précédente :

$$Opex_N(XT) = Opex_{(N-1)}(XT) \times (1 - r) \quad (4.24)$$

En intégrant l'expression (4.24) dans l'équation (4.23), on obtient ;

$$C_{OT_N} = Opex_{(N-1)}(XT) \times (1 - r) \times (1 + N_{XT}) \quad (4.25)$$

or $Opex_{(N-1)}(XT) \times (1 + N_{XT}) = C_{OT_{(N-1)}}$, donc on peut exprimer le coût d'exploitation par l'expression finale ci-dessous :

$$C_{OT_N} = C_{OT_{(N-1)}} \times (1 - r) \quad (4.26)$$

L'analyse de l'équation (4.26), montre que C_{OTN} est une suite géométrique de raison $(1 - r)$ et de premier terme $C_{OT(N-1)}$.

On peut ainsi exprimer le coût total des OPEX sur toute la durée T du projet par l'équation suivante :

$$\sum_{k=0}^T C_{OTk} = C_{OT0} \left(\frac{1-(1-r)^{T+1}}{r} \right) \text{ avec } r \neq 0 \text{ et } r \neq 1 \quad (4.27)$$

Finalement, le coût total des OPEX de la technologie de transmission peut être déterminé par l'expression suivante :

$$C_{OTN} = (1 + N_{XT}) \times C_{OT0} \left(\frac{1-(1-r)^{T+1}}{r} \right) \quad (4.28)$$

IV.1.2.3 Détermination des coûts d'accès à internet et d'interconnexion

La détermination du coût total d'accès au réseau internet met en œuvre la bande passante nécessaire allouée à la donnée durant le projet et le tarif par Mbps selon les contextes spécifiques des pays. L'expression suivante donne les coûts d'accès au réseau internet sur toute la durée d'étude T du projet :

$$C_{data} = C_L \times \sum_{k=0}^T Bp_{dataK} \quad (4.29)$$

avec C_L représentant le tarif par Mbps d'accès au réseau internet et Bp_{data} la bande passante allouée à la data.

Le coût d'interconnexion du trafic voix off-net est déterminé sur la base du volume global du trafic voix, du taux du trafic voix off-net et du prix par unité de Mbps selon les contextes spécifiques des pays. Il est ainsi donné par la relation suivante :

$$C_{voice} = \alpha \times C_I \times \sum_{k=0}^T Bp_{voiceK} \quad (4.30)$$

où α est le taux de trafic voix off-net, C_I le coût par unité de Mbps et Bp_{voice} est la bande passante allouée à la voix.

IV.1.2.4 Détermination des coûts connexes de transmission

La formation des coûts connexes en transmission sont faites à partir des coûts des infrastructures passives (mât, shelter, pylône) et des coûts des ateliers d'énergie. Pour un nombre de stations de transmission donné avec un coût C_i d'une infrastructure passive de transmission par station, on exprime les coûts totaux des infrastructures passives, en englobant les coûts totaux des

OPEX et CAPEX des infrastructures passives et en considérant que les OPEX représentent 5% des CAPEX [62], par l'expression suivante :

$$CTI_{XT} = (BS_N + 1) \times c_i \times 1,05 \quad (4.31)$$

La détermination du coût total en énergie est donnée par la relation suivante selon qu'on utilise l'énergie thermique ou l'énergie solaire [36] pour alimenter les équipements actifs du réseau :

$$CTE_{XT} = (BS_N + 1) \times c_e \times T \times \beta \quad (4.32)$$

où $\begin{cases} \beta = 1,05 \text{ si énergie solaire} \\ \beta = 1,25 \text{ si énergie thermique} \end{cases}$, et avec c_e représentant le coût en énergie d'une station de transmission et T la durée du projet.

Ainsi, on peut exprimer les coûts connexes en transmission par l'expression :

$$CC_{XT} = CTI_{XT} + CTE_{XT} \quad (4.33)$$

IV.1.2.5 Détermination du coût total en transmission

Le coût total du réseau de transmission est déterminé par l'expression globale suivante :

$$CT_{XT} = C_{cT} + C_{OTN} + C_{voice} + C_{data} + CC_{XT} \quad (4.34)$$

Par conséquent, la technologie de transmission XT à choisir sera celle qui aura respectée chacune des contraintes de transmission et qui aura le coût total CT_{XT} le plus faible.

IV.1.3 Equation de rentabilité

Le modèle de rentabilité permet d'estimer le montant total de la subvention pour réaliser le projet mais aussi le pouvoir d'achat (ARPU) adéquat pour assurer l'accessibilité des populations au service. Il peut être exprimé par l'expression suivante :

$$CTA_X + CT_{XT} + Taxe + Marge - Sub < Arpu \times P_A \quad (4.35)$$

sous les contraintes :

$$\begin{cases} P_A = P_{A0} \left[\frac{1 - (1 + \tau)^{T+1}}{-\tau} \right] \\ Arpu \leq K \times SMIC \end{cases}$$

avec P_A étant la population adressable, $Arpu$ le pouvoir d'achat des populations, K le facteur de dépenses, $Marge$ la marge de l'opérateur et Sub la subvention des pouvoirs publics.

La première contrainte est une contrainte de rentabilité tandis que la deuxième est une contrainte de facteur de dépenses avec $25\% \leq K \leq 30\%$.

L'analyse de ce modèle montre que l'ensemble des dépenses auquel on soustrait la subvention sur la durée du projet doit être inférieur à ce que l'opérateur gagnerait sur cette même durée, c'est-à-dire un nombre d'abonnés sur la durée du projet multiplié par l'ARPU. Il faut noter cependant que la contrainte de facteur de dépenses équivaut à une contrainte sur l'ARPU. Cette contrainte veut dire que l'ARPU doit être inférieur ou, à la limite, égale au pourcentage que les abonnés seraient prêts à céder de leur revenu pour accéder au service.

L'objectif recherché à travers ce modèle de rentabilité est de déterminer la subvention que les pouvoirs publics pourraient être amenés à allouer. Pour ce faire, sachant que $Arpu = Ca/P_A$, avec Ca le chiffre d'affaire, alors on peut réécrire l'équation (4.35) comme suit :

$$CTA_X + CT_{XT} + Taxe + Marge - Sub = \left(\frac{Ca}{P_A}\right) \times P_A$$

Et par conséquent, la subvention est déterminée par l'expression suivante :

$$Sub = CTA_X + CT_{XT} + Taxe + Marge - Ca \quad (4.36)$$

On obtient de la sorte le montant de la subvention pour que l'ensemble des dépenses soit égal à ce que l'opérateur aurait obtenu comme fonds et correspond donc à l'ARPU minimum. Ainsi pour assurer la stricte rentabilité de l'opérateur, on propose que le facteur de dépenses pour le calcul de la subvention soit égal à 25% et pour le calcul de l'ARPU final, ce facteur de dépenses soit égal à 30% en supposant qu'au maximum la population cible, dans le cadre de l'Accès Universel, pourrait mettre en jeu 30% de leur revenu pour ce service. Aussi, on spécifie que la marge représente une marge d'erreur de 5% de la somme entre le total en accès et le total en transmission afin d'éviter des imprévus.

IV.1.4 Mise en œuvre de l'approche de modélisation d'accès radio

Dans le but d'appliquer et d'évaluer l'approche proposée, on considère la région du Ouaddaï au Tchad. Elle présente une superficie de 36 685 km² comprenant une population de 1 367 166

habitants. Cette zone comprend trois localités avec des besoins en débit par habitant identiques mais les besoins en bande passante diffèrent d'une localité à l'autre. Les Tableaux IV- 3 et IV- 4 résument les différents résultats de simulations obtenus suivant les "inputs" de l'ensemble des données collectées aux Tableaux IV.1 et IV.2.

Le Tableau IV- 1 représente les données réelles de la région du Ouaddaï (Tchad), avec Localité 1 située en centre-ville, Localité 2 située en périphérie et Localité 3 située en zone rurale. Cette répartition correspond au découpage administratif : la zone correspond à la région, les localités correspondent aux trois départements qui sont répartis en communautés. Ce tableau ressort pour chaque localité considérée :

- les données démographiques (l'aire géographique, le nombre d'habitants) ;
- le parc d'abonnés de l'ensemble des services de communications électroniques;
- le taux de pénétration des TICs ;
- les besoins en débit/abonné et la bande passante nécessaire (Bpa).

L'analyse du Tableau IV- 1 révèle que suivant la définition de l'Accès Universel de l'UIT, il est important d'avoir un débit de 256Kbps pour offrir les services nécessaires. Pour l'ensemble de localités considérées, nous enregistrons un taux de pénétration ne dépassant pas 45%. La pénétration des services liés à la donnée est faible, ce qui justifie le besoin important en bande passante des localités.

Tableau IV- 1: Données de base de la zone de l'Ouaddaï (Source ARCEP TCHAD)

| Données | Localité 1 | Localité 2 | Localité 3 |
|---|------------|------------|------------|
| Superficie | 11 611 | 15 229 | 9 845 |
| Population | 852 389 | 388 448 | 126 329 |
| Taux de pénétration | 43.66 | 43.85 | 44.40 |
| Besoin en débit/abonné (Kbt/S) | 256 | 256 | 256 |
| Population Ps | 371547 | 170755 | 56078 |
| Population Addressable (PA) | 209647 | 95350 | 31121 |
| Bande passante Adressable(Bpa) par Mbt/s | 53 669 660 | 24 409 481 | 79 67 025 |

Le Tableau IV- 2, ci-dessous donne les débits offerts par les différentes technologies, les surfaces couvertes par une BS de technologie X ainsi que la capacité maximale des BS. Il ressort

également les CAPEX, OPEX des stations de base par technologie et les coûts des infrastructures passives ainsi que ceux liés à l'énergie [62][65].

Tableau IV- 2: Données liées aux technologies

| Données | WIFI | WiMAX | CDMA | Projet Loon | Open BTS |
|---------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Débit (D_x) | 54 | 70 | 3.1 | 10 | 3.84 |
| Surface couverte par BS (S_{BSC}) | 0.13 | 200.96 | 5024 | 5024 | 314 |
| Capacité BS ($CapBS_x$) | 100 | 30 | 64 | 64 | - |
| CAPEX (BS_x) | 9000 | 980 000 | 45 000 000 | 864 300 | - |
| OPEX (BS_x) | 1350 | 147 000 | 6 750 000 | 129 645 | 0 |
| CTA (FCFA) | 1 000 000 000 | 1 000 000 000 | 1 000 000 000 | 1 000 000 000 | 1 000 000 000 |
| Ci | 657 000 | 1 314 000 | 6 570 000 | 2 170 000 | 6 130 000 |
| Ce | 5 000 000 | 17 000 000 | 55 845 000 | 35 000 000 | 35 000 000 |

Résultats de simulations

Après analyse du Tableau IV- 1 et du Tableau IV- 2, nous déterminons le nombre des stations de base par technologie suivant l'équation (4.19) et sous les conditions suivantes :

- variation de la durée T du projet ainsi celle du coefficient de réducteur r des OPEX ;
- uniquement à la variation du coefficient réducteur r ;
- variation du coefficient m lié à la couverture conformément à l'équation (4.4).

A partir de (4.19), on obtient le Tableau IV- 3 qui donne le nombre des stations de base des différentes technologies suivant le coefficient réducteur r et la durée T du projet.

Tableau IV- 3: Détermination du nombre de stations BS des différentes technologies selon la variation du temps T et du coefficient réducteur r

| Alpha | T | r | BSn_WiFi | BSn_WiMAX | BSn_CDMA |
|-------|----|-----|----------|-----------|----------|
| 0.25 | 1 | 0.1 | 75.8 | 22.4 | 5.6 |
| 0.25 | 2 | 0.2 | 51.4 | 15.2 | 4.2 |
| 0.25 | 3 | 0.3 | 39 | 11 | 3.3 |
| 0.25 | 4 | 0.4 | 31.3 | 9.2 | 2.6 |
| 0.25 | 5 | 0.5 | 26.2 | 7.73 | 2.23 |
| 0.25 | 6 | 0.6 | 22.50 | 6.64 | 1.92 |
| 0.25 | 7 | 0.7 | 19.72 | 5.81 | 1.68 |
| 0.25 | 8 | 0.8 | 17.56 | 5.17 | 1.50 |
| 0.25 | 9 | 0.9 | 15.82 | 4.66 | 1.35 |
| 0.25 | 10 | 1 | 14.40 | 4.24 | 1.24 |

La Figure IV-1 ci-dessous représente le nombre de stations par technologie selon la variation du coefficient réducteur, de la durée du projet fixée à 5 ans et en se basant sur l'amortissement des équipements de télécommunications. Ce graphe permet de voir l'évolution des BS de la zone, pour le même r et T le nombre de diffère selon la technologie X . Nous notons que si la durée T du projet croit le nombre de BS_x décroît.

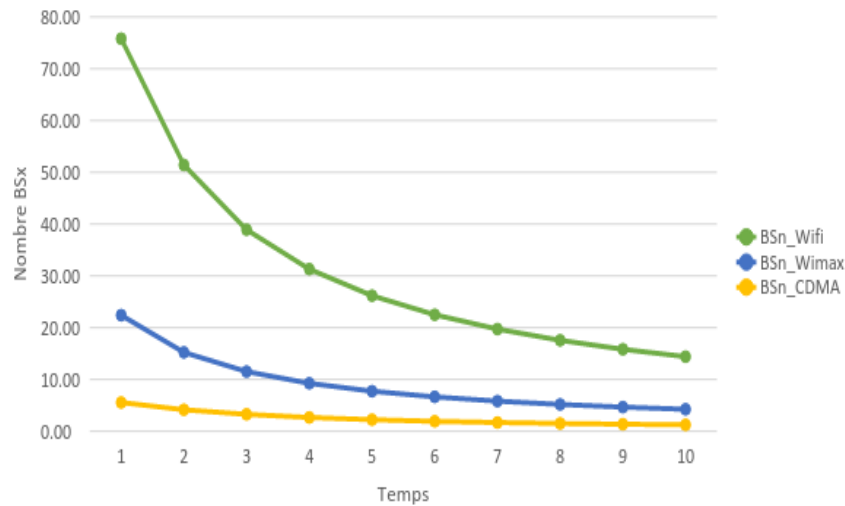


Figure IV- 1 : Nombre de stations de base par technologie suivant une variation de la durée T et du coefficient réducteur r .

La Figure IV- 2 donne l'évolution des stations de base de trois technologies d'accès (WiFi, WiMAX et CDMA). Nous constatons que si la durée T est constante, la variation du coefficient réducteur r n'a pas un effet sur le nombre de BS_x . Le nombre de BS par technologie reste pratiquement constant même si r varie.

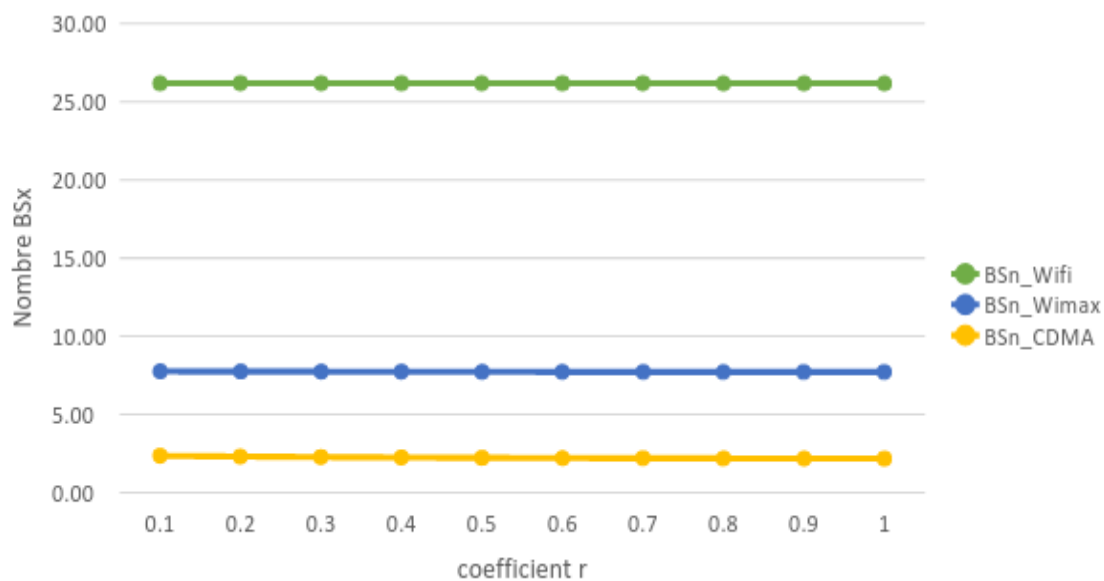


Figure IV- 2 : Nombre des stations de base par technologie selon le coefficient réducteur.

Le Tableau IV- 4 et la Figure IV- 3 donnent le nombre de stations de base par technologie de la zone de l’Ouaddaï selon la variation du paramètre m . La variation de ce paramètre indique la politique de déploiement à envisager (orientée couverture ou capacité).

Tableau IV- 4: Détermination du nombre de station BS n par technologie suivant la variation de m .

| m | tu | Sc | Bpa | BSn_WiFi | BSn_WiMAX | BSn_Cdma |
|----------|-----------|-----------|-------------|-----------------|------------------|-----------------|
| 0 | 0.99 | 36685 | 86046166.78 | 869 153.20 | 2897177.333 | 1358051.87 |
| 0.1 | 0.99 | 36685 | 86046166.78 | 810 457.11 | 2607477.85 | 1222247.42 |
| 0.2 | 0.99 | 36685 | 86046166.78 | 751 761.02 | 2317778.38 | 1086442.96 |
| 0.3 | 0.99 | 36685 | 86046166.78 | 693 064.93 | 2028078.90 | 950638.503 |
| 0.4 | 0.99 | 36685 | 86046166.78 | 634 368.84 | 1738379.42 | 814834.046 |
| 0.5 | 0.99 | 36685 | 86046166.78 | 575 672.75 | 1448679.94 | 679029.588 |
| 0.6 | 0.99 | 36685 | 86046166.78 | 516 976.66 | 1158980.46 | 543225.131 |
| 0.7 | 0.99 | 36685 | 86046166.78 | 458 280.58 | 869280.98 | 407420.674 |
| 0.8 | 0.99 | 36685 | 86046166.78 | 399 584.49 | 579581.51 | 271616.217 |
| 0.9 | 0.99 | 36685 | 86046166.78 | 340 888.40 | 289882.03 | 135811.759 |
| 1 | 0.99 | 36685 | 86046166.78 | 282 192.31 | 182.55 | 7.30195064 |

La Figure IV.3 illustre l’évolution du nombre de stations de base de trois technologies suivant l’approche de déploiement orientée vers des objectifs de couverture et/ou de capacité. Quand m varie, nous notons que pour une technologie X , le nombre nécessaire de station varie de manière significative. Il est à signaler que pour les deux valeurs extrêmes (0 et 1) de m , le nombre de BS décroît de manière très importante selon la technologie X , ceci démontre qu’il est plus facile de remplir les objectifs de couverture que ceux liés à la qualité de service et la capacité. Ainsi nous remarquons que la technologie CDMA permet d’atteindre plus facilement les objectifs de couverture par contre le WiFi et WiMAX sont plus efficaces pour un déploiement orienté capacité.

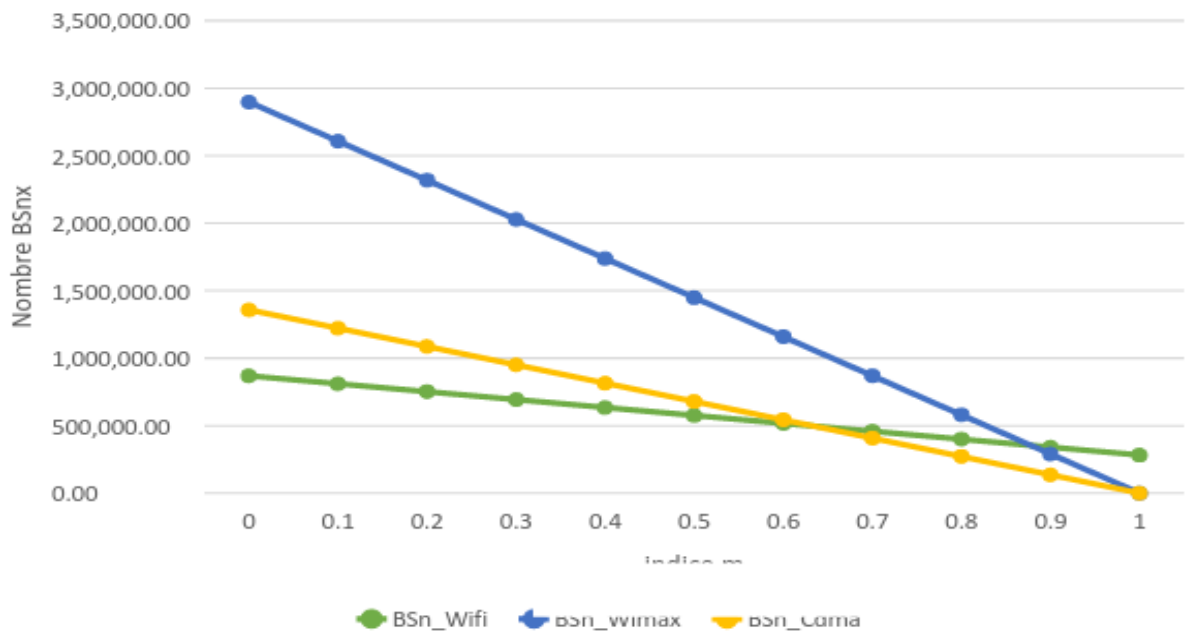


Figure IV- 3 : Evolution du nombre des stations de base par technologie selon la variation de m.

IV.2 Impact de la technologie d'accès radio sur l'UAI d'une localité

L'évaluation des efforts consentis pour rendre accessible, sur l'étendue d'un territoire, les technologies de l'information et de la communication est une nécessité.

On se propose d'introduire un modèle permettant d'évaluer l'impact des technologies radio sur l'indice d'Accès Universel d'une zone, selon le choix d'une solution radio donnée, cette métrique permet d'introduire des actions correctives pour augmenter l'indice d'Accès Universel d'une localité. Pour ce faire, le modèle de dimensionnement des besoins en couverture et en bande passante d'une localité, développé précédemment a servi de base pour intégrer les paramètres liés à la correction de l'indice d'accès universel.

Pour rappel, la nécessité et l'utilité de l'Accès et du Service Universel ont été relayées par plusieurs travaux de l'UIT et des agences de soutien au service universel. Les travaux de l'IUT constituent la référence en la matière et sont de première importance. On peut citer entre autres l'élaboration en février 2015 du guide des bonnes pratiques pour assister les pays dans la politique d'Accès Universel [20]. Ainsi plusieurs pays ont pu mettre en place un département ou une agence essentiellement dédiée à l'accès et au Service Universel [63][64]. Des fonds sont dégagés en conséquence pour mettre en œuvre des projets visant à réduire le gap territorial d'accès et de service au sein du pays. La banque mondiale a proposé un document sur les stratégies pour la large bande [2]. L'effort des pays dans le déploiement des solutions d'accès numérique est évalué par l'indice d'Accès Universel (DAI) [9]. Le DAI fait l'objet de

publication régulière par année de l'UIT. Il est certes un bon indicateur mais il se révèle insuffisant pour ressortir les disparités territoriales en matière de service et d'Accès Universel au sein du pays considéré. C'est pour cette raison qu'un autre indicateur a été proposé dans le chapitre 3 de cette thèse [42].

Dans le chapitre 4, nous avons montré l'importance du choix de la technologie et de la stratégie globale en fonction de la disponibilité du fond d'accès et de Service Universel [65][66]. Les approches de déploiement de centres communautaires intégrant tous les services ont été utilisées pour améliorer l'indice d'accès universel. Il a été montré la pertinence de la stratégie pour une augmentation de la valeur de l'indice. Toutefois, il reste encore à étudier de manière plus approfondie l'impact direct du choix des solutions technologiques d'accès aux réseaux proposées sur le marché.

C'est pour cela qu'on aborde, dans ce chapitre, l'élaboration d'un modèle intégrant l'indice d'Accès Universel et dégageant la fonction correctrice qui permet d'optimiser le choix de la solution radio appropriée pour accroître la valeur de l'indicateur dans une localité d'une zone donnée.

IV.2.1 Proposition d'un modèle d'évaluation de l'impact de la technologie sur l'UAI

Dans ce paragraphe, nous présentons l'expression de l'indice d'Accès Universel sur la base d'un déploiement de solution technologique de type radio afin de réduire le gap numérique lié à l'accès universel. A partir de l'expression obtenue, on en déduit la fonction correctrice permettant d'optimiser cet indice.

Rappelons l'expression développée précédemment du nombre de stations de bases nécessaires pour assurer l'Accès Universel dans une localité :

$$N_{BS} = m \frac{S_l}{2\pi R_{BS}^2} + (1-m) \frac{C_l}{c_{BS}} \quad (4.37)$$

où S_l indique la surface de la localité, C_l indique la capacité requise en bande passante de la localité, R_{BS} le rayon de couverture de la technologie radio considérée, c_{BS} la capacité de la technologie radio considérée, m un paramètre indiquant le pourcentage de couverture assuré.

La capacité requise en bande passante de la localité C_l et le paramètre m peuvent s'exprimer en fonction des taux de connexions individuelles et des centres communautaires de la localité donnée par [42] :

$$C_l = S_{pp} B_{pp} N + S_{pc} B_{pc} N_{pc} \quad (4.38)$$

$$m = S_{pc} \quad (4.39)$$

où S_{pp} est le taux de connexion individuel, B_{pp} , la bande passante requise par connexion, N est la population de la localité considérée, S_{pc} est le taux de centres communautaires, B_{pc} est la bande passante requise par centre communautaire, N_{pc} est le nombre de centres communautaires requis pour garantir un Accès Universel total.

Dans le contexte d'un coût d'acquisition élevé d'une connexion individuelle, l'identification de m à S_{pc} est une approche qui se justifie en considérant :

- qu'une moitié de la localité est couverte et disposerait de centre communautaire. Cela revient à poser $m=S_{pc}=0.5$;
- un déploiement du nombre de centres communautaires requis suppose une couverture totale, soit $m=S_{pc}=1$;
- une absence de centres pourrait aussi signifier l'absence totale de couverture radio.

L'introduction de (4.38) et (4.39) dans (4.37) donne :

$$N_{BS} = S_{pc} \frac{S_l}{2\pi R_{BS}^2} + (1-S_{pc}) \frac{S_{pp} B_{pp} N + S_{pc} B_{pc} N_{pc}}{c_{BS}} \quad (4.40)$$

$$\begin{aligned} &= S_{pc} \left(\frac{S_l}{2\pi R_{BS}^2} - \frac{S_{pp} B_{pp} N}{c_{BS}} \right) - S_{pc}^2 \frac{B_{pc} N_{pc}}{c_{BS}} + \frac{S_{pp} B_{pp} N}{c_{BS}} + S_{pc} \frac{B_{pc} N_{pc}}{c_{BS}} \\ &= S_{pc} \left(\frac{S_l}{2\pi R_{BS}^2} - \frac{S_{pp} B_{pp} N}{c_{BS}} + \frac{B_{pc} N_{pc}}{c_{BS}} \right) - S_{pc}^2 \frac{B_{pc} N_{pc}}{c_{BS}} + S_{pp} \frac{B_{pp} N}{c_{BS}} \\ &= -S_{pc}^2 \frac{B_{pc} N_{pc}}{c_{BS}} + S_{pc} \left(\frac{S_l}{2\pi R_{BS}^2} + \frac{B_{pc} N_{pc}}{c_{BS}} \right) + S_{pp} \frac{B_{pp} N}{c_{BS}} - S_{pp} S_{pc} \frac{B_{pp} N}{c_{BS}} \end{aligned} \quad (4.41)$$

On peut déduire de l'expression de l' UAI_l le produit $S_{pp}S_{pc}$ comme suit [6] :

$$UAI_l = S_{pp} + (1-S_{pp})S_{pc} \quad (4.42)$$

$$S_{pp}S_{pc} = S_{pp} + S_{pc} - UAI_l \quad (4.43)$$

Ainsi le nombre de stations de base peut être réécrite sous la forme :

$$\begin{aligned}
N_{BS} &= -S_{pc}^2 \frac{B_{pc} N_{pc}}{c_{BS}} + S_{pc} \left(\frac{S_l}{2\pi R_{BS}^2} + \frac{B_{pc} N_{pc}}{c_{BS}} \right) + S_{pp} \frac{B_{pp} N}{c_{BS}} - (S_{pp} + S_{pc} - UAI_l) \frac{B_{pp} N}{c_{BS}} \\
&= -S_{pc}^2 \frac{B_{pc} N_{pc}}{c_{BS}} + S_{pc} \left(\frac{S_l}{2\pi R_{BS}^2} + \frac{B_{pc} N_{pc}}{c_{BS}} - \frac{B_{pp} N}{c_{BS}} \right) + UAI_l \frac{B_{pp} N}{c_{BS}} - S_{pp} \frac{B_{pp} N}{c_{BS}}
\end{aligned} \tag{4.44}$$

On en déduit l'expression explicite de l' UAI_l basée sur une technologie radio par :

$$\begin{aligned}
UAI_l &= S_{pp} + N_{BS} \frac{c_{BS}}{B_{pp} N} + S_{pc}^2 \frac{B_{pc} N_{pc}}{B_{pp} N} - S_{pc} \frac{c_{BS}}{B_{pp} N} \left(\frac{S_l}{2\pi R_{BS}^2} + \frac{B_{pc} N_{pc}}{c_{BS}} - \frac{B_{pp} N}{c_{BS}} \right) \\
&= S_{pp} + N_{BS} \frac{c_{BS}}{B_{pp} N} + S_{pc}^2 \frac{B_{pc} N_{pc}}{B_{pp} N} + S_{pc} \left(1 - \frac{c_{BS} S_l}{B_{pp} N 2\pi R_{BS}^2} - \frac{B_{pc} N_{pc}}{B_{pp} N} \right)
\end{aligned} \tag{4.45}$$

On peut admettre l'approximation suivante ;

$$S_l \approx 2\pi N_{pc} R_{pc}^2 \tag{4.46}$$

$$N_{pc} \approx \frac{S_l}{2\pi R_{pc}^2} \tag{4.47}$$

Soit,

$$\begin{aligned}
UAI_l &= S_{pp} + N_{BS} \frac{c_{BS}}{B_{pp} N} + S_{pc}^2 \frac{B_{pc} N_{pc}}{B_{pp} N} + S_{pc} \left(1 - \frac{c_{BS} S_l}{B_{pp} N 2\pi R_{BS}^2} - \frac{B_{pc} N_{pc}}{B_{pp} N} \right) \\
&= S_{pp} + N_{BS} \frac{c_{BS}}{B_{pp} N} + S_{pc}^2 \frac{B_{pc} S_l}{2\pi R_{pc}^2 B_{pp} N} + S_{pc} \left(1 - \frac{c_{BS} S_l}{B_{pp} N 2\pi R_{BS}^2} - \frac{B_{pc} S_l}{2\pi R_{pc}^2 B_{pp} N} \right) \\
&= S_{pp} + N_{BS} \frac{c_{BS}}{B_{pp} N} + S_{pc}^2 \frac{B_{pc} S_l}{2\pi B_{pp} N R_{pc}^2} + S_{pc} \left[1 - \frac{S_l}{2\pi B_{pp} N} \left(\frac{c_{BS}}{R_{BS}^2} + \frac{B_{pc}}{R_{pc}^2} \right) \right]
\end{aligned} \tag{4.48}$$

L'expression de UAI est donnée par :

$$\begin{aligned}
UAI &= \frac{\sum_l UAI_l > T_{UAI}}{\sum_l} \\
&= \frac{1}{\sum_l} \sum_l \left(S_{pp} + N_{BS} \frac{c_{BS}}{B_{pp} N} + S_{pc}^2 \frac{B_{pc} S_l}{2\pi B_{pp} N R_{pc}^2} + S_{pc} \left[1 - \frac{S_l}{2\pi B_{pp} N} \left(\frac{c_{BS}}{R_{BS}^2} + \frac{B_{pc}}{R_{pc}^2} \right) \right] \right) > T_{UAI} \\
&= 1 - \frac{1}{\sum_l} \left(\left[S_{pp} + \sum_l \left(N_{BS} \frac{c_{BS}}{B_{pp} N} + S_{pc}^2 \frac{B_{pc} S_l}{2\pi B_{pp} N R_{pc}^2} + S_{pc} \left[1 - \frac{S_l}{2\pi B_{pp} N} \left(\frac{c_{BS}}{R_{BS}^2} + \frac{B_{pc}}{R_{pc}^2} \right) \right] \right) \right] < -T_{UAI} \right] + \sum_l \right) \\
&= 1 - f(X)
\end{aligned} \tag{4.49}$$

IV.2.2 Détermination de la fonction corrective

L'expression équivalente de la fonction correctrice $g(X)$ développée dans le chapitre précédent, au paragraphe II.2.2, et permettant d'optimiser l'indice d'Accès Universel se présente alors comme suit [65] :

$$g(X) = \sum_l l - \left[\sum_l (S_{pp} + N_{BS} \frac{c_{BS}}{B_{pp}N} + S_{pc}^2 \frac{B_{pc}S_l}{2\pi B_{pp}NR_{pc}^2} + S_{pc} \left[1 - \frac{S_l}{2\pi B_{pp}N} \left(\frac{c_{BS}}{R_{BS}^2} + \frac{B_{pc}}{R_{pc}^2} \right) \right]) \right] > T_{UAI} \quad (4.50)$$

La minimisation de la fonction correctrice $g(X)$ équivaut à maximiser la fonction $h(X)$ suivante :

$$h(X) = \sum_l (S_{pp} + N_{BS} \frac{c_{BS}}{B_{pp}N} + S_{pc}^2 \frac{B_{pc}S_l}{2\pi B_{pp}NR_{pc}^2} + S_{pc} \left[1 - \frac{S_l}{2\pi B_{pp}N} \left(\frac{c_{BS}}{R_{BS}^2} + \frac{B_{pc}}{R_{pc}^2} \right) \right]) > T_{UAI} \quad (4.51)$$

où la technologie $X = (N_{BS}, R_{BS}, c_{BS})$ est fonction de la combinaison des trois variables.

En combinant les expressions (4.50) et (4.51), on déduit la fonction correctrice globale relative aux trois localités comme suit :

$$h(X) = \sum_l (S_{pp} + N_{BS} \frac{c_{BS}}{B_{pp}N} + S_{pc}^2 \frac{B_{pc}S_l}{2\pi B_{pp}NR_{pc}^2} + S_{pc} \left[\frac{S_l}{2\pi B_{pp}N} \left(\frac{c_{BS}}{R_{BS}^2} + \frac{B_{pc}}{R_{pc}^2} \right) - 1 \right]) > T_{UAI} \quad (4.52)$$

IV.3 Mise en œuvre de l'évaluation de l'impact de la technologie d'accès Radio sur l'UAI d'une localité

Afin de valider l'approche proposée, nous considérons dans ce paragraphe le cas de la zone de Ouaddaï étudié précédemment dans le chapitre 3 et dont les caractéristiques recherchées ont été fournies dans le Tableau IV- 1.

Les technologies considérées et les caractéristiques nécessaires pour cette application sont présentées dans le Tableau IV- 5 :

Tableau IV- 5: Caractéristiques techniques des équipements par technologie.

| Data | WIFI | WIMAX | LTE |
|--|-------|-------|-------|
| R_{BS} (Km) | 0.5 | 15 | 15 |
| Surface couverte par les Stations de Base (BS) (S_{BSC}) km ² | 0.785 | 706,5 | 706,5 |
| Capacité des BS ($CapBS_x$) (Mbps) | 100 | 50 | 150 |

Les Figure IV- 4, Figure IV- 5 et Figure IV- 6 montrent l'évolution de l'UAI des trois localités en fonction du nombre de stations de base de chaque technologie.

Il ressort sur la Figure IV- 4, après comparaison de l'UAI des trois localités suivant la répartition des stations de base de la technologie WiFi, que l'UAI des localités 1 et 3 atteint presque la valeur 1 après installation de 12500 bornes WiFi, alors que la localité 2 à $UAI=0,5$ au même

nombre de bornes WiFi installées. Cet écart se justifie du fait que la localité 3 a une superficie presque double et une population triple de la localité 2.

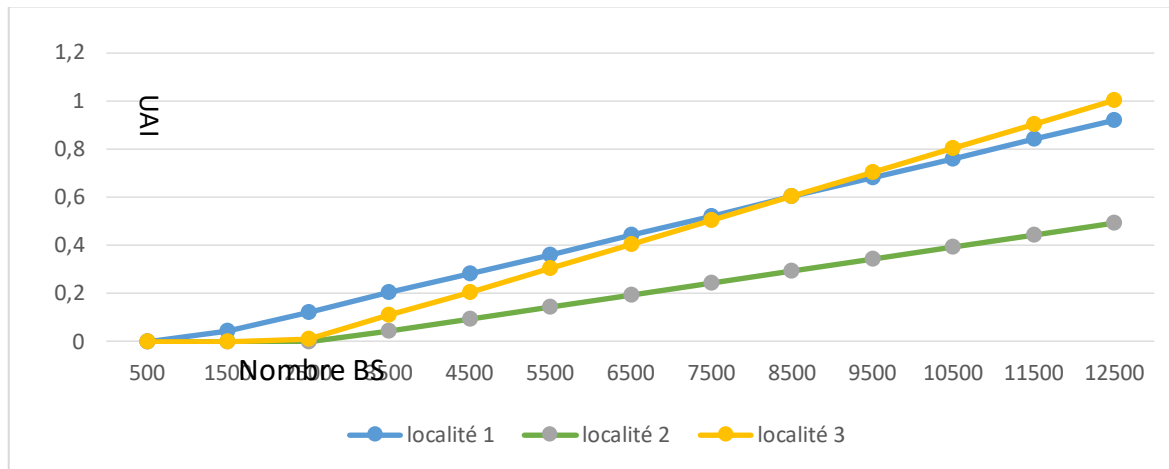


Figure IV- 4 : Evolution de l'UAI des localités en fonction du nombre des stations de base (BS) de la technologie WiFi.

La Figure IV- 5 montre que la localité 3 est la première à avoir un $UAI=1$ après installation de plus 290 stations de base WiMAX tandis que la localité 2 vient en deuxième position avec 960 stations de base. Par contre les spécificités de la localité 1 (besoin énorme de bande passante) et les limites en capacité de la technologie WiMAX ne permettent à cette localité d'avoir un UAI idéal 1 qu'après déploiement de 1620 stations de base. Au regard des résultats de cette figure, ce nombre ne représente que 13% environ du nombre requis avec le WiFi, ceci peut ressortir l'importance d'avoir un plus grand rayon de couverture dans les zones où il faut assurer l'accès et le service universel.

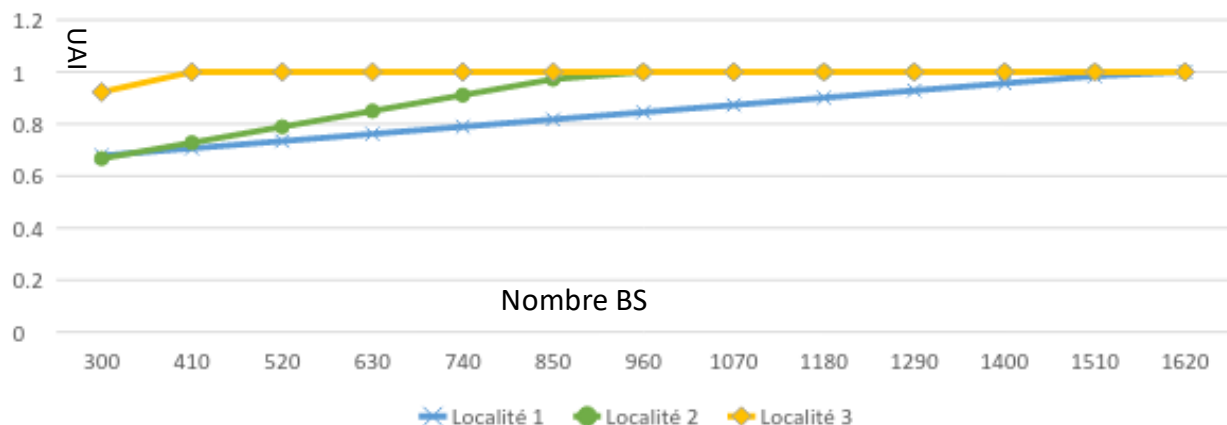


Figure IV- 5 : Evolution de l'UAI des localités en fonction du nombre des stations de base (BS) de la technologie WiMAX.

La Figure IV- 6 montre qu'après déploiement de plus de 60 stations eNode, toutes les localités atteignent un indice acceptable de 0,6. Cette figure confirme également le constat de la Figure IV- 5 par rapport aux besoins en bande passantes assez élevés de la localité 1, il est nécessaire de déployer un nombre important (560) de eNode pour avoir un indice idéal. On peut noter ici l'avantage en termes de capacité de la LTE par rapport au WiMAX, bien qu'ayant le même rayon de couverture. Ceci explique pourquoi il requiert moins de la moitié des stations radio pour satisfaire les mêmes besoins.

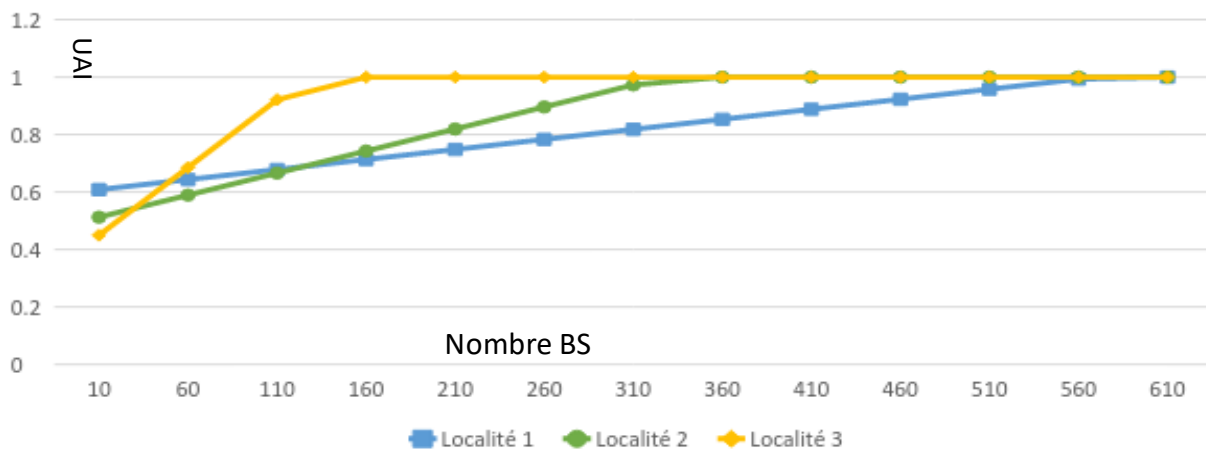


Figure IV- 6 : Evolution de l'UAI des localités en fonction du nombre des stations de base (eNode) de la technologie LTE.

La Figure IV- 7 illustre l'évolution de l'UAI global de la zone de Ouaddaï de la technologie WiMAX et LTE en fonction des taux de centre communautaires. Dans ce cas, en complément des trois figures précédentes où l'accent a été mis sur le nombre de connexions individuelles à travers la variation du nombre des stations de base et pour lequel un nombre moyen (10) de connexion individuelle par station a été considéré pour un taux fixé de centres communautaires déployés, la figure IV-7 montre l'impact du nombre de centre communautaires (S_{pc}) sur l'évolution de l'UAI global de la zone pour une possibilité de connexions individuelles connues. Après analyse de cette figure, il ressort que l'UAI global pour la technologie LTE atteint la valeur idéale pour un S_{pc} de 0,55 et celui de la technologie WiMAX prend la valeur idéale pour $S_{pc}=0,7$. On constate en comparaison de ces deux cas, l'impact important de déploiement de centres communautaires de connexions mutualisés sur l'évolution de l'UAI des localités.

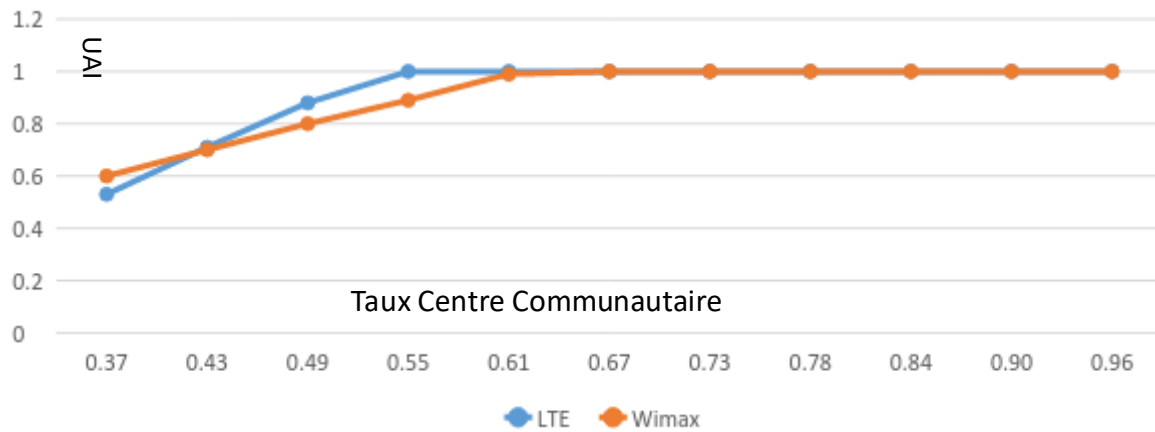


Figure IV- 7: Evolution de l'UAI global en fonction des centres communautaires selon la technologie LTE et WiMAX.

Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons proposé une approche permettant de déterminer un modèle optimal d'architecture réseau basé sur les technologies radio pour l'accès et le service universel. Les raisons qui nous guident à la proposition d'une telle approche sont issues de l'évaluation de l'indice *UAI* (Universal Access Index) des zones nécessitant une correction [65] pour améliorer le niveau de développement des TICs en tenant compte des contraintes technico-économiques intrinsèques à chaque localité. Cette nouvelle approche novatrice permet sur la base des "inputs" propres à chaque localité de déterminer les besoins en communication en termes de débit, de bande passante, et du nombre des équipements nécessaires par technologie. Ces derniers ont permis d'évaluer les coûts des investissements et des opérations, de projeter le chiffre d'affaires, de déduire le Fonds de Service Universel (FSU) nécessaire afin de proposer un modèle optimal d'architecture réseau basé sur les technologies radio.

La deuxième contribution du présent chapitre est l'élaboration d'une expression analytique de l'indice d'Accès Universel basée sur une technologie radio d'une localité donnée. Une fonction corrective permettant d'optimiser l'accès en a été dérivée. L'étude de cas réalisée montre l'impact du taux de déploiement de centres communautaires sur l'indice d'Accès Universel, sur des conditions de nombres de stations de bases financés par le fonds d'accès et de service universel. Pour un choix judicieux d'une technologie corrective, cette étude reflète également

que pour une valorisation optimale de l'indice *UAI* d'une localité *X*, il faut une analyse objective préalable des besoins spécifiques de ladite localité.

Après une première application de la première approche à la zone de l'Ouaddaï située au Tchad, il se dégage que la politique de déploiement graduel (réparti sur une durée *T*) du réseau est moins coûteuse. Aussi, nous relevons que la technologie CDMA permet d'atteindre plus facilement les objectifs de couvertures. Par contre le WiFi et WiMAX sont plus efficaces pour un déploiement orienté capacité, ainsi on note que les technologies radio en général pourraient être conseillées pour l'atteinte plus efficace des objectifs de couverture.

Aussi, une seconde étude de cas de la même zone du Ouaddaï a été faite pour déterminer la technologie radio optimale. Il se dégage que toutes technologies radio étudiées dans ce contexte permettent d'améliorer l'*UAI* mais à des coûts différents.

Il en ressort aussi que chaque solution technologique radio présente des avantages et des inconvénients. Toutefois, hormis son coût, l'option de solutions LTE pour l'Accès Universel large bande pour les zones rurales mérite une attention particulière du point de vue technique, puisqu'elle requiert le moins de stations radio.

CHAPITRE 5 : Architectures radio NGN-Cloud et Modèle Optimal d'Architecture réseau basée sur les technologies hybrides

Introduction

Pour rappel, l'évolution technologique remarquable qu'a été l'apparition des systèmes de transmissions optiques avec maîtrise de l'atténuation optique, a initié les transmissions à longue portée et l'ascension au haut débit. Ceci a permis de diversifier et simplifier les moyens de vulgarisation du UAS.

En effet, la première fibre commercialisée vers 1980 était multimode et opérait dans la fenêtre de longueur d'onde $0,8\mu\text{m}$ avec un débit d'environ 45 Mbit/s. Après l'arrivée de la fibre monomode émettant aux alentours de $1,3\mu\text{m}$, le débit de transmission est passé à 1,7Gbit/s avec une atténuation de 0,5 dB/km, très peu de dispersion et un espacement entre répéteurs de 50km [13][15][16].

Ces mêmes fibres monomodes, si elles étaient exploitées dans la fenêtre optique avec plage spectrale située autour de $1,5\mu\text{m}$, permettaient une transmission avec des pertes linéiques encore plus faibles (0,2dB/km) mais avec une dispersion qui atteignait alors 17ps/nm/km. Cette fenêtre de transmission en bande *C* a été grandement exploitée jusque-là entre autres grâce au développement de la fibre optique à dispersion décalée DSF (Dispersion Shifted fiber) permettant d'atteindre un débit de 2,5Gbit/s. Mais très vite, les besoins de montée en débit se sont fait sentir pour répondre au besoin des services mis en place. Et la génération/régénération et amplification optoélectronique pour un seul canal ont montré leurs limites et ont été des facteurs limitatifs. Les amplificateurs optiques EDFA (Erbium Dopped Fiber Amplifier) ont remplacé les amplificateurs optoélectroniques ce qui a permis d'atteindre des débits de 10Gbit/s et des distances de transmission jusqu'à 10 000km. Au-delà, l'exploitation du multiplexage en longueur d'onde WDM (Wavelength Division Mutiplex) a été mise en place pour augmenter le débit de transmission en additionnant la capacité de chaque canal. Cependant l'EDFA n'assurant qu'une fonction d'amplification, d'autres fonctions ont été ajoutées dans les répéteurs (tous les 60 à 100km) assurant la compensation de dispersion entre autres [16].

Sur la base de ces éléments, il est indéniable aujourd'hui que pour satisfaire les demandes de fort débit dans l'accès, on va de plus en plus avoir recours aux technologies optiques ou à des solutions hybrides optique/radio. Ceci permettrait de diversifier et simplifier les moyens de vulgarisation de l'accès et du Service Universel.

Dans cette partie des travaux, nous étudions les différentes technologies permettant de transmettre l'essentiel de l'information à des distances raisonnables et aux débits acceptables pour répondre aux attentes (services) du monde rural et particulièrement celui des pays d'Afrique Centrale. En outre, nous nous focaliserons sur l'étude des différentes technologies de transmissions optiques et/ou radio permettant d'offrir des services appropriés à grande distance. Pour ce faire, il est primordial de maîtriser les défis liés au développement de l'accès et du Service Universel, qui sont l'utilisation rationnelle des ressources des réseaux de transmission cœur puis métré, l'adaptation du réseau d'accès aux besoins spécifiques et l'orientation de l'infrastructure finale vers une structure hybride opto/RF si besoin. Simplifier au maximum l'architecture du système hybride (RoF), principalement la partie des conversions des signaux (E/O, O/E), analyser les différentes caractéristiques des fibres optiques, les techniques de modulation et modéliser les canaux sans fil (Wireless Channel) pour que la qualité de la couverture et le service en indoor comme outdoor soient conformes aux normes requises par l'UIT et les différents organes des régulations de l'Afrique Centrale.

Ainsi, pour parvenir à l'identification et à la maîtrise des défis précités, il serait nécessaire de mettre en place des simulations du système complet incluant un canal optique pour les structures support haut débit et longue distance et un canal Wireless pour distribuer les données vers des centres communautaires. Pour ce faire, nous allons utiliser un logiciel commercial VPISystem®. Dans ces travaux, seuls les modèles disponibles dans le logiciel seront testés et une évaluation de leur pertinence sera faite. Ce chapitre représente les prémices d'une démarche de simulation d'un lien complet qu'il faudrait approfondir et optimiser pour converger vers les solutions proposées au chapitre précédent.

Dans la suite de ce chapitre, une présentation du contexte et de la démarche méthodologique sera faite. Puis la description du système considéré sera proposée, suivie d'une étude de cas pratique relatif au modèle étudié et d'une conclusion.

V.1 Architectures radio NGN-Cloud appropriées à l'accès et au Service Universel

Le concept d'Accès et de Service Universel doit être fondé sur des aspects économiquement abordables et viables pour les utilisateurs et pour les opérateurs. De ce fait, il est nécessaire que la structure des réseaux soit remodelée et innovée dans le but de réduire leur complexité d'exploitation et de gestion afin de minimiser les coûts d'investissements et d'exploitations.

En effet, l'adaptation des réseaux de nouvelle génération (type NGN) aux contextes du Service et de l'Accès Universel est considéré comme une solution fiable pour parvenir aux résultats escomptés[67][69]. Aussi cela permettra non seulement d'ancrer la notion de large bande dans le concept d'Accès Universel mais aussi de proposer à toutes les populations cibles des services diversifiés, innovants et à moindre coût.

V.1.1 Convergence des technologies vers NGN favorisant l'Accès Universel (L'architecture NGN UA)

L'architecture NGN UA proposée dans ces travaux intègre toutes les spécificités de base d'un réseau NGN multimédia conventionnel [67], cependant il présente des différences aussi bien au niveau des technologies d'accès recommandées qu'au niveau des entités de contrôle et des technologies de transmission. En effet, dans cette architecture le softswitch SSWUA (SoftSwitch for Universal Access) sera un logiciel conçu pour gérer un réseau NGN orienté multimédia avec le strict minimum de services. C'est ainsi que les serveurs d'applications sont dimensionnés pour fournir uniquement des services de base pour l'Accès Universel et sont nommés ASUA (Applications Server for Universal Access). Les technologies allant de l'accès à la transmission seront toutes radios afin de minimiser les coûts de déploiement. Les technologies radios UMTS et LTE 4G sont exclues des propositions en zone d'accès car le prix de leur licence est très élevé et d'un point de vue réglementaire, les opérateurs d'Accès Universel ne peuvent se l'octroyer. Le dernier kilomètre est géré par les technologies de transmission VSAT avec O3B par exemple au cas où la zone d'accès serait sur des îlots ou fortement isolé par des montagnes et par Wimax si la visibilité entre le cœur IP/MPLS et la zone d'accès peut être obtenue afin de bénéficier de son rapport coût-efficacité sur le dernier kilomètre. Pour la sécurité entière du réseau étant donné que la transmission se fait par radio un serveur proxy doté de pare-feu sera déployé au niveau de l'Access Gateway afin d'éviter les intrusions.

Pour assurer une meilleure stabilité et fiabilité [70] aussi bien pour la circulation de la signalisation entre le SoftSwitch et le réseau que pour la connexion du réseau de l'opérateur au backbone national, nous proposons des liaisons par faisceaux hertziens ou VSAT/O3B selon que leurs localisations respectives soient accessibles ou pas (localisations du SSWUA par rapport au cœur et du cœur par rapport au backbone) compte tenu de leurs débits et de leurs meilleurs rapports coût-efficacités sur de longues distances.

Se basant sur le Tableau V- 1, on propose l'architecture de la Figure V- 1 qui intègre toutes les spécificités de base d'un réseau NGN multimédia conventionnel, cependant il présente des différences aussi bien au niveau des technologies d'accès recommandées qu'au niveau des entités de contrôle et des technologies de transmission.

Tableau V- 1 : Comparaison NGN et NGN UA

| | NGN Classique Multimédia | NGN UA |
|------------------------------|--|--|
| Technologies d'accès | XDSL, RNIS, PABX, UMTS, LTE, WIFI, WiMAX, CDMA 2000 | WIFI, WiMAX, CDMA Ev-Do, OpenBTS, Projet Loon |
| Technologies de transmission | Câble cuivre, Fibre optique, FH, VSAT | WiMAX, FH, VSAT, O3B |
| Services | VoD, IPTV, VoIP, Ring back tone Video/Audio, Internet, conférence video/audio, messagerie vocale | VoIP, Internet, Messagerie vocale, ring back tone audio |
| SoftSwitch | SoftSwitch (SSW) dimensionné pour contrôler toute la signalisation des différents accès listés plus haut. Le SoftSwitch a donc une intensité de traitement très élevé. | SoftSwitch UA (SSW UA) dimensionné pour contrôler toute la signalisation des différents accès du NGN UA. L'ensemble de ces accès ne nécessitent pas des flux de contrôle élevé. Le SSW UA a donc une intensité de traitement peu élevé |
| Signalisations | SSW-MSAN :SIP SSW-Trunking Gateway :MEGACO SSW-Application Server: SIP | SSWUA-MSAN :SIP SSWUA-Trunking Gateway :MEGACO SSWUA-Application Server UA:SIP |
| Application Server | Permettent de fournir l'ensemble des services listés plus haut | Application Server UA (AS UA) permet de gérer des services basiques comme la messagerie vocale, ring back tone voix |
| Autres | | Trunking Gateway et MSAN de petites capacités |

Comme indiqué dans la Figure V- 1 ci-dessous, pour assurer une meilleure stabilité et fiabilité de la signalisation entre le SoftSwitch et le backbone national nous proposons des liaisons par faisceaux hertziens ou VSAT/O3B selon les éléments précités au-dessus.

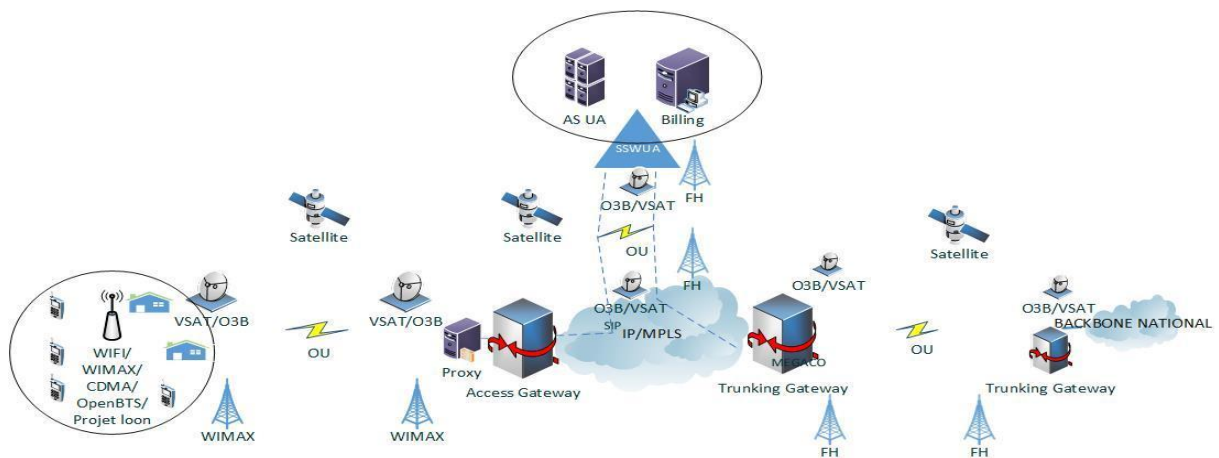


Figure V- 1: Architecture NGN UA

V.1.2 Architecture Cloud UA

L'architecture Cloud orienté service et Accès Universel (Cloud UA) se décompose en deux segments (Figure V- 2). Le premier concerne la zone d'accès cible et le second concerne les services du cloud qui pourraient être mis à la disposition de l'opérateur pour le fonctionnement des entités du réseau à savoir le contrôle, les organes de commutation et les bases de données. Ces deux segments sont exclusivement reliés par des liens radios. Ces liens peuvent être satellitaires ou terrestres selon le type et le niveau d'accessibilité de la zone. Les technologies radio proposées pour les zones d'accès sont entre autres CDMA EvDO, WiMAX WIFI, OpenBTS ou Projet Loon.

Afin de relier la zone d'accès cible aux organes délocalisés du réseau se trouvant sur des Cloud via internet, les technologies de transmission par Vsat, O3B, FH, et WiMAX sont proposées pour atteindre la passerelle de l'opérateur relié à Internet. Pour des soucis de sécurité, un serveur proxy et un pare-feu sont prévus au niveau de l'Access Gateway pour contrôler les flux.

L'analyse des types de services qu'offre le cloud computing [70] permet de conclure qu'on pourrait délocaliser les entités essentielles d'un réseau de télécommunications comme suit :

- entités de commutation et entités de contrôle: l'opérateur les délocalise en souscrivant à un cloud de type IaaS pour bénéficier de l'installation de système d'exploitation sur des serveurs distants, ce qui permettra d'installer des commutateurs logiciels mais aussi les applications de contrôle du réseau ;

- base de données: l'opérateur les délocalise en souscrivant à un cloud de type DaaS pour la gestion des bases de données ;
- organes de services réseaux: l'opérateur les délocalise en souscrivant à un cloud NaaS afin d'assurer la gestion des services réseaux nécessaires au transport des informations des utilisateurs sur le cœur IP.

Notons que pour des soucis de sécurité et de fiabilité du système, les opérateurs d'Accès Universel auront à souscrire à un cloud privé ou, à la limite, communautaire ne comprenant que des opérateurs d'Accès Universel afin de partager les coûts de souscription.

La Figure V- 2 représente une proposition d'architecture d'un cloud pour l'accès universel.

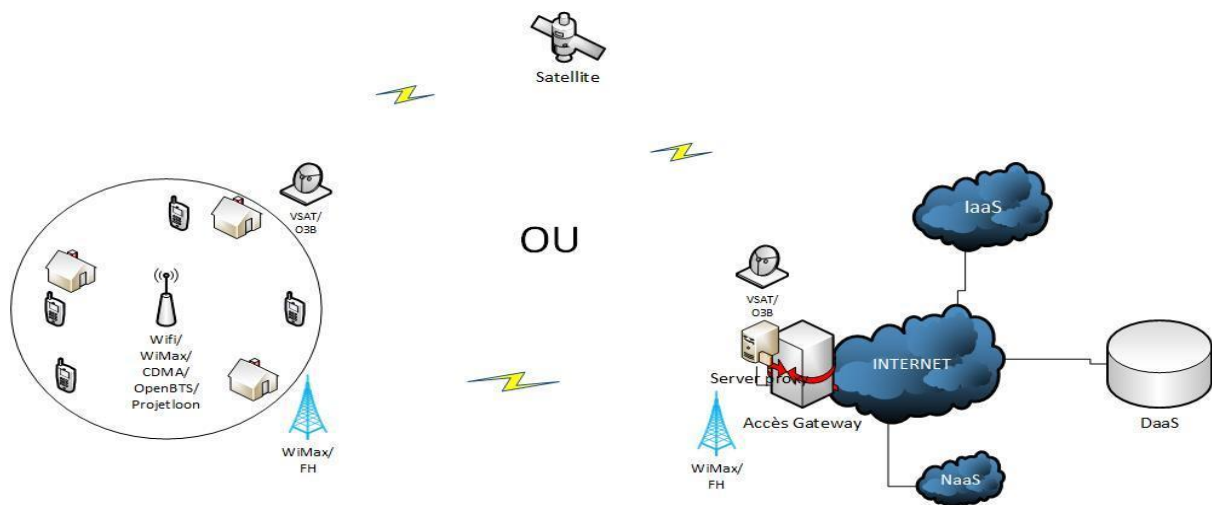


Figure V- 2 : Architecture Cloud UA

V.1.3 Global Architecture for Universal Access (GAUA)

L'architecture que nous proposons dans cette section, est une combinaison de la structure du NGN et de la puissance du cloud pour l'Accès Universel. Cette architecture se présente donc comme sur la Figure V- 3.

Elle décrit les mêmes spécificités que le NGN UA en délocalisant les organes de contrôle, de services réseaux et de bases de données sur des cloud pouvant gérer chacun de ces organes spécifiques. Notons que Les liaisons entre l'internet et le backbone national ainsi que celles avec les services de cloud ne sont pas gérés par l'opérateur d'Accès universel

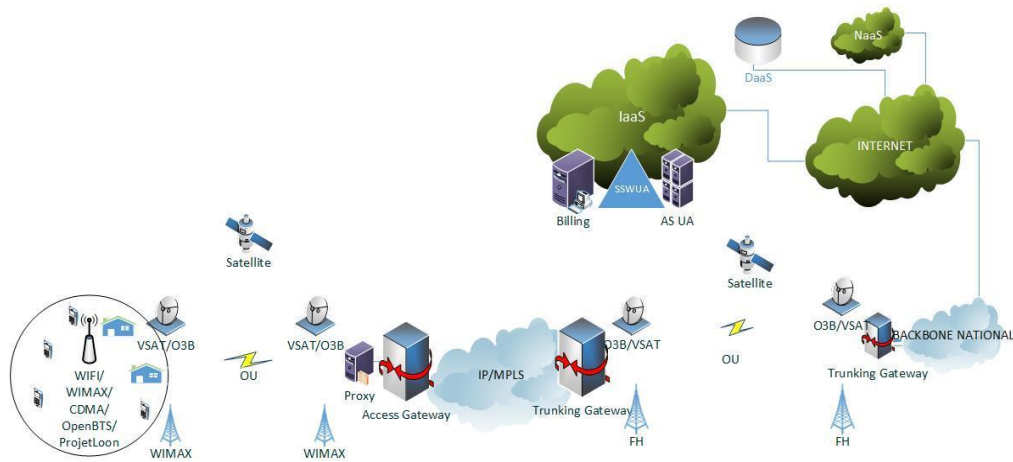


Figure V- 3 : Architecture GAUA

V.2 Modèle Optimal d'Architecture Réseau basée sur les Technologies Hybrides

Cette contribution porte sur l'investigation des systèmes hybrides fibre et radio adaptés au large bande pour le développement de l'Accès Universel. L'approche a consisté à essayer d'élaborer un modèle optique intégrant les nœuds de répétition/régénération le long d'une liaison dorsale avec des débits et des portées variables. Ce modèle sera combiné à un canal radio ayant à ses extrémités une station de base et un terminal d'un utilisateur donné. La méthodologie mise en œuvre consiste à développer la liaison à simuler pour et vérifier si VPISystem® est le logiciel adéquat pour les simulations des réseaux convergents optiques/RF, ceci en utilisant les modèles disponibles dans la librairie. Si ces travaux sont réalisables, les performances de différents types de technologies comme le WiFi, le WiMAX et le CDMA étudiées dans les chapitres précédents pourront alors être analysées tout en intégrant les données réelles d'un pays en développement. On attendrait de ces simulations qu'elles nous aident à apprécier la pertinence de l'étude dans le choix approprié des solutions radio et/ou fibre dans le contexte d'Accès Universel en Afrique Centrale.

V.2.1 Démarche Méthodologique

V.2.1.1 Rappel du contexte

On retient des travaux effectués lors de la modélisation de l'indice d'Accès Universel (UAI) [65] que pour assurer une accessibilité globale idéale dans une zone i , il faut que la solution technique envisagée intègre les contraintes économiques et géographiques spécifique de cette localité.

Aussi, les simulations (chapitres précédents) ont montré que plusieurs possibilités peuvent être envisagées pour remédier aux contraintes liées au développement de l'Accès Universel en Afrique centrale.

Toutefois le choix de la solution appropriée dépendra du coût C des technologies à déployer dans une zone i calculé sur la base de ses inputs.

Les résultats des premières simulations de l'UAI, nous orientent vers des solutions hybrides (réseaux de transmission fibre optique et réseaux de distribution et d'accès par radio).

Aussi, en se basant sur les récents travaux sur le modèle radio pour l'Accès Universel qui propose l'établissement d'un modèle optimal d'architecture réseau basée sur les technologies radio pour l'accès et le service universel, nous relevons que :

- Il est indispensable que l'architecture soit basée sur une approche méthodologique consistant à intégrer les différentes variables impliquées dans le choix des technologies radio pour l'accès et au service universel.
- L'approche méthodologique utilisée présente l'avantage de permettre d'aller vers une convergence technologique de type NGN dédié à l'accès et au service universel.
- Enfin l'approche permet aussi de déterminer les différents éléments du réseau d'accès puis du réseau de transmission et du modèle de rentabilité afin de proposer des architectures radio appropriées au service et à l'Accès Universel.

Cette approche novatrice a permis, sur la base des données propres à chaque localité, de déterminer les besoins en communication en termes de débit, de bande passante, et du nombre des équipements nécessaires par technologies. Ces derniers ont permis d'évaluer les coûts des investissements et des opérations, de projeter le chiffre d'affaires, de déduire le fonds de Service Universel (FSU) nécessaire afin de proposer un modèle optimal d'architecture réseau basé sur les technologies radio.

Après une première application de cette approche, il se dégage que la politique de déploiement graduel (réparti sur une durée T) du réseau est moins coûteuse. Aussi, la technologie CDMA permet d'atteindre plus facilement les objectifs de couvertures, par contre le WiFi et WiMAX sont plus efficaces pour un déploiement orienté capacité, ainsi on note que les technologies radio en général pourraient être conseillées pour l'atteinte plus efficace des objectifs de couverture en accès.

V.2.1.2 Méthodologie

Dans cette contribution, nous souhaitons proposer des solutions hybrides pouvant permettre l'atteinte d'objectifs de l'UAS des pays.

Pour parvenir aux résultats escomptés, nous allons :

- Étudier et simuler le réseau de transmission optique qui correspond aux données de terrain (bande passante, débit, etc.) ;
- Analyser les différentes caractéristiques des fibres optiques ainsi que les techniques de modulations ;
- Simplifier au maximum l'architecture du système hybride (RoF), principalement la partie des conversions des signaux (O/E, E/O);
- Modéliser les canaux sans fil (Wireless Channel) pour que la qualité de couverture et le service en indoor comme outdoor soit conforme aux normes requises par l'UIT et les différents organes de régulation de l'Afrique centrale.

V.2.2 Structure de la liaison (architecture de simulation)

La conception de l'architecture repose sur les principes suivants : adopter une solution de transmission à haut débit, offrant une fiabilité et une disponibilité élevées grâce aux moyens de transmission à fibres optiques aussi, proposer une solution d'accès adaptable aux contextes spécifiques des zones rurales et supportant les besoins en bande de l'Accès et du Service Universel tel que défini par l'UIT [8][9][10] .

Pour être en phase avec les défis réels et quotidiens du monde rural, Le but recherché avec cette simulation est de synthétiser les différents paramètres de transmission optique, étudier et analyser les différentes technologies radio d'accès et enfin proposer un schéma d'architecture réseau complet adapté aux besoins du monde rural et particulièrement aux populations rurales desservies par ledit projet. Ceci constitue la première partie de ce chapitre.

V.2.2.1 Liaison optique

Dans sa volonté de déployer le réseau, le Tchad vient de se doter d'une dorsale optique qui traverse le pays de part en part (Figure V- 4). Elle est en fin de déploiement et va servir d'input pour les simulations. Les données qui ont été utilisées ont été fournies par le constructeur lors de la passation de marché et restent confidentielles. C'est une liaison WDM de très grande

capacité qui fournit un pipeline de grande échelle 80×100G. Pour simuler l'étude qui nous intéresse, à savoir une liaison hybride, nous avons choisi de ne modéliser qu'une seule voie, pour plus de facilité, car il est possible de faire une extension à un système WDW facilement par la suite, si besoin.

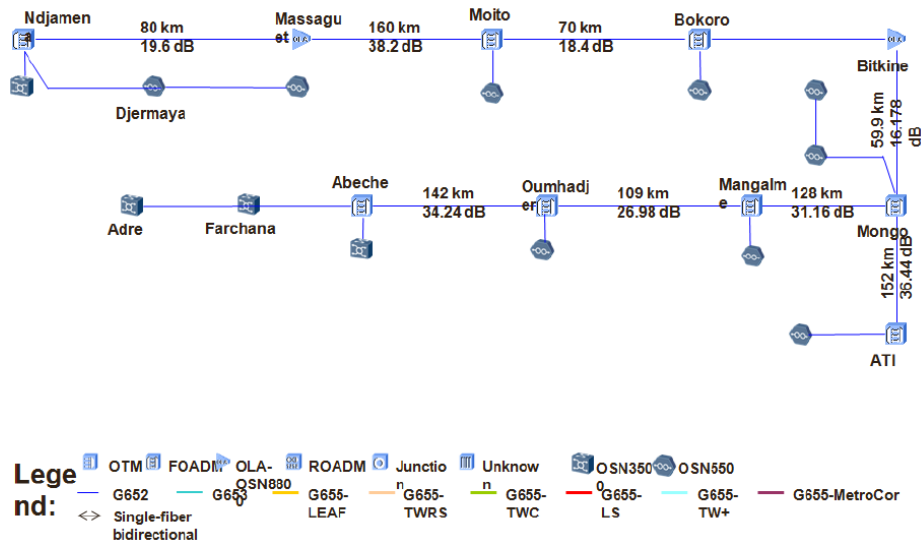


Figure V- 4 : Topologie du réseau Tchad en déploiement

Les données de cette liaison déployée ont pu être, pour partie, utilisées pour les simulations afin de représenter au mieux une liaison monocanal fibrée dont le synoptique est présenté sur la Figure V- 5. Elle est structurée en utilisant un émetteur à modulation externe, des boucles de transmission de longueur réglable comportant des amplificateurs type EDFA et des fibres de compensation. Un atténuateur est utilisé pour définir le taux de partage de la liaison.

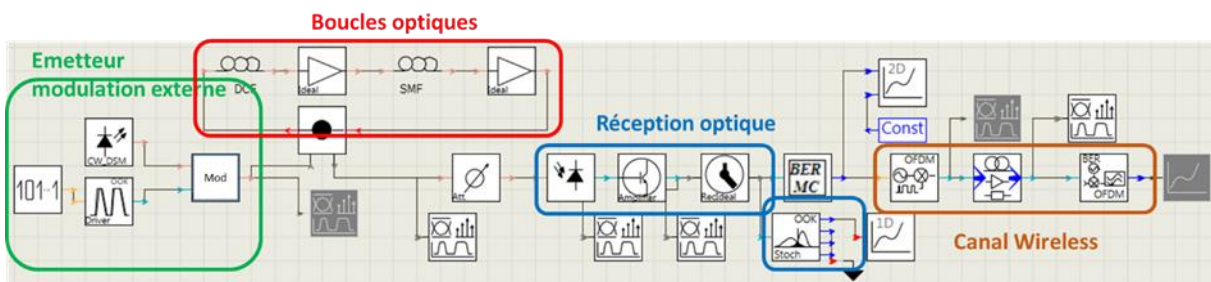


Figure V- 5 : Synoptique de la liaison simulée pour le cas étudié de liaison hybride

Pour des questions d'efficacité et de simplicité, nous avons d'abord testé la liaison optique seule afin d'évaluer les performances qu'elle permet avant d'attaquer le canal RF. A première étude a consisté à considérer une liaison sans répéteurs mais qui permet de tester deux types de modulateurs disponibles à savoir les modulateurs électro-absorbants (EAM ou MEA) et les modulateurs Mach-Zenhder (MZM). La technologie de réalisation, les dimensions et les coûts

L'étude a ensuite consisté à mettre en ligne des répéteurs qui incluent des fibres de compensation de dispersion (DCF) et des amplificateurs et en utilisant une boucle pour définir le nombre de span. Les longueurs de fibre de dispersion sont calculées pour compenser la dispersion et l'amplification est calculée pour compenser les pertes de la fibre monomode standard (G652). Les paramètres des fibres utilisées sont reportés sur le Tableau V- 2.

Tableau V- 2 : Paramètres des fibres utilisées (SMF et DCF)

| | Fibre SMF (G 652) | Fibre DCF |
|--------------------------------------|----------------------|----------------------|
| GroupRefractiveIndex | 1,47 | 1,45 |
| Attenuation (db/km) | 0,2 | 0,6 |
| Dispersion (ps/m ²) | 16 | -90 |
| DispersionSlope (ps/m ³) | 0,08.10 ³ | 0,21.10 ³ |
| NonLinearIndex (m ² /W) | 2,6.10 ²⁰ | 4.10 ²⁰ |
| CoreArea (m ²) | 80.10 ⁻¹² | 30.10 ⁻¹² |
| NoiseFigure (dB) | 6 | 6 |

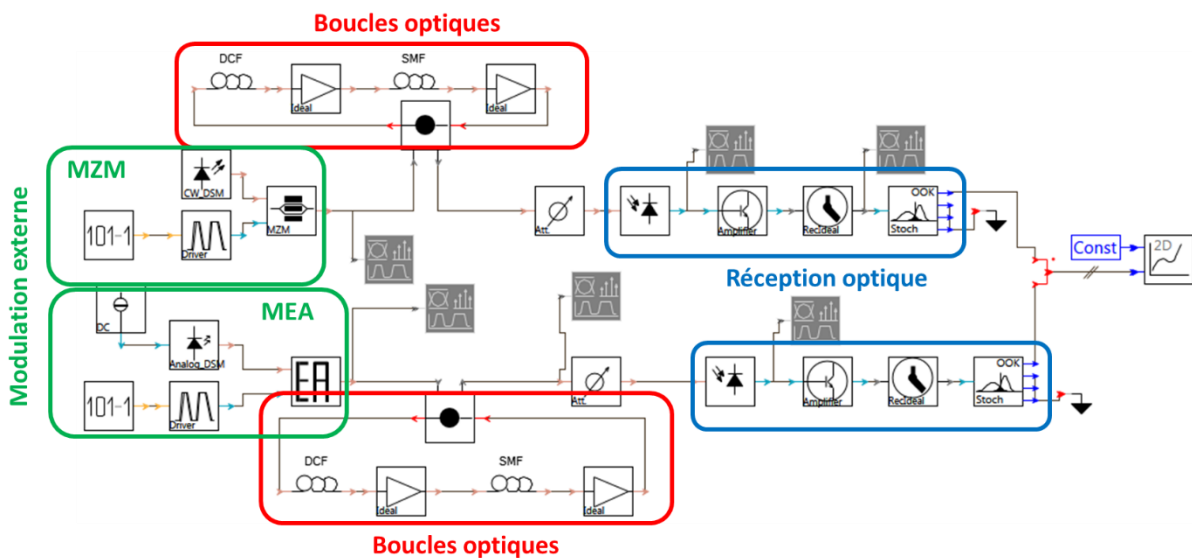


Figure V- 8 : Synoptique de la liaison avec modulation externe à base de MEA et MZM pour une liaison avec répéteurs à 2,5 Gb/s.

La Figure V- 9 rend compte des résultats obtenus pour une seule boucle à des débits de 2,5 Gb/s pour les 2 types de modulateurs. On observe que les résultats précédents ne sont pas confirmés.

En effet dès l'insertion d'amplificateurs (qui génèrent du bruit) et de fibre DCF, les performances des EAM sont similaires à celles des MZM.

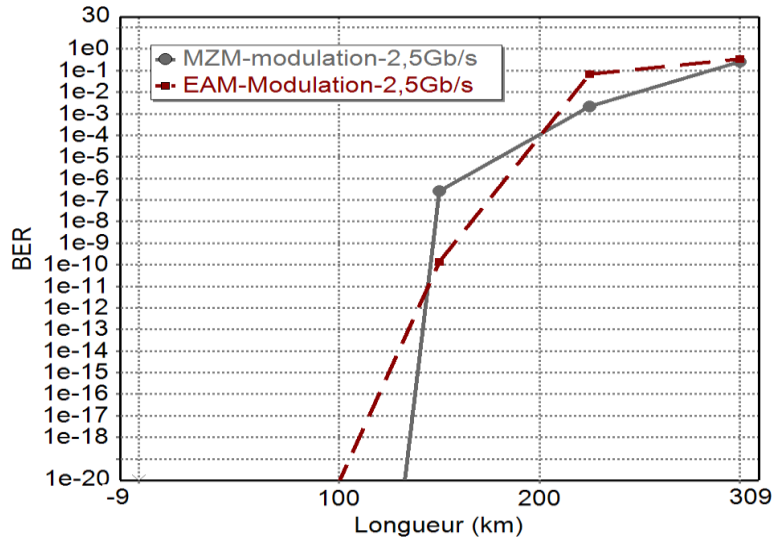


Figure V- 9 : Performances de la liaison avec modulation externe à base de MEA et MZM pour une liaison avec répéteurs à 2,5 Gb/s.

Pour pousser encore plus loin l'analyse, nous avons augmenté le nombre de passage dans la boucle pour augmenter le nombre de span et donc la distance (Figure V- 10).

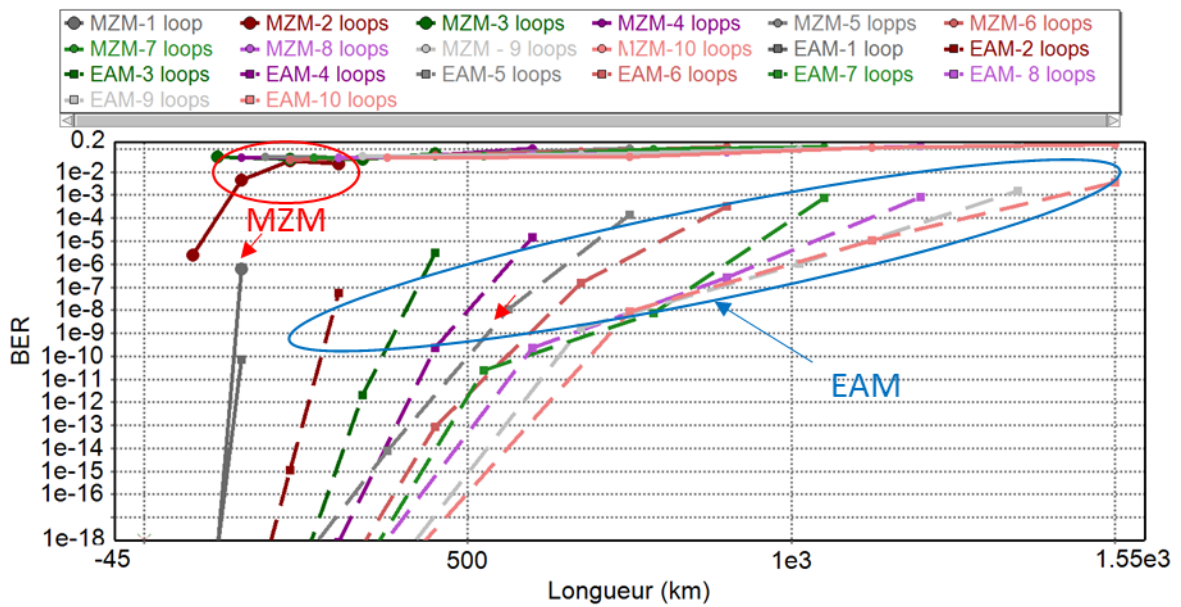


Figure V- 10 : Performances de la liaison avec modulation externe à base de MEA et MZM pour une liaison avec répéteurs à 2,5 Gb/s et un nombre croissant de boucles.

On observe que les performances sont meilleures avec les EAM et en adéquation avec les paramètres de la liaison déployée au Tchad (données confidentielles qu'on ne peut donner ici mais dont on dispose au niveau de l'ARCEP Tchad). Les modulateurs de type MZM commercialement disponibles doivent pouvoir tenir les mêmes performances aujourd'hui, cependant le modèle de la bibliothèque de VPISystem® n'est pas optimal et ne permet pas d'aboutir à des résultats cohérents.

De cette étude nous déduisons que nous utiliserons la liaison optique avec EAM pour faire l'étude vers la convergence Wireless dans le paragraphe suivant. La schématique choisie sera celle incluant les EAMs et les boucles avec répéteurs.

V.2.2.1 Canal Wireless

Un canal sans fil est utilisé en réseau d'accès pour arroser les zones rurales. En effet ce canal récupère le signal sortant du réseau de transmission optique après conversion. L'OFDM autour d'une porteuse est la modulation choisie pour transmettre les données issues de la ligne optique. Pour que le signal soit introduit sur le canal radio nous devons le convertir de signal réel en complexe et l'inverse est appliqué pour récupérer le signal à la sortie du canal Figure V- 11.

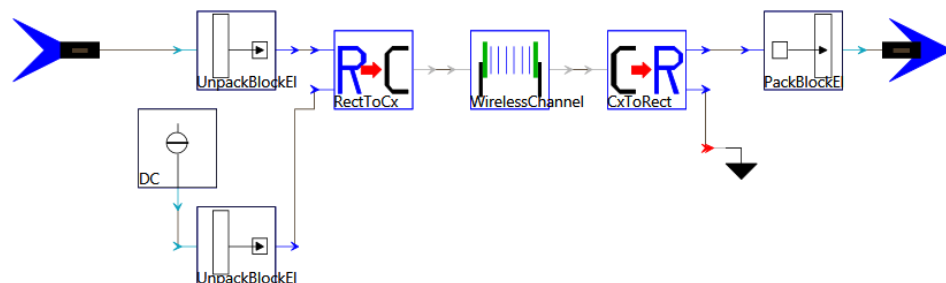


Figure V- 11:Modélisation du canal radio

Ainsi le signal récupéré est injecté dans le décodeur électrique OFDM afin d'évaluer les performances du système en utilisant les paramètres tels que l'amplitude du vecteur d'erreur (Error Vector Magnitude=EVM) ou le taux d'erreur symbole (SER). Ces paramètres peuvent être évalués suivant l'approche Monte Carlo (SER_MC) et l'approche gaussienne (SER_Gauss). Le modèle de canal disponible dans la bibliothèque permet de choisir si on est en lien Indoor ou Outdoor. Cependant, aucuns détails ne sont donnés dans le logiciel pour connaître la méthode utilisée pour modéliser ce canal.

Comme nous avons pu le montrer à la Figure V- 10, une distance de 1000 km peut être atteinte avec un débit de 2,5 Gb/s en liaison optique et un taux de partage de 64. Nous partirons de l'hypothèse que le TEB en bout de lien optique est très bon et que nous pouvons analyser les performances du canal wireless à l'issue de la détection des données NRZ qui sont recodées en OFDM autour d'une porteuse RF comme sur la Figure V- 5.

V.3 Etude de cas

Notre architecture de simulation est appliquée au projet en construction d'infrastructures du Tchad [27][28] selon la dorsale optique déployée sur l'axe N'Djaména Adré - Frontière Soudan avec une bretelle Mongo-Ati décrite dans le paragraphe II.3.1 couplée à une liaison wireless dont on va donner les caractéristiques ci-après.

V.3.1 Elaboration des différents paramètres du canal Wireless par type de technologie pour le modèle de VPI

Dans cette partie nous rappelons chacun des paramètres utilisés dans le modèle du canal wireless du logiciel.

- **DopplerSpread:**

L'étalement Doppler est inversement proportionnel au temps de cohérence (T_c), il est déterminé par la formule ci-après :

$$f_m = V \times \frac{f_c}{C} \quad \text{avec } V \text{ la vitesse ; } f_c \text{ dépend de la technologie ; } C \text{ la célérité.}$$

- **PathLossRate:**

PathLossRate est le taux de perte dû à l'atténuation des ondes électromagnétiques entre l'émetteur et le récepteur dans le système de communication.

Nous utilisons le modèle Hata [72] optimisé pour la détermination du taux de perte (PathLossRate) de la technologie WiMAX. Pour les localités rurales, nous avons la formule suivante :

$$PL(dB) = 36.2 + 9.467 \times \ln(x) \quad \text{avec } x \text{ représentant la distance de l'émetteur au récepteur (MeanSeparationDistance).}$$

Pour le CDMA450, nous utilisons le modèle de Egli [72][73] pour calculer le taux perte du trajet. Le modèle se présente comme suit :

$$Lt(dB) = 20 \log f_c + 40 \log R - 20 \log h_b + 85,9 - 10 \log 1 h_m$$

avec :

h_b : hauteur de l'antenne de la station de base en mètres

h_m : hauteur de l'antenne de la station mobile en mètres

R : distance de l'antenne de la station de base en mètres

f_c : Fréquence de transmission en MHz

Pour pouvoir effectuer les simulations des différents canaux wireless que nous souhaitons tester, nous résumons dans le Tableau V- 3 l'ensemble des paramètres à injecter dans le modèle.

Tableau V- 3 : Paramètres de modélisation du Canal Wireless

| Spécificités | WiFi | WiMAX | CDMA450 |
|-------------------------|---------|-------------|----------|
| Carrier Frequency | 2.4 GHz | 2.5/3.5 GHz | 455 MHz |
| SymbolRate | 50 MHz | 15 MHz | 1.8 MHz |
| RMSDelaySpread | 250ns | 300ns | 590 ns |
| DopplerSpread | 222 Hz | 300 Hz | 41.65 Hz |
| PathLossRate | 111 / 5 | 130 | 150 |
| ReferencePowerLoss (1m) | 55 | 58 | 40 |
| Channel Type | Indoor | Outdoor | Outdoor |
| MeanSeparationDistance | 50 m | 10 Km | 10 Km |

V.3.2 Résultats de simulation

La liaison simulée est celle de la Figure V- 5 avec les paramètres du Tableau V- 3 pour un débit de données de 100 Mb/s et 16 sous-porteuses et une modulation 16QAM (4 bits/symbole QAM).

Tableau V- 4 : Valeurs d'EVM obtenues avec les paramètres des Canaux Wireless du Tableau V- 3.

| Spécificités | WiFi | WiMAX | CDMA450 |
|--------------|-------|-------|---------|
| EVM | 5,98% | 10,4% | |

Nous avons obtenu les EVM donnés dans le Tableau V- 4. Cependant ces résultats ne peuvent être validés. En effet en faisant varier certains paramètres du canal wireless, nous avons mis en avant des problèmes comportementaux du modèle. En particulier, les résultats obtenus sur la Figure V- 12, qui correspond à la simulation d'un canal WiFi pour lequel la distance entre antennes et la puissance de bruit varient, présentent des aberrations. L'EVM varie de façon complètement aléatoire avec la distance entre les antennes. De plus, des valeurs d'EVM au-delà de 50% apparaissent et ne trouvent pas de justificatifs cohérents.

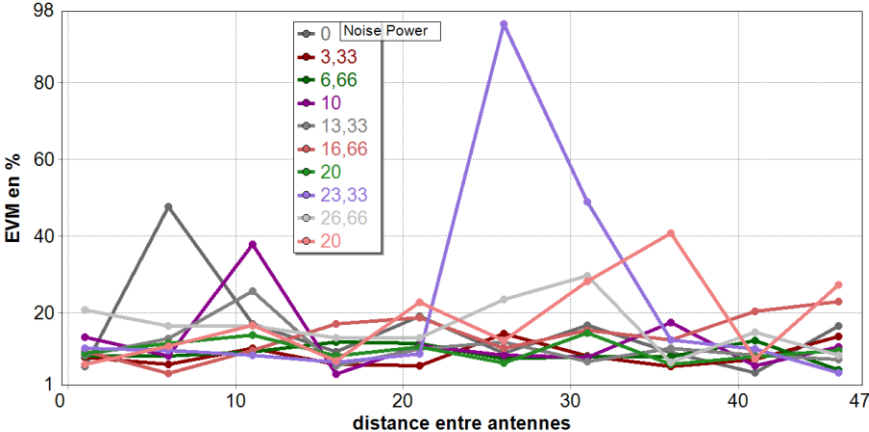


Figure V- 12 : Variation de l'EVM pour un canal indoor de type WiFi en fonction de la distance entre antennes et de la puissance de bruit du canal

Nous avons ensuite simulé le canal Outdoor et en faisant varier les paramètres de ce canal (distance entre antennes de 10 à 50 km et puissance de bruit de 0 à 30 dB), on n'observe sur la Figure V- 13 aucune variation de l'EVM. D'autres paramètres ont été modifiés et ont abouti à la même conclusion. L'analyse de la constellation montre également que la détection n'est pas correcte.

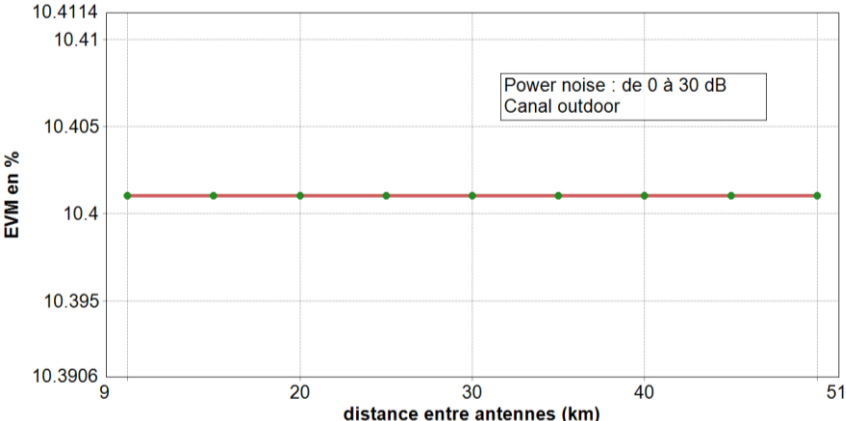


Figure V- 13 : Variation de l'EVM pour un canal outdoor de type WiMAX en fonction de la distance entre antennes et de la puissance de bruit du canal

Ceci nous amène à conclure qu'il sera indispensable de développer un autre modèle de canal Wireless avec Matlab® et d'effectuer des co-simulations pour obtenir des résultats corrects.

De plus, l'un des avantages de l'OFDM est la simplicité de l'égalisation. Il suffit de faire une première estimation du canal à l'aide des PilotTones sous-porteuses utilisées pour estimer le canal). Chacune des sous-porteuses est une fréquence donnée, en choisissant certaines sous-porteuses (soit en les répartissant équitablement ou en accentuant sur une certaine plage de fréquence en cas de « fading ») on pourra alors estimer le canal et corriger les erreurs ce qui augmentera la facilité du système à prendre une décision sur la valeur du symbole. Néanmoins, le module de détection OFDM de la librairie du logiciel ne nous permet pas d'exécuter cette procédure automatiquement. Les perspectives de ce travail consisteraient à générer une application .exe (éditée en langage C/C++) qui permettrait de faire les calculs nécessaires.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une étude sur les différentes technologies permettant de transmettre de l'information à des distances raisonnables et aux débits acceptables pour répondre aux attentes (services) du monde rural et particulièrement celui des pays d'Afrique Centrale.

Pour ce faire nous nous sommes intéressés aux différentes techniques optiques et Wireless identifiées dans les chapitres précédents. Dans un premier temps nous avons proposé les caractéristiques spécifiques des liaisons WiFi, WiMAX et CDMA-25 au regard des normalisations.

Ensuite nous avons investigué les possibilités de simulation de liens opto/RF à l'aide d'un logiciel commercial de simulation. Ces travaux représentent les prémices d'une telle étude et n'ont pas permis d'aboutir à un lien dimensionné et modélisé correctement en particulier parce que les modèles disponibles dans le logiciel ne répondent pas à nos besoins.

Il serait donc nécessaire de pousser ces investigations plus loin en développant nos propres modèles de canal en espace libre.

Conclusion générale et perspectives

Le travail présenté dans ce mémoire de recherche rentre dans le cadre général de la maîtrise des technologies de l'information et de la communication, pour lesquels une approche globale recouvrant les aspects géographiques, socioéconomiques, industriels et technologiques semble nécessaire. C'est d'autant plus vrai dans le cas présent où on s'est intéressé à l'accès et au service universel en Afrique centrale d'une manière générale, mais surtout à une de ses composantes, l'Etat du Tchad qui a un handicap de taille par rapport à sa position géographique ne donnant pas accès à la mer et donc aux différents câbles sous-marins.

Ainsi, si cette thèse peut contribuer, un tant soit peu :

- à l'amélioration de la connectivité et à une meilleure compréhension de la notion d'accès au service universel, notamment dans la diminution des disparités entre les zones urbaines et rurales ;
- et à une meilleure compréhension de la métrique de la Société de l'Information ;

beaucoup aura été réalisé.

La démarche scientifique adoptée dans cette thèse a été la suivante :

- Etat des lieux préliminaire de la situation des TICs en Afrique centrale avec mise en relief des principales difficultés et limites liées à l'accès universel ;
- Cartographie cible intégrée permettant de réduire la fracture technologique ;
- Généralités sur les différentes technologies optiques et radio large bande ;
- Proposition d'une approche méthodologique de modélisation de l'indicateur d'accès au service universel couplée à une stratégie d'optimisation ;
- Développement d'un modèle d'architecture réseau basé sur les technologies radio ;
- Proposition d'une méthodologie consistant à intégrer les différents paramètres impliqués dans le choix des technologies à déployer ;
- Evaluation préliminaire des technologies hybrides.

L'un des enjeux de ce travail de recherche était d'évaluer les compatibilités technologiques, les contraintes géographiques, techniques et économiques en vue de proposer des schémas d'architecture adaptés dans les pays enclavés de l'Afrique centrale afin de résoudre la problématique de la connectivité et de l'accessibilité pour un service universel.

Il a été amplement démontré dans ce mémoire que, dans le contexte des pays enclavés de l'Afrique centrale, les technologies large bande couplés à une bonne stratégie permettent de révéler, d'une part le gap technologique à combler et d'autre part, prédire le niveau d'accès technologique à atteindre en fonction des politiques d'investissement du fonds de Service Universel.

Les orientations données aux recherches développées se distinguent par plusieurs éléments qui lui confèrent un caractère novateur :

- d'abord, par l'approche globale proposée dans ce mémoire de thèse pour l'évaluation de l'indice d'accès universel dans un pays et qui s'est appuyée sur une stratégie de minimisation d'une fonction révélant, d'une part le gap technologique à combler et d'autre part, prédisant le niveau d'accès technologique à atteindre en fonction des politiques d'investissement du fond de service universel (*FSU*). Cette approche diffère des autres travaux sur l'indice d'accès au service universel et a conduit à la mise en place d'actions correctives liées au fond de service universel (*FSU*) tout en prenant en compte les contraintes technico-économiques intrinsèques à chaque localité ;
- ensuite, par la proposition d'un modèle de définition de l'architecture réseau basée sur les technologies radio pour l'accès et le service universel. Cette contribution a permis, sur la base des "*inputs*" propres et du fond d'accès au service universel alloué à chaque localité, de déterminer les besoins en communication en termes de débit, de bande passante, et du nombre d'équipements nécessaires par technologie ;
- et enfin, par le développement d'une expression analytique de l'indice d'accès universel basée sur une technologie radio et intégrant une fonction corrective. Ceci a permis d'optimiser l'accès et a montré l'impact du taux de déploiement de centres communautaires sur cet indicateur et sur le nombre de stations de bases à financer par le fond d'accès et de service universel.

Dans la perspective de la poursuite du présent travail, les pistes de recherche ouverte par cette thèse peuvent se situer à plusieurs niveaux :

- étendre et compléter l'évaluation à d'autres pays de l'Afrique centrale afin de généraliser les approches de modélisation proposées pour permettre de générer des scénarios différenciés afin de mieux tester des mécanismes d'aide à la décision ;
- valider l'exploration des technologies hybrides ;

- Développer des modèles et blocs d'émission/reception en adéquation avec les besoins de l'étude pour pouvoir simuler des solutions originales qui répondent à la volonté de déploiement des réseaux intégrant l'accès et le service universel. L'approche peut même être envisagée avec un autre logiciel.

Bibliographie

- [1] CEEAC, Traité portant Instituant la Communauté Economique des Etats de l’Afrique centrale du 18 octobre 1983.
- [2] CEMAC, traite révisée de la Communauté Economique et Monétaire de l’Afrique centrale, du 16 mars 1994, révisé 25 juin 2008.
- [3] The World Bank (2012) Broad Band Strategies Handbook. Editors Tim Kelly and Carlo Maria Rossoto, Available from <http://www.infodev.org/articles/broadband-strategies-handbook>, Accessed 12 August 2015.
- [4] UIT, Etude sur la connectivité internationale d’internet en Afrique subsaharienne, Mars 2013.
- [5] UIT, HIPSSA – Accès et Service Universels (Guide des bonnes pratiques), 2013.
- [6] Union internationale des télécommunications, Bureau de Développement des Télécommunications, « Mise en œuvre de l’accès universel aux services large bande rapport Final, UIT-D commission d’études 15e période d’études 2010-2014.
- [7] ARCEP TCHAD, Observatoire des communications électroniques 2015.
- [8] UIT, BDT, rapport final sur l’Etude sur les infrastructures des Technologie de l’Information et de la Communication en Afrique centrale, Ouest et Nord.
- [9] UIT, Communiqué de presse sur Indice d'accès numérique établi par l'UIT, 2003.
- [10] UIT (2013) Accès et Service Universels : Guide des bonnes pratiques, Available from <http://www.itu.int/en/ITU-D/Projects/ITU-EC-ACP/HIPSSA/Pages/default.aspx>, Accessed 3 February 2015.
- [11] Pool énergétique d’Afrique centrale, Rapport d’activités du secrétariat permanent, année 2013.
- [12] Thomas Anfray. Étude et simulation des potentialités du Dual Electroabsorption Modulated Laser (D-EML) pour la montée en débit dans les futurs réseaux d’accès optique. Thèse doctorat. Université de Limoges, 2013.
- [13] Duong Thanh NGA. Etude de technique de modulation multi-porteuse OFDM pour la monté en débit dans les réseaux d’accès optique. Thèse doctorat. Université de Rennes 1, 2010.
- [14] G.P. Agrawal, Fiber Optic Communication Systems. John Wiley and Sons, pp. 23 – 74, 1992, ISBN 0-471-21571-6.
- [15] Mamadou Diallo Diouf. Étude des architectures systèmes de réseaux 40-200GPON. Thèse doctorat. Université de Limoges, 2014.
- [16] Farouk Khecib. Etude et mise au point de la migration d'une liaison optique WDM en exploitation vers des hauts débits. Thèse doctorat. Université de Rouen, 2010.
- [17] Fabienne Saliou. Etudes des solutions d'accès optique exploitant une extension de portée. Thèse doctorat. Telecom Paris Tech, 2010.
- [18] Youness Zouine, Contribution par la simulation système à l’étude des contraintes des composants optoélectroniques sur la transmission optique utilisant la technique CDMA. Thèse doctorat. Université de Limoges, 2005.
- [19] H. Kawaguchi. Progress in Optical Functional Devices Using Tow-Section Laser Diodes/Amplifiers. IEEE Proceedings-J, Vol. 140, pp. 3–15, 1993.

- [20] Eric Cassan. Une introduction aux télécommunications optiques par la simulation de systèmes simples. IEF, Université Paris-Sud Orsay DOI : 10.1051/bib-j3ea:2003007.
- [21] Max Fréjus O. SANYA. Déploiement de réseaux optiques d'accès NGPON dans les métropoles de pays en développement : proposition de nouvelles techniques d'implémentation de l'OFDM. Thèse doctorat. Université de Limoges, 2015.
- [22] Luiz Anet, Didier Erasme, Naveena Genay, Phillipe Chancelou, Qian Deniel, Fatoumata Traore, Thomas Anfray, Raajah Hamadou and Christelle A. Berthelemot. Simple Estimation of Fiber Dispersion and laser Chirp Parameters Using the Downhill simplex fitting Algorithm. *Journal of Lightwave Technology*, pp.1-10, January 2013.
- [23] C. Goursaud, Zouine Younes, Anne. Julien-V, J. M. Dumas. Effects of fiber chromatic Dispersion on the performances of an O-CMDA Scheme for high speed access networks. *WOCN*, DOI: 10.1109, pp 1-4, 2015.
- [24] P. Chancou, F. Raharimanita, T. Anfray and Christelle A. Berthelemot. Modulation directe jusqu'à 10Gbit/s d'un laser accordable à cavité externe de bande passante 384 Mhz avec électronique, *JNOG* 2010.
- [25] Christelle A. Berthelemot, Sarah Benameur, Malika Kandou. Impact du Chirp dans le laser à modulation directe les performances d'un systèmes DWDM. 2012.
- [26] OLSON Technology. Long haul Fiber Optic Communications Systems. 2011.
- [27] ARCEP, Huawei. Techniques de transmission utilisés dans le projet II de déploiement du second réseau de transmission du Tchad“, 2015.
- [28] ARCEP, Huawei. Segmentation du réseau N'djamena-Adré, 2015.
- [29] Ministère des Postes et Ntic du Tchad ‘‘Etude d'impact environnemental et social(eies) du projet de construction d'infrastructures de fibres optiques sur le segment N'djamena – Adré - frontière Soudan’’ 2013.
- [30] Ahmed D. KORA, M. D. Diouf, Samuel OUYA and Jean Pierre CANCES. Fundamental limitations on introducing low cost optical sources in HYBRID 40/100G PON. Université de Limoges, Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Limoges (ENSIL), ESMT, IEEE ICACT ISBN 978-89-5519-154-7, pp 369-371 2012.
- [31] Mehwish Bashir & Salman Afsar, (2006). Implementation of Universal Mobile Telecommunication System. *J. Agri. Soc. Sci.* Vol. 2 N°1, p. 33-37.
- [32] VIjak K Varma. Wireless Fidelity. IEEE, 2006-2012,
- [33] Hunold, D. ; Barreto, A.N. ; Fettweis, G.P. ; Mecking, M. ‘‘Concept for universal access and connectivity in mobile radio networks’’ The 11th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2000. PIMRC 2000, Vol.2, pp. 847-851 DOI: 10.1109/PIMRC.2000.881542
- [34] Fei Shen; Jorswieck, E. ‘‘Universal Non-Linear Cheat-Proof Pricing Framework for Wireless Multiple Access Channels’’ *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol.13, Issue: 3, 2014 , pp. 1436- 1448, DOI: 10.1109/TWC.2014.011514.130710
- [35] Ahmed Dooguy KORA, Valery NGUENGA TEZO. Design and Implementation of Low Cost Microwave Full Duplex System based on WiFi Cards for Transmission over Long Distance. ICACT 2011.
- [36] Samuel C Yang, 3G CDMA 2000 Wireless system engineering. AHMC, 2004.
- [37] Andrey M, Viterby and Andrew ‘‘Erlang capacity of a power controlled CDMA System ‘’, IEEE, 6 August 1993.
- [38] Jeffrey.B, Paul.M and Sebastian. C. Convergence technologies for 3G networks. John Wiley&Sons Ltd, 2004.

- [39] C. Chevalier, C. Bruner, A. Gravaglia, K.P. Murray and K.R. Baker. WCDMA (UMTS) deployment Hand book. John Wiley&Sons Ltd, 2006.
- [40] Ajay R Mishra. Advanced cellular network planning and optimisation 2G, 2.5G, 3G. John Wiley&Sons Ltd, 2007.
- [41] Fleury Sébastien, GIROD Jean-Marc, Watanabe. Les satellites et la technologie VSAT. Rapport suite à l'exposé fait en cours de nouvelles technologies, 2013.
- [42] SMSI Genève 2003.
- [43] SMSI Tunis 2005.
- [44] Idriss Saleh BACHAR, Ahmed Dooguy KORA, Roger Marcelin FAYE, Christelle Aupetit-Berthelemot, "Universal Access index assessment and appropriate optimization strategy", Universal Access in the Information Society Journal, Springer Verlag, Vol. 15, N°4, pp. 727-735, 2016.
- [45] UIT (2003). Indice d'accès numérique établi par l'UIT: premier classement universel des pays pour les TIC. L'éducation et l'accessibilité financière, conditions indispensables pour stimuler l'adoption de nouvelles technologies. Available from https://www.itu.int/newsroom/press_releases/2003/30-fr.html, Accessed 3 February 2005.
- [46] UIT, Colloque mondial des régulateurs, Document WSIS-II/PC-2/CONTR/19-F, février 2005.
- [47] <http://www.infodev.org/articles/broadband-strategies-handbook> <http://www.infodev.org/articles/broadband-strategies-handbook>
- [48] Alliance for Affordable Internet, <http://webfoundation.org> [http://webfoundation.org/](http://webfoundation.org)
- [49] GIFEC, [http://www.gifec.gov.gh/](http://www.gifec.gov.gh) <http://www.gifec.gov.gh/>
- [50] Pakistan Universal service Fund, <http://www.usf.org.pk/>
- [51] Universal Service Provision Fund, <http://www.uspf.gov.ng/>
- [52] Bogojevic, D. ; Gospic, N. ; Muric, G. Broadband Universal Service and Access: Trends and models. 20th Telecommunications Forum (TELFOR), 2012, Page(s): 60-63, DOI: 10.1109/TELFOR.2012.6419147.
- [53] Farid Gasmi & Laura Recuero Virto, (2005). Telecommunications Technologies Deployment in Developing Countries: Role of Markets and Institutions. Communications & Strategies, N°58, p. 19-45.
- [54] Morten Falch and Anders Henten. Achieving Universal Access to Broadband. Informatica Economica, 2009, vol. 13, issue 2.
- [55] Patrick Xavier, (2005). Universal Access for Telecommunications in a Competitive Environment. OECD-World Bank 15th Services Experts Meeting, 3-4 February Paris, 32 pages.
- [56] O'Neil, D.V. ; Huff, C.H. Ensuring universal access to telecommunications technologies for all citizens: equity vs. economic considerations. International Symposium on Technology and Society, 1998. ISTAS 98. Wiring the World: The Impact of Information Technology on Society, Proceedings of the 1998, pp: 170-175, DOI: 10.1109/ISTAS.1998.689174.
- [57] Yang, S.J.H. ; Chen, I.Y.L., Universal Access and Content Adaptation in Mobile Learning. Sixth International Conference on Advanced Learning Technologies, 2006, pp. 1172-1173, DOI: 10.1109/ICALT.2006.1652678.
- [58] Adam, N.R. ; Athuri, V. ; Adiwiyaya, I. ; Banerjee, S. ; Holowczak, R. A dynamic manifestation approach for providing universal access to digital library objects. IEEE

- Transactions on Knowledge and Data Engineering, Vol. 13, Issue: 4, 2001, pp. 705-716, DOI: 10.1109/69.940742.
- [59] Hunold, D. ; Barreto, A.N. ; Fettweis, G.P. ; Mecking, M. “Concept for universal access and connectivity in mobile radio networks” The 11th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2000. PIMRC 2000, Vol.2, pp. 847-851. DOI: 10.1109/PIMRC.2000.881542.
- [60] Haraikawa, T. ; Nakagawa, S. ; Une, Y. ; Sakane, Y. ; Takebayashi, Y. A unique way to personalized and situational supports for universal access of home appliance network. International Conference on Consumer Electronics, 2006. ICCE '06. 2006 Digest of Technical Papers. DOI: 10.1109/ICCE.2006.1598309.
- [61] Gomaa, A. ; Adam, N. ; Atluri, V. Adapting spatial constraints of composite multimedia objects to achieve universal access. 24th IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference, 2005. IPCCC 2005. pp. 519- 525 DOI: 10.1109/PCCC.2005.1460624.
- [62] Aztelco, (2012). Ifc/aspects techniques et de régulation/plan de développement.
- [63] GIFEC (2013) Ghana Investment Fund for Electronic Communications Available from <http://www.gifec.gov.gh/>, Accessed 12 August 2015.
- [64] USPF (2015) Universal Service Provision Fund. Available from <http://www.uspf.gov.ng/>, Accessed 12 August 2015.
- [65] Idriss Saleh Bachar, Ahmed Dooguy Kora, Roger Marcelin Faye, Christelle Aupetit-Berthelemot, Radio access model for universal service, International Conference on Advanced Communication Technology, ICACT, 2016-March, 7423460, pp. 532-536.
- [66] Mehwish Bashir & Salman Afsar, Implementation of Universal Mobile Telecommunication System. J. Agri. Soc. Sci. Vol. 2 N°1, p. 33-37, 2006.
- [67] Simon ZNATY et Jean-Louis DAUPHIN. Architecture NGN-Du NGN Téléphonie au NGN Multimédia Copyright EFORT. 20/08/2005.
- [68] Mugen Peng; Chonggang Wang; Vincent Lau; H. Vincent Poor (2015). Fronthaul-constrained cloud radio access networks: insights and challenges. Wireless Communications, IEEE, Vol. 22, Issue 2, p. 152-160. Doi: 10.1109/MWC.2015.7096298.
- [69] Organisation de Coopération et de Développement Economique (OCDE). Convergence et réseaux de la prochaine génération. juin 2008.
- [70] Issac Albarran & Manuel Parras, (2012). Telecommunication Services Migration to the Cloud, a Network Performance. Master Thesis, School of Information and Communication Technonology, KTH Royal Institute of Technology, 231 pages.
- [71] Dietrich Hunold; André Noll Barreto; Gerhard P. Fettweis; Michael Mecking, (2000). Concept for Universal Access and Connectivity in Mobile Radio Networks. The 11th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, (PIMRC 2000), London 18-21 September, Vol.2, p. 847–851. Doi: 10.1109/PIMRC.2000.881542.
- [72] Mardeni.R, T. Siva Priya. Optimised COST-231 Hata Models for WiMAX Path Loss Prediction in Suburban and Open Urban Environments” Vol. 4, No. 9; September 2010.
- [73] Ezeh G. N., Nwogu U.O and Emerole K.C. Wi-Fi Coverage Area Analysis and Pathloss Parameter Modeling Using The Linear Regression Method. Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST), Vol. 2 Issue 10, October – 2015.

Production Scientifique de l'auteur

- [RICL1] Idriss Saleh BACHAR, Ahmed Dooguy KORA, Roger Marcelin FAYE, Christelle Aupetit-Berthelemot, “Universal Access index assessment and appropriate optimization strategy”, *Universal Access in the Information Society Journal*, Springer Verlag, 2015.
- [RICL2] Idriss Saleh Bachar; Ahmed Dooguy Kora; Roger M. Faye; Christelle Aupetit-Berthelemot, “Assessing the Radio Access Technologies Impact on the Universal Access Index”, *IEEE Access*, Volume: PP, Issue: 99, DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2615467, 2016
- [CICL1] Idriss Saleh Bachar; Ahmed Dooguy Kora; Roger Marcelin Faye; Christelle Aupetit-Berthelemot, “Radio access model for universal service”, 18th IEEE International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT) 2016, Pages: 532 - 536, DOI: 10.1109/ICACT.2016.7423460, Jan 31 - Feb 3, Bongpyeong-myeon, Korea (South), 2016
- [W1] Idriss Saleh Bachar; C. Aupetit-Berthelemot, R. Marcelin Faye, A. D. Kora, “Study on the deployment of fiber optical/Wimax hybrid networks (terrestrial broadcasting) in Central Africa : UAI index”, *Xlim Workshop*, 2015.

Annexes

Annexe 1 : Le lien longue distance en cours de déploiement N'Djaména–Adré–Frontière Soudan au Tchad

Structure et paramètres du câble

| S/N | Élément | | Unité | Valeur |
|-------|------------------------------------|-----------|-------|--------|
| Câble | | | | |
| 1 | Âme FRP de renforcement | Diamètre | mm | 2,2 |
| 2 | Manchon protecteur intérieur en PE | Épaisseur | mm | 1,0 |
| 3 | Manchon protecteur extérieur en PE | Épaisseur | mm | 2,0 |
| 4 | Diamètre extérieur | | mm | 13,1 |
| 5 | Poids du câble | | kilos | 144 |

Caractéristique techniques de la fibre optique utilisée dans le Projet G652D

| | |
|---|---------------------------|
| Diamètre de champ modal (1310 nm) : | 9,2 \pm 0,4 μ m |
| Diamètre de champ modal (1550 nm) : | 10,4 \pm 0,8 μ m |
| Diamètre de la couche plaquée : | 125 \pm 0,8 μ m |
| Erreur de concentricité du fil conducteur et de la couche plaquée : | 0,5 μ m |
| Non-circularité de la couche plaquée : | 1,0 % |
| Profil de l'indice de réfraction : | pas |
| Conception : | couche plaquée appropriée |
| Indice du groupe effectif de la réfraction Neff (à 1310 nm) | 1,4677: |
| Indice du groupe effectif de la réfraction Neff (à 1550nm) : | 1,4682 |
| Longueur d'onde de coupure de la fibre câblée (λ_{CC}) : | 1260 nm |
| Atténuation à 1310 nm : | 0,35 dB/km |
| Déviations de l'atténuation dans le champ de 1285-1330 nm (par comparaison avec l'atténuation à 1310 nm) : | 0,05 dB/km |
| Atténuation à 1383 \pm 3 nm : | 0,34 dB/km |
| Atténuation à 1550 nm : | 0,21 dB/km |
| Déviations de l'atténuation dans le champ de DTS 1525-1575 nm (par comparaison avec l'atténuation à 1550 nm) : | 0,05 dB/km |
| Dispersion dans le champ 1288 à 1339 nm : | 3,5 ps/(nm.km) |
| Dispersion dans le champ 1270 à 1360 nm : | 5,3 ps/(nm.km) |
| Dispersion à 1550 nm : | 17 ps/(nm.km) |
| Pente de dispersion à la longueur d'onde de zéro dispersion : δ 0,092 ps/(nm ² •km) | |
| Valeur des liaisons de dispersion des modes de polarisation : | 0,1 ps/ \sqrt km |

Table des illustrations :

| | |
|---|-----|
| FIGURE I- 1: PAYS DE LA CCEAC | 15 |
| FIGURE I- 2 : COMPARAISON ARPU VOIX ET DATA..... | 17 |
| FIGURE I- 3: COMPARAISON SMIC ET ARPU | 18 |
| FIGURE I- 4: EVOLUTION DE LA TELEDENSITE FIXE | 21 |
| FIGURE I- 5 : EVOLUTION DU NOMBRE D'ABONNES TELEPHONIE MOBILE | 23 |
| FIGURE I- 6: TAUX DE PENETRATION DE LA TELEPHONIE MOBILE EN AFRIQUE CENTRALE (2014). | 23 |
| FIGURE I- 7: EVOLUTION DU NOMBRE D'ABONNES INTERNET EN AFRIQUE CENTRALE DE 2008 A 2014 | 25 |
| FIGURE I- 8: TAUX D'UTILISATION DE L'INTERNET POUR 100 HABITANTS (DONNEES 2014)..... | 25 |
| FIGURE I- 9: COMPARAISON SMIC & TARIF INTERNET..... | 25 |
| FIGURE I- 10 : REPARTITION DES COUTS DES OPERATEURS..... | 29 |
| | |
| FIGURE II- 1 : STRUCTURE GENERALE D'UNE LIAISON OPTIQUE..... | 38 |
| FIGURE II- 2 : IMPACT DE L'AFFAIBLISSEMENT DE LA FIBRE (A) SUR LA PUISSANCE OPTIQUE ; (B) SUR LE TEB | 41 |
| FIGURE II- 3 : TEB ET DIAGRAMMES DE L'ŒIL EN SORTIE DE TRANSMISSION OPTIQUE : IMPACT DE LA DISPERSION | 43 |
| FIGURE II- 4 : DIAGRAMME DE L'ŒIL EN SORTIE DE TRANSMISSION OPTIQUE SANS COMPENSATION DE DISPERSION | 45 |
| FIGURE II- 5 : DIAGRAMME DE L'ŒIL EN SORTIE DE TRANSMISSION OPTIQUE AVEC COMPENSATION DE DISPERSION | 45 |
| FIGURE II- 6 : SYNOPTIQUE DU MODULE DE RECEPTION..... | 45 |
| FIGURE II- 7 : SCHEMATIQUE SIMPLE D'UNE PHOTODIODE PIN [14]..... | 46 |
| FIGURE II- 8 : SCHEMATIQUE SIMPLE D'UNE PHOTODIODE APD [14]..... | 47 |
| FIGURE II- 9 : SCHEMA SYNOPTIQUE D'UNE LIAISON OPTIQUE A MODULATION DIRECTE | 48 |
| FIGURE II- 10 : SCHEMA SYNOPTIQUE D'UNE LIAISON OPTIQUE A MODULATION EXTERNE A BASE DE MZM..... | 48 |
| FIGURE II- 11 : TEB EN FONCTION DE LA DISTANCE DE TRANSMISSION ET DE LA METHODE D'INJECTION DE LA LUMIERE A 5 ET 10 GB/S | 49 |
| FIGURE II- 12: CARTE DES RESEAUX LONGUE DISTANCE DU TCHAD..... | 51 |
| FIGURE II- 13: LONG HALL NDJAMENA-ADRE DU TCHAD..... | 51 |
| FIGURE II- 14 : SOLUTION RESEAU OTN | 53 |
| FIGURE II- 15: SCHEMA D'ARCHITECTURE RESEAU VSAT [73]..... | 58 |
| | |
| FIGURE IV- 1 : NOMBRE DE STATIONS DE BASE PAR TECHNOLOGIE SUIVANT UNE VARIATION DE LA DUREE T ET DU COEFFICIENT REDUCTEUR R. | 95 |
| FIGURE IV- 2 : NOMBRE DES STATIONS DE BASE PAR TECHNOLOGIE SELON LE COEFFICIENT REDUCTEUR..... | 95 |
| FIGURE IV- 3 : EVOLUTION DU NOMBRE DES STATIONS DE BASE PAR TECHNOLOGIE SELON LA VARIATION DE M. | 97 |
| FIGURE IV- 4 : EVOLUTION DE L'UAI DES LOCALITES EN FONCTION DU NOMBRE DES STATIONS DE BASE (BS) DE LA TECHNOLOGIE WIFI. | 102 |
| FIGURE IV- 5 : EVOLUTION DE L'UAI DES LOCALITES EN FONCTION DU NOMBRE DES STATIONS DE BASE (BS) DE LA TECHNOLOGIE WIMAX..... | 102 |
| FIGURE IV- 6 : EVOLUTION DE L'UAI DES LOCALITES EN FONCTION DU NOMBRE DES STATIONS DE BASE (ENODE) DE LA TECHNOLOGIE LTE..... | 103 |

| | |
|---|-----|
| FIGURE IV- 7: EVOLUTION DE L'UAI GLOBAL EN FONCTION DES CENTRES COMMUNAUTAIRES SELON LA TECHNOLOGIE LTE ET WIMAX. | 104 |
| FIGURE V- 1: ARCHITECTURE NGN UA | 111 |
| FIGURE V- 2 : ARCHITECTURE CLOUD UA..... | 112 |
| FIGURE V- 3 : ARCHITECTURE GAUA..... | 113 |
| FIGURE V- 4 : TOPOLOGIE DU RESEAU TCHAD EN DEPLOIEMENT | 116 |
| FIGURE V- 5 : SYNOPTIQUE DE LA LIAISON SIMULEE POUR LE CAS ETUDIE DE LIAISON HYBRIDE | 116 |
| FIGURE V- 6 : SYNOPTIQUE DE LA LIAISON POUR COMPARER LA MODULATION EXTERNE A BASE DE MEA ET MZM. | 117 |
| FIGURE V- 7 : PERFORMANCES DE LA LIAISON AVEC MODULATION EXTERNE A BASE DE MEA ET MZM POUR 3 DEBITS ET UNE LIAISON SANS REPETEURS. | 117 |
| FIGURE V- 8 : SYNOPTIQUE DE LA LIAISON AVEC MODULATION EXTERNE A BASE DE MEA ET MZM POUR UNE LIAISON AVEC REPETEURS A 2,5 GB/S..... | 118 |
| FIGURE V- 9 : PERFORMANCES DE LA LIAISON AVEC MODULATION EXTERNE A BASE DE MEA ET MZM POUR UNE LIAISON AVEC REPETEURS A 2,5 GB/S..... | 119 |
| FIGURE V- 10 : PERFORMANCES DE LA LIAISON AVEC MODULATION EXTERNE A BASE DE MEA ET MZM POUR UNE LIAISON AVEC REPETEURS A 2,5 GB/S ET UN NOMBRE CROISSANT DE BOUCLES. | 119 |
| FIGURE V- 11:MODELISATION DU CANAL RADIO..... | 120 |
| FIGURE V- 12 : VARIATION DE L'EVM POUR UN CANAL INDOOR DE TYPE WIFI EN FONCTION DE LA DISTANCE ENTRE ANTENNES ET DE LA PUISSANCE DE BRUIT DU CANAL..... | 123 |
| FIGURE V- 13 : VARIATION DE L'EVM POUR UN CANAL OUTDOOR DE TYPE WIMAX EN FONCTION DE LA DISTANCE ENTRE ANTENNES ET DE LA PUISSANCE DE BRUIT DU CANAL | 123 |

Liste des Tableaux :

| | |
|--|-----|
| TABLEAU II- 1 : CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DES TECHNOLOGIES SANS FIL [30] | 54 |
| TABLEAU II- 2 : COMPARAISONS DES TECHNOLOGIES RADIO | 59 |
| | |
| TABLEAU III- 1 : DONNEES DE BASE SUR LES COMMUNICATIONS ELECTRONIQUES DANS LA ZONE DU OUADDAÏ (SOURCE ARCEP TCHAD) | 74 |
| TABLEAU III- 2 : EVALUATION DE L'UAI DE LA REGION DU OUADDAÏ | 75 |
| TABLEAU III- 3 : EXEMPLE DE STRATEGIE D'AMELIORATION DE L'UAI | 76 |
| TABLEAU III- 4 : RESUME DES RESULTATS DE DIVERS CALCULS RELATIFS A L'UAI DANS UNE ZONE ET AUX COUTS ASSOCIES | 76 |
| TABLEAU III- 5 : SCENARIO TECHNIQUES POSSIBLES DE MISE EN ŒUVRE DE L'ACCES UNIVERSEL L'ACCES UNIVERSEL..... | 77 |
| | |
| TABLEAU IV- 1: DONNEES DE BASE DE LA ZONE DE L'OUADDAÏ (SOURCE ARCEP TCHAD)..... | 93 |
| TABLEAU IV- 2: DONNEES LIEES AUX TECHNOLOGIES | 94 |
| TABLEAU IV- 3: DETERMINATION DU NOMBRE DE STATIONS BS DES DIFFERENTES TECHNOLOGIES SELON LA VARIATION DU TEMPS T ET DU COEFFICIENT REDUCTEUR R..... | 94 |
| TABLEAU IV- 4: DETERMINATION DU NOMBRE DE STATION BSN PAR TECHNOLOGIE SUIVANT LA VARIATION DE M. | 96 |
| TABLEAU IV- 5: CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DES EQUIPEMENTS PAR TECHNOLOGIE..... | 101 |
| | |
| TABLEAU V- 1 : COMPARAISON NGN ET NGN UA | 110 |
| TABLEAU V- 2 : PARAMETRES DES FIBRES UTILISEES (SMF ET DCF) | 118 |
| TABLEAU V- 3 :PARAMETRES DE MODELISATION DU CANAL WIRELESS | 122 |
| TABLEAU V- 4 :VALEURS D'EVM OBTENUES AVEC LES PARAMETRES DES CANAUX WIRELESS DU TABLEAU V- 3..... | 122 |

Table des Acronymes :

A B C

ARCEP : Autorité de Régulation des Communications Electroniques et des Postes
ARPU : Average revenue per user
APD : photodiode à avalanche
ARPU : Average revenue per user
BEAC : Banque des Etats de l'Afrique Centrale
CEMAC : Communauté Économique et Monétaire des Etats de l'Afrique Centrale
CEAC : Communauté économique des États de l'Afrique centrale ...
CAPEX: Capital Expenditure

D E F G H I J K L

DEL : Diode à Electroluminescente
DL : Diode Laser
DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing
EDFA: Eridium Doped Fiber Amplifier
EAM : modulateur à electro-absorption
FSU : Fond de Service Universel
GAUA: Global Architecture for Universal Access
GSM: Global System for Mobile Communications
LTE: Long Term Evolution
LEAF: Large Effective Area Fiber

M, N, O, P

NGN: Next Generation Network
MZM : Modulateur Mach-Zehnder
ONU : Organisation des Nations Unis
OPEX: Operating Expenditure
OTN: Optical transport network
OLA: Optical liner amplifieur
OADM: Optical Add drop multiplexer
OSNR : Optical signal noise ratio
PIB : Produit Intérieur Brut
PMD : Dispersion Modale de Polarisation
PIN : Couche-P, couche Intrinsèque, Couche-N
PM : Modulateur de Phase
PPA : Parité de pouvoir d'achat

Q, R, S, T

RDC : République Démocratique du Congo
RCA : République centrafricaine
RFA : Amplificateur Raman
SU : Service universel
SMIC : Salaire minimum interprofessionnel de croissance
SOA : Amplificateur optique à Semi-conducteur
TIC : technologie de l'information et de la communication

U, V, W

UA : Universal Access

UAI : Universal Access index

UIT : Union Internationale de Télécommunications

UAT: Union Africaine des Télécommunications

UMTS: Universal Mobile Telecommunications System

VSAT: Very Small Aperture Terminal

WIMAX: Worldwide Interoperability of Microwave Access

Titre : Approches d'évaluation de l'accès universel et Stratégies d'optimisation : Application au cas de l'Afrique centrale.

Résumé : Cette thèse aborde de façon systématique l'analyse de la situation des TICs en Afrique Centrale, elle identifie les problématiques liées à l'accès universel et étudie les politiques d'harmonisation des TICs. Cette analyse conduit alors à proposer une cartographie cible intégrée permettant de réduire la fracture numérique.

Non seulement les différentes technologies optiques et radio large bande sont mises à contribution mais décrites en vue de relater les notions de base permettant d'appréhender les avantages et inconvénients de chaque technologie. Ceci a permis par la suite de proposer une démarche méthodologique de modélisation de l'indicateur d'accès au service universel couplée à une stratégie d'optimisation révélant, d'une part le gap technologique à combler et d'autre part, prédisant le niveau d'accès technologique à atteindre en fonction des politiques d'investissement du Fonds de Service Universel.

Aussi, outre la proposition de cette démarche de modélisation cette thèse apporte une autre contribution en développant un modèle d'architecture réseau basé sur les technologies radio et en proposant une méthodologie consistant à intégrer les différents paramètres impliqués dans le choix des technologies à déployer en vue de l'accès au service universel. De plus, elle se projette dans l'évolution future de la technologie en offrant une ouverture sur les technologies hybrides.

Mots clés : Accès et Service Universel ; Connectivité ; Large bande ; Indicateur d'accès au Service Universel ; Fonds de Service Universel ; Modèle d'accès réseau ; Modèle d'accès radio.

Title: Evaluation Approaches of Universal Access and Strategies of optimization: Application to the case of Central Africa.

Abstract: This thesis deals systematically with the analysis of the situation of ICTs in Central Africa, it identifies the problems related to universal access and studies ICTs harmonization policies. This analysis then enables the proposal of an integrated target mapping to reduce the digital divide.

Not only the different optical and radio broadband technologies are used but described to relate the basic concepts allowing to apprehend the advantages and disadvantages of each technology. This allowed us to propose a methodological approach to modeling the universal access and service indicator coupled with an optimization strategy revealing, on the one hand, the technological gap to be filled and on the other hand, predicting the access level based on technologies to achieve in accordance with the investment policies of the Universal Service Fund.

Besides the proposal of this modeling approach, other contributions of this thesis is developing a network model architecture based on radio technologies and proposing a methodology consisting of integrating the various parameters involved in the choice of technologies to be deployed for access and universal service. In addition, it is projected into the future evolution of solutions that leads to hybrid technologies.

Keywords: Access and Universal Service; Connectivity; Large band; Universal Service Access Indicator; Universal Service Fund; Network access model; Radio access model.