UNIVERSITÉ LIBRE DE BRUXELLES

MEMOIRE

PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU GRADE D'INGÉNIEUR DE GESTION

Valentin BAUWENS

Y a-t-il un marché pour les communications optiques sans fil auprès des opérateurs de télécommunications?

Directeur : Monsieur Philippe EMPLIT
Assesseurs : Monsieur Bruno VAN POTTELSBERGHE
Monsieur Michel ALLE
Jury : Economie et Technologie

Année académique 2003-2004

Mémoire

ÉCOLE DE COMMERCE SOLVAY

Je tiens dès à présent à remercier de tout cœur les diverses personnes qui m'ont aidé dans l'élaboration et la vérification de ce document, en particulier Philippe Emplit, Eric mannie, Bart Pen, Eric Hauwaert, Rik Reynaers, Nicolas Parmentier, Annick Bombeeck, Vincent Bultot, Tanguy Popeler et mes parents.

Introduction

La technologie Optique Sans Fil (OSF) permet la transmission de données dans l'atmosphère par modulation d'une porteuse optique. Elle a pour avantage d'offrir des bandes passantes du même ordre de grandeur que la fibre optique mais avec des délais d'installation et des frais d'investissement beaucoup plus faibles. On peut toutefois lui trouver quelques points faibles comme la nécessité de ligne de vue entre l'émetteur et le récepteur et une difficulté à traverser le brouillard qui peut interrompre la transmission de données.

Au cours de la bulle de la fin des années 1990, beaucoup considéraient cette technologie comme révolutionnaire et prédisaient des implémentations massives de dispositifs OSF. Certains désignaient l'Optique Sans Fil comme la solution au goulot d'étranglement du dernier kilomètre. C'est pourquoi des sociétés comme Lucent Technologies, Nortel Networks et Cisco Systems investirent plus de 700 millions[1] de dollars dans des entreprises construisant des systèmes OSF. Au total, une trentaine d'entreprises furent fondées.

En mai 2001, *Merrill Lynch* publia un rapport dans lequel elle prévoyait une croissance du marché OSF de 100 millions de dollars en 2000 à 2 milliards de dollars en 2005. Au mois d'août de la même année, *IGI Group* avança même un chiffre de 3,2 milliards de dollars en 2005. Les analystes comptaient alors sur le fait que les opérateurs télécoms allaient utiliser la technologie OSF à grande échelle pour transporter leur trafic du dernier kilomètre entre le réseau d'accès et la fibre optique. Or, en 2001, selon des études de *Frost & Sullivan*, 65% des ventes se faisaient encore dans le secteur des entreprises et seulement 34% dans celui des opérateurs. Les premiers utilisateurs d'OSF étaient en effet des entreprises ou institutions possédant plusieurs bâtiments localisés dans un périmètre limité et désirant les interconnecter. Cependant, ce segment est beaucoup plus limité que celui des opérateurs développant des réseaux à l'échelle de villes ou de pays entiers et présentant donc des besoins d'interconnexion massifs.

En 2002, le développent du marché des opérateurs n'avait toujours pas eu lieu. Comme le disait à ce moment Tony Carmona, analyste chez IGI Group, "*Carriers just aren't buying it.*"[2] Il faut cependant tenir compte qu'à ce moment les opérateurs telecom traversaient une mauvaise période. On peut dès lors se demander si ce manque d'intérêt de la part des opérateurs pour les communications OSF résultait d'une inadéquation des ces technologies avec leur métier ou seulement d'un

[1] Gubbins E. (mars 2003), "*AirFiber CEO calls sector dead*", TelephonyOnline.com
[2] Reardon M. (juillet 2002), "*The new reality of FSO*", lightreading.com

manque de moyens financiers. Quoi qu'il en soit, en mars 2002, Frost & Sullivan publia des prévisions de revenus ne s'élevant plus qu'à 215 millions de dollars en 2005.

En février 2003, AirFiber, un des principaux constructeurs de produits OSF, annonça l'arrêt de ses activtés et son CEO déchu, Brett Helm, déclara à la presse: "*There will never be an ongoing, viable business for free-space optics, other than a product line in a company that might do disaster recovery. It won't be a stand-alone business.*"[3] Etait-il sincère ou parlait-il sous l'effet de la frustration en essayant de causer du tort à ses anciens rivaux?

Durant le reste de l'année 2003, le marché OSF semble toutefois reprendre vie. En mars et en juillet, Terabeam, un constructeur de dispositifs optiques, annonce la signature de contrats avec deux opérateurs asiatiques, Great Wall Broadband Netwok Service[4] et China Railcom[5]. D'autre part, plusieurs sociétés OSF annoncent de nouveaux partenariats de distribution[6] ou le lancement de nouvelles gammes de produits[7]. Notons toutefois que, en avril 2004, Terabeam fut rachetée par YDI[8], une entreprise produisant des liens hertziens, pour un dixième de la valeur investie par les actionnaires.

Il semble évident que le marché potentiel de l'OSF auprès des opérateurs est moins important que ne l'avaient prédit les analystes en 2001. Mais peut-on pour autant affirmer que ce marché est inexistant ou négligeable? L'objectif de ce mémoire est de répondre à cette question.

Nous n'essayerons pas nécessairement de quantifier le marché, cet exercice étant fort complexe et produit des résultats trop variables en fonction des hypothèses posées. Nous tenterons par contre de qualifier les circonstances dans lesquelles un lien optique pourrait être utilisé par un opérateur et de déterminer l'étendue de ces circonstances.

Afin de remplir ces objectifs, nous passerons par trois étapes indispensables:

1. La description des produits OSF: celle-ci nous permettra d'une part, d'avoir une compréhension suffisante des caractéristiques des produits et des performances qu'ils peuvent atteindre et d'autre part, de faire le lien entre ces caractéristiques et ces performances.

[3] Gubbins E. (mars 2003), "*AirFiber CEO calls sector dead*", TelephonyOnline.com
[4] Light Reading (juillet 2003), "Terabeam climbs the Great Wall"
[5] Light Reading (mars 2003), "China Railcom deploys Terabeam FSO"
[6] Light Reading (mars 2003), "Lightpointe, Siemens team on FSO"
[7] Light Reading (juin 2003), "Lightpointe intros gig-E FSO product"
[8] Raynovich S. (avril 2004), "Terabeam goes for peanuts"

2. L'étude des technologies concurrentes: Dans un premier temps, nous comparerons les technologies optiques à leur substitut le plus proche: les faisceaux hertziens. Cette comparaison portera aussi bien sur les performances que sur les coûts des technologies. Comme les coûts dépendent de la distance couverte par le lien optique ou hertzien et de la bande passante de ces liens, nous tenterons de déterminer pour quels profils "distance-bande passante" l'optique sans fil est compétitif par rapport aux technologies hertziennes.

   Cependant, avant de choisir entre une technologie optique ou une technologie hertzienne, l'opérateur aura préalablement réalisé deux choix:

   - Celui d'acquérir un système sans fil plutôt qu'un système filaire
   - Celui d'acquérir le système de communication plutôt que de le louer

   Nous confronterons donc les systèmes sans fil aux systèmes filaires et aux lignes louées afin de dégager d'une part, les avantages et les inconvénients que ces solutions présentent les unes par rapport aux autres et d'autre part, les critères qui amènent à sélectionner une solution plutôt qu'un autre.

3. L'analyse des applications: Nous vérifierons si les communications optiques sans fil peuvent être implémentées de façon efficace et rentable au sein de quelques types de réseaux sélectionnés. Cette analyse passera par la compréhension du fonctionnement de chaque type de réseau et des applications qu'ils sont destinés à soutenir. Nous pourrons ensuite désigner les connexions susceptibles d'être compatibles avec l'optique sans fil et déterminer les facteurs qui favorisent l'implémentation de ces connexions en OSF. L'évaluation de la fréquence de survenance de ces facteurs favorables devrait permettre d'estimer l'ampleur du marché des systèmes OSF.

Au terme de la lecture de ce mémoire, le lecteur devrait donc:

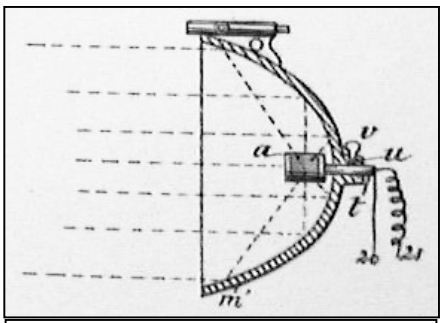
- avoir une bonne compréhension du fonctionnement, des caractéristiques et des performances des systèmes optiques sans fil
- avoir une idée des circonstances dans lesquelles les dispositifs OSF sont compétitifs par rapport aux faisceaux hertziens et des critères qui amènent à sélectionner un système sans fil plutôt qu'un système filaire ou une ligne louée
- pouvoir estimer l'ampleur du marché des communications optiques sans fil auprès des opérateurs par la compréhension des facteurs qui restreignent ou favorisent l'implémentation de systèmes OSF dans quelques types de réseaux sélectionnés.

Chapitre I: Description des technologies OSF

Titre 1: Historique

L'idée de transmettre des informations sans fil en utilisant des signaux optiques est loin d'être nouvelle. Dès l'antiquité, les écrits d'Euclide[9] décrivent l'utilisation de disques métalliques pour réfléchir la lumière du soleil afin de communiquer des signaux sur de longues distances. A cette époque, le signal optique était modulé « manuellement » à la source en faisant bouger le disque réfléchissant. Le message était ensuite interprété par le destinataire en fonction d'un code conventionnel.

En 1873, Willoughby Smith[10] découvre les propriétés photosensibles remarquables du sélénium qui présente une conductivité électrique variable en fonction de son exposition à la lumière du soleil. Interpellé par cette découverte, Alexander Graham Bell[11] inventa en 1880 le photophone exploitant les propriétés exceptionnelles du sélénium. Du côté de l'émetteur, le système consistait à moduler la lumière du soleil réfléchie par un miroir déformable que faisait vibrer la voix à transmettre. Du côté du récepteur, le faisceau lumineux d'intensité variable était ensuite projeté sur une cellule de sélénium dont la conductivité électrique variait en concordance[12]. Un téléphone pouvait alors être connecté à cette cellule et reproduire la voix. Jusqu'à sa mort, Bell considéra que cette invention était supérieure à celle du téléphone filaire. Cependant, la technologie montra vite ses limites. Le fonctionnement du photophone était en effet tributaire du soleil et il était donc impossible de communiquer par temps nuageux et pendant la nuit. Enfin, le photophone tombera en désuétude lorsque Marconi démontra, dès 1887, la possibilité de la télégraphie sans fil en recourant aux propriétés des ondes hertziennes.



Récepteur du photophone: le signal lumineux est convergé sur un cellule de sélénium et converti en signal électrique
Source: Bell & Tainter patent 235,496 14/12/1880

Pour assurer la transmission optique d'informations de manière plus fiable, il fallait renoncer au soleil en tant que source lumineuse en faveur d'un générateur de lumière contrôlable, régulier et suffisamment puissant pour envoyer des signaux sur de longues distances. Cette évolution fut possible grâce à l'invention du maser par Charles Townes et Arthur Schawlow en 1955, suivie par celle du laser en 1960 par Theodore Maiman. Cependant, les premiers lasers, qui fonctionnaient à l'aide d'un rubis synthétique, n'offraient pas une fréquence d'impulsion suffisamment grande

[9] Euclide (3ième siècle avant JC), "*Optica*" et "*Catoptrica*"
[10] Smith W. (4 February 1873), "*Letter to Latimer Clark*",
[11] Bell A. G. (23 Sept 1880), "*Selenium and the photophone*", Nature
[12] Lange A.,"*Histoire de la télévision*", www.histv.free.fr

pour transmettre des données. Il fallut donc attendre l'apparition de systèmes à néon hélium pour effectuer les premières communications par laser.

La Nasa s'intéressa en premier à cette technologie naissante, que l'on avait alors nommée « Free Space Optics », dans le but d'échanger des informations entre un satellite et une base terrestre. Après le succès de cette première application, le département de la défense américaine lança un programme de recherche visant à produire un système viable pour le début des années 1980. L'intérêt était de communiquer sans risque d'interception de données secrètes, grâce au confinement du signal dans un faisceau étroit. Les Etats-Unis ne furent pas les seuls à s'intéresser à l'optique sans fil. D'autres pays, comme l'Allemagne, le France et le Japon, participèrent également à l'évolution de la technologie. Le scientifique allemand Erhard Kube, souvent considéré comme le père de l'optique sans fil, publia en 1968 un des premiers articles à ce sujet, intitulé *Nachrichtenübertragung mit lichtstrahlen in der Atmosphäre*[13].

1969: une version améliorée du photophone
Source : Emission TV "Beams of the future"

Le début des années 1990 est marqué par l'introduction de l'OSF dans des applications civiles. La demande croissante de connexions à haute bande passante couplée aux capacités limitées des infrastructures des opérateurs traditionnels rendait intéressante, aux Etats-Unis, l'utilisation de l'OSF au sein de réseaux d'accès. D'autre part, à la suite de la dérégulation des télécommunications du milieu des années 1990, l'OSF représentait, pour les opérateurs concurrentiels, une manière peu coûteuse de ne pas emprunter les infrastructures des opérateurs historiques.

Par la suite, grâce aux nombreuses expériences vécues sur le terrain, les constructeurs d'OSF ne cesseront d'apporter à leurs appareils des améliorations techniques, augmentant la puissance des émetteurs et la sensibilité des récepteurs ainsi que la fiabilité générale des dispositifs. Les systèmes actuels permettent de transmettre des données avec une bande passante de 2,5 Gbps sur plus d'un kilomètre.

Tableau n°1 : Récapitulaitif des technologies OSF

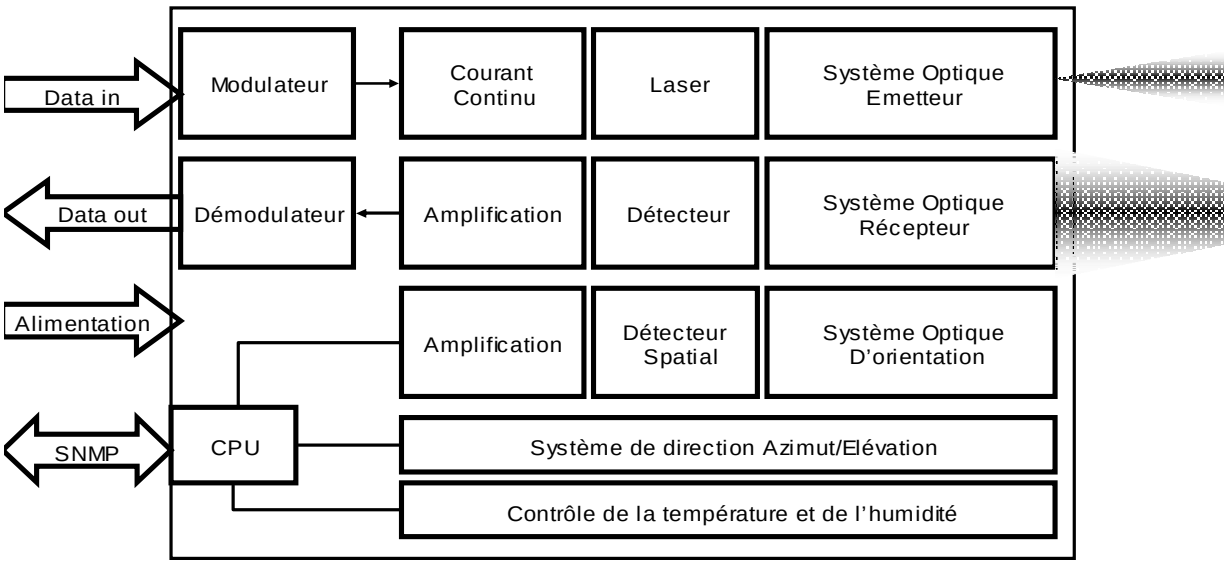
Période	Technologie	Source lumineuse	Modulation	Démodulation	Capacité
Antiquité	Disque métallique	Soleil	Manuelle	Œil et Cerveau	symboles
Fin 19ième siècle	Photophone	Soleil	Miroir déformable vibrant par la voix.	Cellule de sélénium photosensible	Voix
Depuis 1960	Free Space Optics	Laser	Modulation On et Off	Récepteurs divers (PIN, APD,...)	Images, données

[13] Nachrichtentechnik, June 1968, p. 201 - 207

Titre 2: Architecture et caractéristiques des systèmes OSF

L'objectif de cette partie est de décrire le fonctionnement général des systèmes optiques sans fil et d'expliquer les options entrant en compte dans la construction de tels systèmes. Cette description devrait permettre, d'une part, de mieux comprendre les déterminants du prix et des performances des systèmes OSF et d'autre part, de faire le lien entre leurs performances et leurs prix.

Figure n°1: Architecture générale des systèmes optiques sans fil[14]



A quelques exceptions près, la plupart des liens OSF sont réalisés à l'aide de deux unités identiques situées de part et d'autre du lien et regroupant l'ensemble des fonctions du système. La figure n°1 représente un tel système. Certains constructeurs, comme Dominion, proposent toutefois des dispositifs où le système optique, composé de lentilles et de miroirs, est séparé du reste. Les premiers systèmes sont dits à tête intelligente alors que les seconds sont dits à tête passive[15]. L'avantage des systèmes à tête passive est de pouvoir installer la partie effectuant les conversions électro-optiques à l'intérieur et l'unité optique (la tête passive) à l'extérieur. Celle-ci ne nécessite aucune alimentation électrique, ne faisant que retransmettre dans l'atmosphère les signaux lumineux reçus par fibre optique. Cependant, peu de constructeurs adoptent cette architecture, étant donné la forte atténuation du signal causée par la multiplication des jonctions optiques. D'autre part, l'économie réalisée sur le câblage électrique est négligeable. En effet, comme les coûts de main d'œuvre doivent inévitablement être encourus pour placer la fibre optique reliant l'unité intérieure à l'unité extérieure, seul le prix du câble électrique est économisé.

[14] Figure traduite de celle de Scott Bloom (décembre 2001), "*The Physics of free space optics*", page 3
[15] Actipole (juin 2003), "Laser à Haut débit – Tête intelligente ou tête passive?", livre blanc

Les systèmes optiques ont pour rôle de converger le faisceau entrant sur le récepteur et de donner forme au faisceau sortant. Ils sont composés de miroirs et de lentilles. La figure n°1 représente un dispositif muni de trois systèmes optiques pour l'émission et la réception de données et pour l'orientation du dispositif. Il se peut également qu'il n'y ait qu'un seul système optique pour ces trois fonctions.

Dans le circuit émetteur, un laser est mis sous tension grâce à un *courant continu* auquel s'ajoute le signal électrique provenant du modulateur. Ce dernier régénère le signal arrivant au terminal optique et le modifie en fonction de nécessités propres à l'optique sans fil. Par exemple, afin de ne pas user trop vite les lasers en les laissant allumés trop longtemps, on change le signal de façon à éviter la répétition de bits identiques.

Le circuit récepteur, quant à lui, comprend un détecteur qui convertit en signal électrique le signal lumineux convergé par le système optique récepteur. Ce signal est ensuite préamplifié avant de passer dans le démodulateur qui restitue en sortie le signal tel qu'il l'était de l'autre côté du lien optique.

En plus des systèmes émetteurs et récepteurs de données, un autre sous-système assure aussi l'alignement correct des dispositifs. Pour ce faire, le faisceau reçu est également convergé sur un détecteur capable de déceler les variations spatiales de l'amplitude du signal dans un plan perpendiculaire au faisceau. Les informations recueillies par ce détecteur sont ensuite transmises à un processeur central qui calcule les corrections à apporter aux angles d'azimut et d'élévation du dispositif afin de maximiser la puissance du signal reçue par le récepteur. Le processeur central contrôle également des systèmes chauffants et réfrigérants qui permettent de maintenir des conditions de températures nécessaires au bon fonctionnement du dispositif.

Le laser et le détecteur sont les éléments centraux des appareils OSF puisqu'ils déterminent en grande partie leurs performances et leurs prix. Au centre du système, ils effectuent la conversion électro-optique.

Les critères de performance d'un laser sont:

- La puissance, qui permet d'augmenter la portée du dispositif OSF. Elle est mesurée en dBm, c'est-à-dire, en nombre de décibels par rapport à un milliwatt. Comme le signal du laser est modulé et varie donc au cours du temps, il faut distinguer la puissance maximale du laser de sa puissance moyenne, cette dernière déterminant la portée du système OSF. La puissance moyenne typique des lasers utilisés en OSF est de l'ordre de 10 dBm.

- La longueur d'onde de la lumière émise.
- La vitesse de modulation maximale qui détermine la bande passante susceptible d'être transmise par le laser.
- La distribution de la puissance lumineuse au sein du faisceau émis. Il existe deux grandes catégories de lasers en fonction de la distribution spatiale de la puissance lumineuse émise: les lasers à profil "gaussien" et ceux à profil "constant". Dans la première catégorie, la puissance au sein du faisceau est maximale en son centre et diminue en périphérie, conformément à une loi de gauss. Dans la deuxième catégorie, la puissance reste plus ou moins constante sur toute la largeur du faisceau. Les lasers à profil gaussien sont utilisés dans les systèmes à orientation automatique car ils permettent de concentrer plus d'énergie au centre du faisceau. De plus, le capteur spatial peut plus facilement calculer l'orientation adéquate grâce à la distribution de l'énergie reçue. Par contre, dans les systèmes dépourvus d'orientation automatique, des lasers à profil constant sont utilisés étant donné qu'un mauvais alignement du laser avec le détecteur est moins sanctionné en ce qui concerne la puissance reçue.
- La température de fonctionnement: le système OSF doit être opérationnel par tous les temps, sans grande dégradation de ses performances.
- La durée de vie: le laser est le composant du dispositif OSF qui s'use le plus rapidement et sera donc la principale origine de panne du système. La probabilité de dysfonctionnement est mesurée en "durée moyenne entre pannes" ou "mean time between failures" (MTBF). Pour les systèmes OSF, celle-ci varie entre 3 et 10 ans.

En optique sans fil, les lasers les plus utilisés sont les lasers VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) en raison de leurs avantages exceptionnels en matière de coûts et de performances. Leur puissance moyenne est raisonnable, ils ont une longue durée de vie et dissipent peu d'énergie, ce qui permet d'éviter l'utilisation de systèmes de refroidissement actifs[16].

Les critères de performance du détecteur sont:

- La sensibilité: la puissance minimale que doit avoir le signal reçu pour être correctement interprété par le détecteur. Comme la puissance de l'émetteur, celle-ci est également mesurée en dBm, mais dans ce cas, les valeurs sont toujours négatives étant donné que la sensibilité d'un récepteur est fortement inférieure au milliwatt. La sensibilité typique des détecteurs utilisés en OSF est de l'ordre de -30 à -50 dBm.

[16] Bloom, Korevaar, Schuster, Willebrand (avril 2003), "*Understanding the performance of free-space optics*"

- La puissance de saturation: au-delà de cette puissance, le signal reçu est trop important pour que le détecteur l'interprète sans faute. C'est pourquoi les constructeurs spécifient généralement une distance minimale entre les terminaux OSF. Généralement est spécifiée à côté de la puissance de saturation, la puissance au-delà de laquelle le détecteur subit des dommages irréversibles.
- La longueur d'onde de la lumière à laquelle le détecteur est sensible.

Pour les détecteurs utilisés en OSF, il existe deux grandes options: celle du matériau et celle de la technologie. En ce qui concerne le matériau, on utilise le plus souvent des détecteurs au silicium pour les longueurs d'onde autour de 850 nm et des détecteurs à base de Indium, de Gallium et d'Arsenic pour les longueurs d'onde autour de 1550 nm. Les deux technologies les plus fréquentes sont la technologie PIN et la technologie APD, les détecteurs APD étant plus sensibles en raison d'un processus d'amplification interne par avalanche.

Tableau n°2: Les catégories de détecteurs utilisés en OSF

	Longueur d'onde	
	750 – 850 nm	1310 – 1550 nm
Faible sensibilité (autour de -30 dBm)	PIN silicium	Pin InGaAs
Haute sensibilité (autour de -50 dBm)	APD silicium	APD InGaAs

La plupart des terminaux OSF restituent d'un côté du lien les symboles reçus de l'autre côté du lien de manière identique et dans le même ordre. A ce titre, on dit qu'ils sont indépendants du point de vue des protocoles utilisés sur les couches supérieures à la couche physique. Par conséquence, ils pourront être utilisés indistinctement pour transporter du trafic ATM, SDH ou Ethernet.

En ce qui concerne la connectique, on peut trouver sur les systèmes OSF trois types de ports:

- Les ports de données utiles: pour les modèles à faible bande passante il s'agira de ports de type RJ-45 tandis que les modèles à bande passante plus élevée seront dotés de ports optiques. Afin d'offrir une plus grande flexibilité, certains appareils sont équipés des deux types de ports.
- Les ports électriques qui fournissent l'alimentation électrique nécessaire.
- Le port de données de gestion: Il s'agit des données envoyées ou reçues par le gestionnaire du réseau afin de surveiller ou de contrôler le dispositif optique. Ce port est optionnel, comme les données de gestion peuvent très bien être

transmises parmi les données utiles grâce à un adressage IP. On parle de système de gestion "in-band" lorsque les données de gestion sont transmises dans le flux des données utiles et de système de gestion "out-band" lorsque celle-ci se fait par l'intermédiaire d'un réseau indépendant. Les systèmes "in-band" ont pour avantage d'économiser l'installation d'un réseau redondant. Par contre, ils ne permettront pas la communication avec les dispositifs lors d'un dysfonctionnement de ceux-ci. Le langage utilisé pour transmettre les données de gestion est généralement le "Simple Network Management Protocol" ou SNMP. Mais il ne suffit pas que les constructeurs rendent leurs dispositifs compatibles avec ce langage: il faut également fournir une interface logicielle adéquate qui s'intègre dans le système de gestion de réseau global de l'utilisateur d'OSF.

Titre 3: Contraintes limitatives et solutions

Cette partie a pour objectif de décrire les principales contraintes limitant les performances des systèmes optiques sans fil ainsi que les solutions développées par les constructeurs OSF pour surpasser ces obstacles à l'augmentation des performances de leurs produits. Sur les sites des sociétés OSF, nous pouvons trouver de multiples documents, appelés "white papers", décrivant les principes physiques régissant les communications OSF ainsi que les caractéristiques techniques des produits améliorant les performances. Il nous a semblé utile de synthétiser ici le contenu des ces documents afin de mieux comprendre les facteurs limitant les performances OSF et les circonstances dans lesquelles ces performances seront réduites ou accrues. La liste des "white papers" consultés est disponible à la fin de cette partie.

Nous passerons en revue quatre domaines:

- La dégradation du signal lors de sa propagation
- L'alignement des dispositifs et la survenance d'obstacles obstruant la ligne de vue
- La sécurité oculaire
- Les interférences solaires

3.1 Dégradation du signal lors de sa propagation

Lors de sa propagation dans l'atmosphère, le signal optique subit deux formes de dégradation:

- L'atténuation: Perte de puissance du signal à son arrivée au récepteur par rapport à la puissance du signal envoyé par l'émetteur, du fait de la traversée de l'atmosphère par ce signal.
- La scintillation: variation involontaire de l'intensité du signal, induite dans le temps et dans l'espace au niveau du récepteur, du fait de la traversée de l'atmosphère par ce signal.

a) L'atténuation

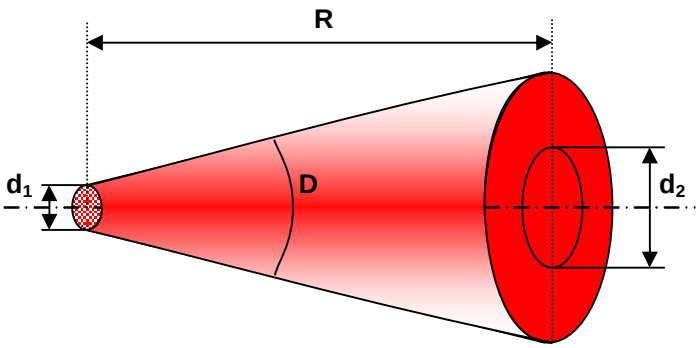
La perte de puissance du signal à son arrivée au détecteur résulte de plusieurs phénomènes d'atténuation:

- L'atténuation géométrique
- La dispersion par les hydrométéores
- L'absorption par les molécules en suspension dans l'air
- L'atténuation causée par la traversée de vitres

1) L'atténuation géométrique

L'atténuation géométrique résulte du fait que, par la divergence du faisceau optique, l'ensemble de l'énergie émise par l'émetteur n'est pas recueillie au niveau du récepteur. Le faisceau a en effet la forme d'un cône dont l'extrémité la plus large se trouve du côté du récepteur. Le phénomène d'atténuation géométrique dépend essentiellement de quatre facteurs représentés sur la figure n°2

Figure n°2: L'atténuation géométrique



Graphique personnel

- L'ouverture du système optique émetteur (d_1)
- L'ouverture du système optique récepteur (d_2)
- La distance entre l'émetteur et le récepteur (R)
- La divergence du faisceau (D)

2) La dispersion par les hydrométéores

Les hydrométéores sont des amas de molécules d'eau à l'état liquide ou solide présents dans l'atmosphère. Il s'agit par exemple du brouillard ou de la pluie. Lorsque le faisceau les traverse, il est en partie réfléchi et diffracté. Une partie de son énergie est alors dispersée dans toutes les directions et n'atteint pas le récepteur. Parmi les hydrométéores, celui qui atténue le plus un signal optique est le brouillard. Bien que cette cause d'atténuation ne soit pas constamment présente, c'est elle qui provoque les atténuations les plus intenses. C'est pourquoi les systèmes OSF doivent être conçus et implémentés en tenant compte du brouillard.

De plus, le manque de statistiques précises concernant le brouillard rend difficile la prédiction de ce facteur. En Belgique, par exemple, les relevés de brouillard les plus précis disponibles auprès de l'Institut Royal Météorologique concernent le voisinage de l'aéroport de Zaventem et n'ont qu'une précision temporelle d'une heure et une précision spatiale de 100 mètres. Or, la densité du brouillard change d'une minute à l'autre et peut fortement varier dans l'espace. Il ne sera donc jamais possible de prédire avec précision le phénomène d'atténuation par le brouillard. Outre le brouillard, les autres hydrométéores provoquant le plus d'atténuation sont les nuages bas et la pluie fine.

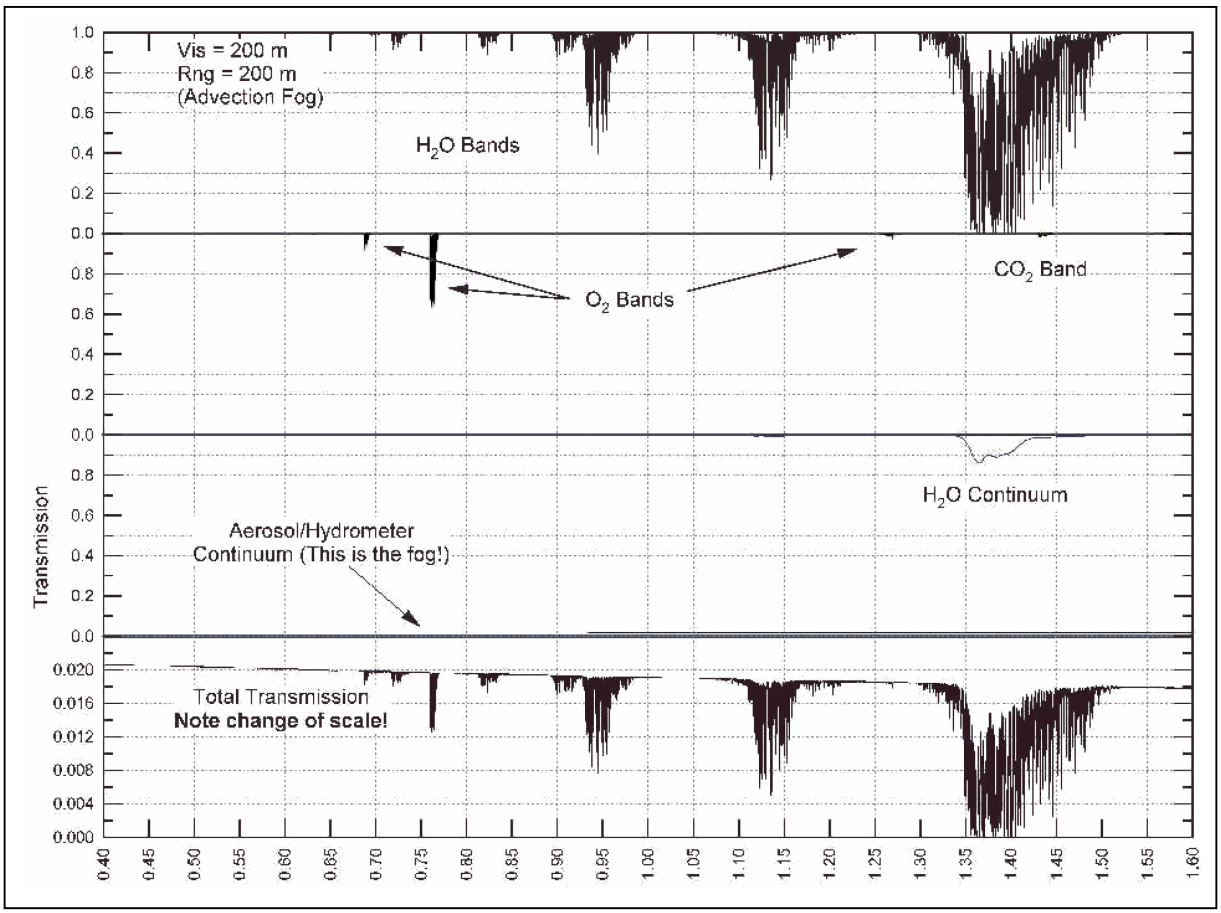
3) L'absorption par les molécules en suspension dans l'air

Il se peut également que l'énergie des photons qui constituent le faisceau optique soit absorbée par des molécules gazeuses en suspension dans l'air. Il s'agit essentiellement des molécules d'eau, d'oxygène et de dioxyde de carbone. Chaque molécule atténue plus certaines longueurs d'ondes que d'autres.

Sur la Figure n°3, nous pouvons observer la fraction du signal émis arrivant au récepteur (appelée transmission) après un trajet de un kilomètre dans un brouillard réduisant la visibilité à 200m en fonction de la longueur d'onde et du type d'atténuation. Dans le premier graphique en partant du haut est représentée la transmission résultant de l'absorption par la vapeur d'eau, dans le second, celle résultant de l'absorption par les molécules d'oxygène et de dioxyde de carbone, dans le troisième, celle résultant de la dispersion par les hydrométéores et dans la dernière, la transmission totale du signal.

Nous pouvons observer que l'atténuation par la vapeur d'eau est plus importante que celle provoquée par les autres gaz et que la dispersion par les hydrométéores est présente, quelque soit la longueur d'onde.

Figure n°3: Fraction transmise du signal en fonction de la longueur d'onde



Source: AirFiber

4) L'atténuation causée par la traversée de vitres

Les dispositifs OSF ont pour avantage de pouvoir être installés derrière une fenêtre. Cependant, une partie du signal est réfléchie à chaque fois que le faisceau traverse une surface entre l'air et le verre. Pour du verre normal, cette atténuation du signal par surface est de l'ordre de 4%. Lorsqu'un double vitrage est traversé, le faisceau traverse 4 surfaces et l'atténuation cumulée est donc d'environ 15%. Cette atténuation peut être beaucoup plus importante lorsque du verre teinté est traversé.

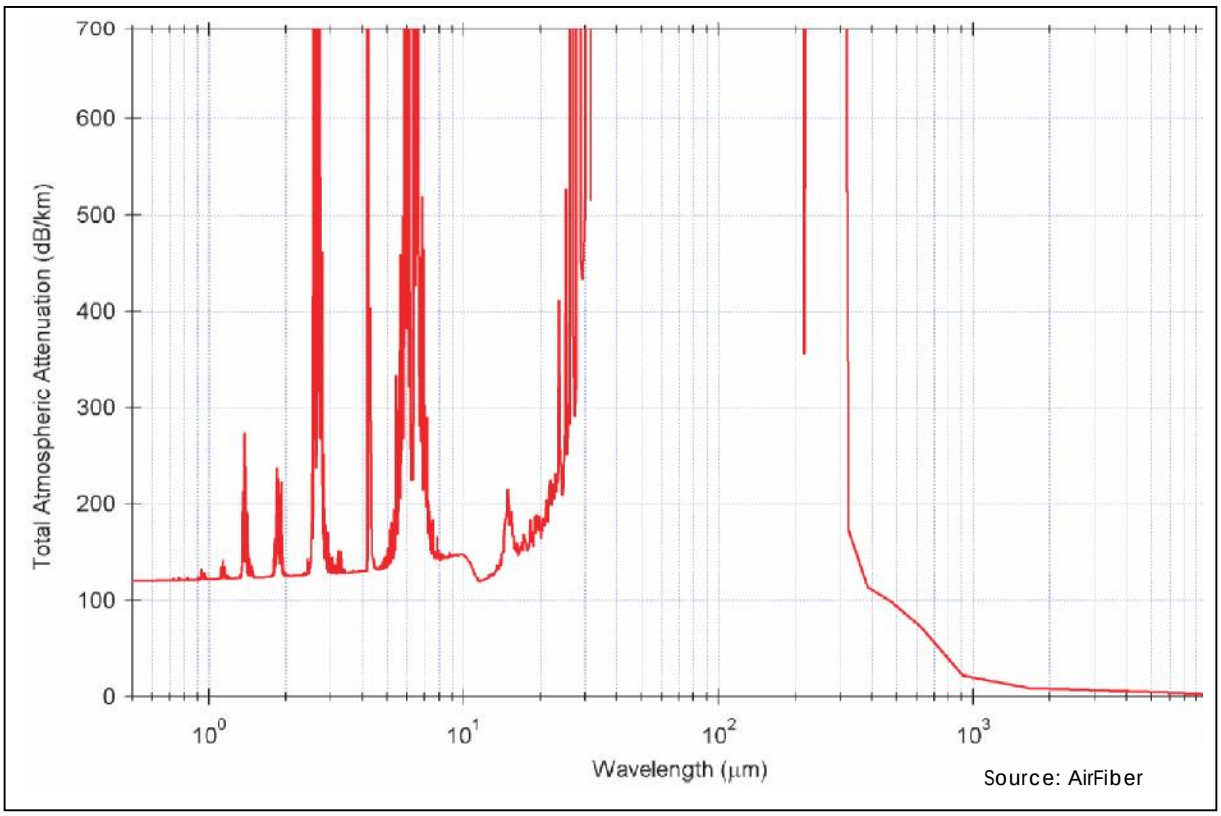
SOLUTIONS

Deux solutions peuvent être envisagées pour combattre l'atténuation:

- La réduction de la divergence du faisceau et l'utilisation de récepteurs avec une ouverture plus grande permettent de réduire le phénomène d'atténuation géométrique.
- La sélection d'une longueur d'onde idéale qui minimiserait la dispersion par les hydrométéores et l'absorption moléculaire.

Voyons si cette dernière solution est envisageable. Pour cela, observons la figure n°4 représentant l'atténuation par un brouillard à 120 dB/km sur une plage de longueurs d'ondes allant de moins d'un micromètre à plus d'un millimètre.

Figure n°4: Atténuation par un brouillard à 120 dB/km



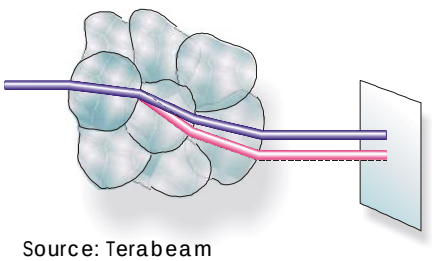
Nous pouvons observer que l'atténuation n'est jamais particulièrement plus faible à une longueur d'onde plutôt qu'une autre dans les longueurs d'ondes optiques (inférieures au millimètre). Seul un minimum local existe autour de 12 µm.

En réalité, la sélection de la longueur d'onde s'effectue en raison d'autres critères que l'atténuation[17]. Voyons les différentes longueurs d'onde optiques fréquemment utilisées et les avantages et inconvénients qu'elles présentent:

- 780 – 850 nm: Cette bande de longueurs d'ondes permet l'utilisation de composantes (lasers et récepteurs) bon marché et performantes à base de silicium. Un autre atout de ces longueurs d'ondes est que l'atténuation y est faiblement inférieure à celle rencontrée pour les longueurs d'ondes plus élevées. Un inconvénient est que le faisceau transportant des informations confidentielles pourrait être détecté par du matériel de vision infrarouge mais il sera dans tous les cas impossible à démoduler de cette manière.
- 1520 – 1600 nm: Les composantes disponibles y sont un peu plus chères. Comme l'effet de scintillation est inversement proportionnel à la longueur d'onde, il est deux fois moins important en 1550 nm qu'en 850 nm. Le plus gros avantage est que, pour des raisons de sécurité oculaire, il est permis d'émettre des puissances 55 x fois plus élevées qu'en 780 nm. Ce point sera abordé plus tard.
- 10 µm: L'utilisation de cette longueur d'onde est récente et la technologie est peu répandue. Son efficacité est d'autre part contestée. Certains prétendent que cette longueur d'onde présente des caractéristiques d'atténuation plus favorables[18]. Cependant, l'avantage concernerait surtout les brouillards peu denses, circonstances dans lesquelles les dispositifs à d'autres longueurs d'ondes se débrouillent très bien.

b) La scintillation

Figure n°5: L'effet de scintillation



Source: Terabeam

Le phénomène de scintillation résulte de la traversée de poches d'air de températures différentes. Celles-ci possèdent des indices de réfraction différents et agissent comme des lentilles qui dévient la trajectoire du faisceau. Comme ces poches

[17] Fsona (février 2001), "*Wavelength selection for optical wireless communications systems*", white paper
[18] Achour M. (2002), "*Free Space Optics Wavelength Selection: 10µ Versus Shorter Wavelengths*"

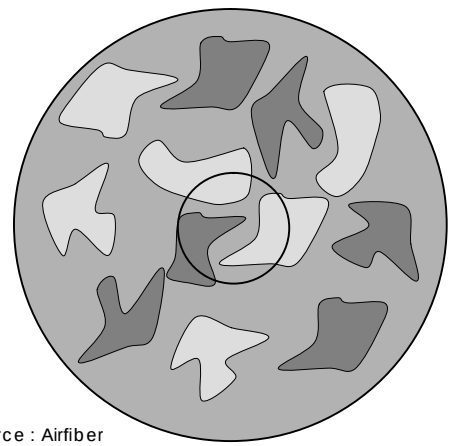
bougent au cours du temps, les variations spatiales induites dans le faisceau varient également dans le temps à une vitesse dépendant de l'intensité du vent. La scintillation dépend donc de deux facteurs: premièrement, la présence en-dessous de la trajectoire du faisceau d'objets chauffés par le soleil faisant à leur tour augmenter la température de l'air à leur proximité et deuxièmement, l'intensité du vent. La durée de ces fluctuations est de l'ordre de la milliseconde. Selon les tests effectués à San Diego par Airfiber, cet effet varie d'un ordre de grandeur à l'autre pendant un journée avec un maximum au milieu de une journée lorsque la température est la plus élevée. L'effet augmente fortement avec la distance entre l'émetteur et le récepteur. Notons que l'effet de scintillation ne s'ajoute presque jamais à celui d'atténuation par hydrométéores comme les conditions climatiques engendrant ces phénomènes se combinent très rarement.

SOLUTIONS

Peu de solutions permettent de réduire la scintillation, mais, son effet sur les performances étant beaucoup plus réduit que l'atténuation, il s'agit d'un problème de second ordre.

L'utilisation de récepteurs présentant une grande ouverture combat toutefois la scintillation étant donné qu'elle permet la récolte du signal sur une surface plus grande par rapport à l'amplitude des variations spatiales induites par la scintillation. Cet effet peut être expliqué par la figure n°6.

Figure n°6: illustration de l'effet de la taille de l'ouverture sur la scintillation



Source : Airfiber

La scintillation provoque l'apparition sur l'ouverture réceptrice de taches plus claires ou plus sombres qu'elles ne l'auraient été sans scintillation. Si l'ouverture du récepteur est du même ordre de grandeur que la taille des taches, la probabilité qu'une tache recouvre l'entièreté de l'ouverture et que des données soient donc transmises de façon erronée est relativement élevée. Par contre, si l'ouverture du récepteur est beaucoup plus grande que la taille de taches, elle couvrira en moyenne autant de taches claires que de taches sombres et l'intensité moyenne du signal convergé sur le détecteur sera proche de celle que le signal aurait eue sans scintillation.

D'autre part, afin de combattre l'effet de scintillation, la société AOptix propose des produits utilisant la technologie d'optique adaptative empruntée aux télescopes d'observation spatiale[19]. Elle consiste à corriger le signal de façon active à l'aide de miroirs déformables. Cependant, ces modèles ne semblent pas très répandus, le coût d'un tel système étant trop important par rapport aux avantages qu'il apporte.

3.2 Alignement des dispositifs et obstacles

Afin de fonctionner correctement, les dispositifs OSF doivent être parfaitement alignés en tout moment. Cela signifie que le faisceau émis par le laser émetteur doit atteindre le détecteur du dispositif récepteur. D'autre part, il ne peut y avoir d'objets obstruant le faisceau. On dit qu'il doit y avoir "ligne de vue". Si un oiseau passe à travers le faisceau, la communication sera interrompue.

Les problèmes d'alignement proviennent de mouvements du support du dispositif OSF, c'est-à-dire de l'immeuble sur lequel il repose. Ces mouvements peuvent être répertoriés en trois catégories en fonction de leurs fréquences. Le Tableau n°3 illustre ces catégories.

Tableau n°3: catégories de mouvements des supports OSF

Type de mouvement	Période d'un cycle de mouvement	Origine
Basse fréquence	De quelques minutes à plusieurs mois	Elongation et rétrécissement de l'immeuble en fonction de la température
Fréquence moyenne	Quelques secondes	Le vent fait bouger l'immeuble
Haute fréquence	Moins d'une seconde	Activité sismique, activité humaine

SOLUTIONS

Alignement

Afin d'assurer un alignement des dispositifs en tout temps, deux approches peuvent être empruntées:

- L'utilisation de faisceaux fortement divergents (de 2 à 10 milli radians): Dans cette situation, le faisceau est, au niveau du récepteur, beaucoup plus large que l'ouverture de celui-ci. L'émetteur et le récepteur ont donc une certaine marge de mouvement relatif. Il en résulte cependant une forte atténuation géométrique qui réduit la portée des dispositifs.

[19] Graves J., Drenker S. , "*Advancing Free Space Optical communications with Adaptive Optics*"

- L'utilisation de systèmes d'autotracking: ces systèmes permettent de détecter les mouvements relatifs de l'émetteur et du récepteur et d'apporter des corrections à leurs orientations. Des divergences beaucoup plus faibles peuvent donc être utilisées (entre 0,2 et 1 milli radian), ce qui réduit l'atténuation géométrique et augmente donc la portée des dispositifs.

Le choix d'une approche plutôt qu'une autre correspond à celui entre la performance et les faibles coûts. Les systèmes d'autotracking, bien que plus performants, sont en effet beaucoup plus coûteux.

Obstacles

Il est impossible d'empêcher les oiseaux d'obstruer le faisceau. On peut par contre utiliser plusieurs faisceaux et garantir que ceux-ci ne soient jamais obstrués simultanément. Il faudra pour cela s'assurer que la distance entre les faisceaux soit supérieure à la taille des obstacles potentiels. Un autre avantage résultant de l'utilisation de faisceaux multiples est la redondance des systèmes émetteurs et/ou récepteurs en cas de panne. Les faisceaux multiples augmentent cependant fortement la complexité et donc les coûts des systèmes optiques.

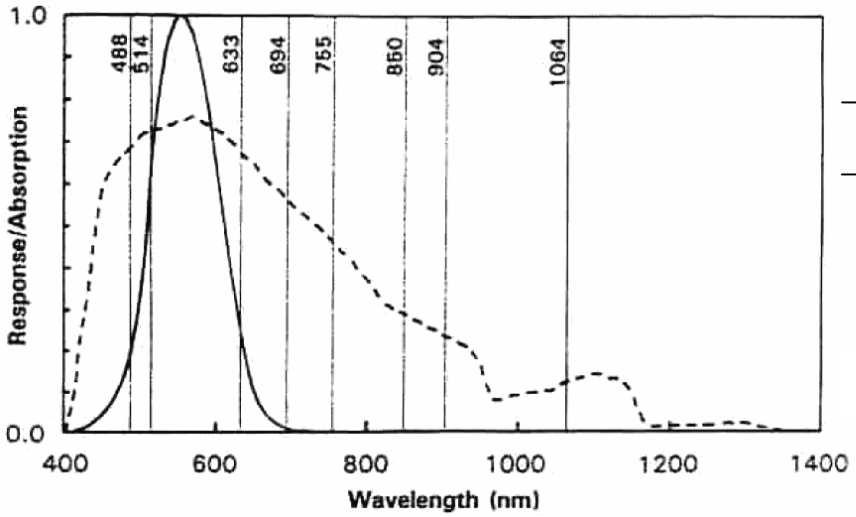
3.3 Sécurité oculaire[20]

Dès l'apparition des premiers produits OSF la sécurité fut une préoccupation importante. On ne peut en effet pas envoyer un faisceau de puissance trop élevée sous peine de causer des dommages à la peau mais surtout à la rétine (l'œil ayant l'aptitude de converger la lumière et donc de multiplier la puissance accumulée sur la rétine par cm^2).

La figure n°7 représente l'absorption rétinienne et la réponse photopique de l'œil en fonction de la longueur d'onde. La réponse photopique de l'œil mesure sa capacité à détecter la lumière. Seules les longueurs d'onde entre 400 et 1400 nm sont convergées par l'œil sur la rétine. Les autres sont absorbées par la cornée. Toutefois, parmi les longueurs d'onde qui atteignent la rétine, uniquement celles entre 450 et 700 sont détectées par l'œil. Les longueurs d'onde entre 700 et 1400 sont donc les plus dangereuses car elles atteignent la rétine sans pour autant provoquer une réaction d'évitement de la part de la personne exposée au faisceau.

[20] LightPointe Communications (2002), "*Free space optics: laser safety*", white paper

Figure n°7: Absorption rétinienne et Réponse photopique de l'oeil



Source:
"*FSO Laser Safety*", Lightpointe, 2002

Il existe plusieurs standards concurrents en ce qui concerne la sécurité oculaire élaborés par les autorités compétentes de différents pays. Bien que certains détails les différencient, ils classifient presque tous les appareils optiques en quatre catégories de puissance croissante et édictent pour chaque catégorie des consignes et périmètres de sécurité à respecter. En vue de permettre une utilisation de leurs produits à grande échelle, la plupart des constructeurs OSF offrent des produits classés dans la catégorie 1 ou 1M. La classe 1 permet l'exposition directe de l'œil sans dommages persistants, même avec l'utilisation d'appareils grossissants comme une loupe. La classe 1M, par contre, prescrit l'emploi de matériel grossissant.

Les puissances maximales autorisées pour appartenir à une certaine catégorie dépendent de la longueur d'onde du signal émis, suivant les caractéristiques d'absorption et de réponse de l'œil. Ainsi, pour appartenir à la catégorie 1M, un appareil OSF fonctionnant à 1550 nm peut émettre une puissance lumineuse 55 fois plus importante qu'un appareil fonctionnant à 850 nm. Bien qu'à partir de 1400 nm, plus aucune énergie n'atteint la rétine, elle sera absorbée par la cornée, ce qui explique les limitations de puissance même au-delà de 1400 nm.

Il est important de préciser que ce n'est pas la puissance des lasers utilisés qui sert de base à la classification mais la densité énergétique du faisceau, en Watt/cm², à la sortie du dispositif OSF. Le signal émis par le laser est en effet élargi par le système optique émetteur à la sortie duquel il s'étend sur un diamètre de quelques dizaines de centimètres. La quantité d'énergie captable par l'œil sera donc moindre. De plus, le signal lumineux étant modulé, son amplitude varie du simple au double. C'est la puissance moyenne de ce signal à la sortie du système OSF qui déterminera sa classe et non la puissance maximale, car c'est cette puissance moyenne qui détermine les risques encourus par l'œil.

Pour augmenter la puissance émise tout en conservant la classification 1M, les constructeurs OSF peuvent donc recourir à plusieurs solutions:

- Utiliser des longueurs d'onde en dehors du spectre d'absorption de la rétine
- Augmenter le diamètre de l'ouverture émettrice
- Répartir la puissance émise sur plusieurs faisceaux

3.4 Interférences solaires

Les interférences causées par le soleil dans les communications optiques sans fil ont été étudiées par Vladimir Sidorovich[21]. Il répertorie quatre catégories de situations dans lesquelles les liens OSF peuvent être perturbés sous l'effet du soleil. Il évalue également les probabilités de ces situations ainsi que l'ampleur des perturbations associées. Bien que les effets du soleil peuvent entraîner une dégradation voire même une rupture du lien optique, ils ne provoquent jamais des dommages irréversibles au matériel.

Les situations à effets solaires défavorables sont les suivantes:

- Le photo détecteur est directement exposé à la lumière du soleil: Dans ce cas, la puissance en provenance du soleil excède jusqu'à plus de 600 fois celle du signal transportant l'information. Avec un tel bruit d'arrière fond, le lien est inévitablement interrompu. Cependant, un tel événement est de probabilité relativement faible et assez facile à prévoir avec précision. De plus, les périodes d'exposition directe au soleil ne dépasseront jamais trois minutes par jour et ne se produiront pas plus de 25 jours par an, si le ciel est dégagé.
- Le photo détecteur est exposé à la lumière du soleil réfléchie de façon spéculaire par des objets plats comme des vitres: Dans ce cas, la durée et la probabilité de l'interférence sont du même ordre de grandeur que celles résultant de l'exposition directe au soleil. La seule différence est que la puissance du signal interférent dépend de la distance, de la taille et de la réflexivité de la surface réfléchissante. Il n'y aura donc pas nécessairement une dégradation du lien optique.
- Le photo détecteur est exposé à la lumière du soleil dispersée par des hydrométéores (nuages ou brouillard): Les conditions les plus dangereuses se produiront lorsque l'angle Soleil-Emetteur-Récepteur est le plus faible. Il faut distinguer deux types de situations: celles où un nuage se trouve entre le soleil et le lien optique, ce dernier étant relativement dégagé et celles où du

[21] Sidorovich V. G. (2002), "*Solar background effects in wireless optical communications*"

brouillard ou un nuage bas recouvre le lien optique. Dans le premier cas, le signal transportant les données sera relativement puissant par rapport au signal interférent et il n'y aura pas de dégradation du lien. Dans le second cas, le signal transportant les données sera affaibli par les particules aqueuses en suspension et ne pourra pas toujours être distingué du signal interférent par le récepteur.

- Le photo détecteur est exposé à la lumière dispersée par des objets solides illuminés par le soleil: Même dans les cas les plus extrêmes, ce type d'interférence n'entraîne jamais de dégradation du lien optique.

Par ailleurs, outre celui du photo détecteur, le soleil peut également perturber le fonctionnement de l'émetteur. Cette situation se produit lorsque le soleil illumine directement la photodiode qui mesure la puissance du signal émis par le laser. L'appareil croit alors émettre un signal trop puissant et le réduit à un niveau quasi nul, ce qui provoque une rupture du lien optique.

Cependant, l'auteur conclut que le temps total d'indisponibilité annuel causé par les interférences solaires est inférieur d'au moins un ordre de grandeur par rapport à celui résultant de conditions météorologiques défavorables causant une atténuation trop importante du signal.

Les interférences solaires dans un lien OSF peuvent être évitées:

- Par une orientation réfléchie du lien: une modification de la position relative des terminaux optiques de quelques mètres permet de réduire fortement les effets du soleil.
- Par l'apposition de filtres sur l'ouverture réceptrice.

LISTE DES WHITE PAPERS CONSULTES POUR CETTE PARTIE:

- Bloom S. (décembre 2001), "*The physics of free-space optics*", Airfiber, white paper
- Bloom, Korevaar, Schuster, Willebrand (avril 2003), "*Understanding the performance of free-space optics*"
- LightPointe Communications (2002), "*Understanding free space optics*", white paper
- LightPointe Communications (2001), "*Free space optics carrier class features*"
- Schuster J. (2002), "*Free space optics technology overview*", Terabeam
- Bloom, S. (mai 2002), "*The last mile solution: hybrid FSO Radio*", Airfiber
- Alwan J. (2001), "*Eye Safety and wireless optical networks*", Airfiber
- Communication By Light (janvier 2003), "*LaserLinks for GSM/UMTS*", application note

Titre 4: Performances

Pour mener à bien une analyse débouchant sur le choix d'une solution OSF, il est indispensable de pouvoir estimer correctement les performances des systèmes envisagés. L'intention de cette partie est donc de clarifier le concept de "performance" relatif à l'optique sans fil et de proposer des critères objectifs permettant d'estimer cette notion.

4.1 Les trois mesures de performance

L'information provenant des constructeurs OSF n'est pas toujours très claire et prête à confusion. Souvent, les performances sont surévaluées dans le but d'augmenter les ventes à court terme. Cependant, à plus long terme, la déception des clients ne pourra que porter préjudice à l'image de l'OSF.

La raison essentielle de ce manque de clarté est que les critères de performances sont multiples et qu'il n'est pas possible d'exceller simultanément pour chacun d'eux. Il existe essentiellement trois facteurs de performance jouant mutuellement en défaveur l'un de l'autre:

- La portée: distance parcourue par le signal OSF

- La bande passante: nombre de bits de données transmis par seconde. Il est important de distinguer la bande passante physique de la bande passante effective. La bande passante physique est la fréquence de modulation du signal lumineux tandis que la bande passante effective correspond au nombre de bits correctement transmis par seconde. Pour obtenir cette grandeur, il faut soustraire à la bande passante physique la fraction de bits qui n'a pas pu être correctement communiquée. Cette fraction est appelée BER (Bit Error Rate) et dépend de divers facteurs comme les conditions météorologiques. Pour décrire les performances de bande passante d'un système OSF, l'usage est de citer la bande passante physique ainsi que le BER correspondant. En optique sans fil, le BER varie entre 10^{-6} et 10^{-12} dans des conditions climatiques normales, mais peut augmenter fortement dans des conditions plus inclémentes.

- La disponibilité du lien[22]: La fraction du temps, calculée sur une année, au cours de laquelle le lien OSF est pleinement opérationnel. Une panne du matériel ou des mauvaises conditions climatiques peuvent individuellement ou en combinaison provoquer un disfonctionnement du lien.

La notion de disponibilité est utilisée par les opérateurs pour définir des contrats de niveau de service (ou Service Level Agreement, SLA) avec leurs clients. L'opérateur garantira par exemple une disponibilité de la connexion de 99,9%, ce qui correspond à une durée cumulée maximale de 8 heures de panne par an. L'intérêt de cette mesure est plus important pour qualifier des réseaux centraux que des réseaux périphériques, étant donné qu'un incident au centre du réseau peut provoquer le disfonctionnement de l'ensemble des réseaux périphériques. Cependant, les applications et les consommateurs finaux étant de plus en plus exigeants, la disponibilité devient également une préoccupation dans les réseaux périphériques.
Bien que, à la base, la disponibilité soit un pourcentage, elle est souvent exprimée en nombre de 9. Le tableau n°4 illustre cette mesure et fournit des ordres de grandeur de disponibilité.

Tableau n°4: Disponibilité, durée de panne annuelle et réseau type

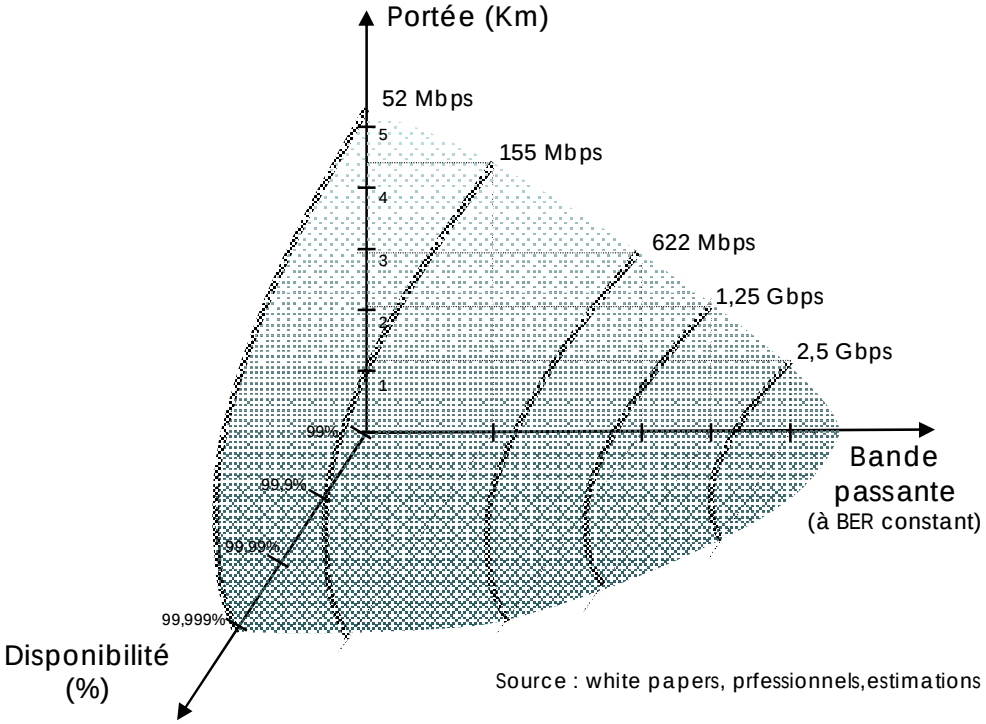
Nombre de 9	Disponibilité	Durée de panne annuelle	Réseau type
2	99%	3 jours et 13h	Mauvais accès résidentiel
3	99,9%	8 heures	Bon accès résidentiel
4	99,99%	53 minutes	Réseau de fibre métropolitain
5	99,999%	5 minutes	Réseau de fibre international

Il faut également distinguer la disponibilité d'une connexion fournie par un opérateur à un client de la disponibilité d'un lien ou d'un dispositif fonctionnant au sein du réseau de cet opérateur. Dans le cadre de l'analyse des performances d'un système OSF, ce sera évidemment la disponibilité de ce dispositif que nous évoquerons. Cependant, cette mesure doit être mise en rapport avec la disponibilité du réseau global. En absence de chemins redondants, la disponibilité d'une connexion vendue par un opérateur est au maximum égale à celle du lien ou du dispositif présentant la disponibilité la plus faible de tous les liens ou dispositifs intervenant dans cette connexion. Lors du choix d'implémentation d'une solution optique sans fil, il sera donc essentiel pour l'opérateur de prendre en considération la disponibilité du lien OSF. Par contre, lorsqu'il est installé en tant que chemin redondant, le lien OSF augmente la disponibilité générale du réseau, quelque soit la disponibilité propre du lien.

[22] Britz D. (2002), "A review of the concept of availability as it relates to Free Space Optical Communications", AT&T Labs

La figure n°8 représente les contraintes liant distance, bande passante et disponibilité. Cette figure sera différente en fonction des technologies OSF utilisées et de l'endroit où le lien est installé. Bien qu'elle soit fortement simplifiée par rapport aux réalités physiques, la figure illustre bien ce que les constructeurs OSF sont en mesure d'offrir à leurs clients.

Figure n°8: Relations liant les facteurs de performance des systèmes OSF



Source : white papers, prfessionnels,estimations personnelles

Cette figure a uniquement pour objectif de fournir des ordres de grandeur. Elle a été dessinée intuitivement à partir de spécifications de dispositifs, d'explications fournies dans des "white papers"[23] et de discussions avec des professionnels. Les différentes sources étant souvent en contradiction, il est difficile d'en tirer des conclusions précises.

Nous pouvons cependant affirmer que globalement:

- Les systèmes OSF peuvent atteindre des distances de plus de 5 kilomètres, mais au prix d'une mauvaise disponibilité et uniquement pour des bandes passantes de l'ordre de 50 Mbps.
- Les systèmes OSF peuvent communiquer des bandes passantes jusqu'à 2,5 Gbps[24], mais ne peuvent alors qu'atteindre des distances de l'ordre d'un kilomètre et beaucoup moins si l'on désire une disponibilité élevée.
- Des disponibilités de plus de 4 neufs ne sont possibles que sur des distances inférieures à environ deux kilomètres.

[23] Teong Ong J. (novembre 2002) "*Trial based study of Free Space Optics Systems in Singapore*", Bloom, Korevaar, Schuster, Willebrand (2003), "*Understanding the performance of free-space optics*" Communication By Light (janvier 2003), "*LaserLinks for GSM/UMTS*", application note

[24] Walsh J. (juillet 2004), "fSona announces new scalable 2.5 Gbps Free Space Optical Wireless Systems"

Pour être complet, il faut ajouter que tous les produits OSF ne permettent pas d'atteindre les performances décrites ci-dessus. Il existe en effet des produits OSF de moindre qualité aux performances plus réduites mais de prix plus faibles.

4.2 Critères objectifs de performance

Bien que utile pour expliquer aux clients potentiels d'OSF ce qu'ils peuvent attendre de la technologie, la figure n°8 est moins efficace pour aider un acheteur à comparer entre eux les produits OSF. En effet, cette figure prend en compte des éléments extérieurs aux systèmes à comparer, notamment les conditions climatiques. Il faudra donc envisager une autre approche qui consiste à étudier non pas les performances pratiques des systèmes mais les capacités techniques qui permettent d'obtenir ces performances.

Pour ce faire, observons l'équation qui décrit la relation entre les caractéristiques techniques du système, les perturbations extérieures et les performances pratiques:

$$P_R = P_T \times \frac{d_2^2}{(d_1 + D \times R)^2} \times 10^{(-\frac{a \times R}{10})}$$

P_R = Puissance reçue au récepteur (mW)
P_T = Puissance émise à l'émetteur (mW)
d_1 = Ouverture à l'émetteur (m)
d_2 = Ouverture au récepteur (m)
D = Divergence du faisceau (rad)
R = Distance entre émetteur et récepteur (m)
α = Facteur d'atténuation atmosphérique (dB/km)

La puissance du signal au récepteur est donc égale à la puissance transmise, multipliée par un coefficient d'atténuation géométrique et un coefficient d'atténuation atmosphérique.

Afin d'estimer les capacités intrinsèques d'un système indépendamment des perturbations qui lui sont extrinsèques, négligeons le facteur d'atténuation atmosphérique. D'autre part, le signal sera correctement reçu à condition que sa puissance au récepteur soit supérieure à la sensibilité du récepteur. Il est donc logique d'utiliser comme indicateur des capacités intrinsèques le rapport entre ces deux grandeurs. Ce rapport est appelé la marge du lien ou link margin[25]:

$$Marge = \frac{P_R}{S_R} = \frac{P_T}{S_R} \times \frac{d_2^2}{(d_1 + D \times R)^2}$$

P_R = Puissance reçue au récepteur (mW)
P_T = Puissance émise à l'émetteur (mW)
S_R = Sensibilité du récepteur (mW)
d_1 = Ouverture à l'émetteur (m)
d_2 = Ouverture au récepteur (m)
D = Divergence du faisceau (rad)
R = Distance entre émetteur et recepteur (m)

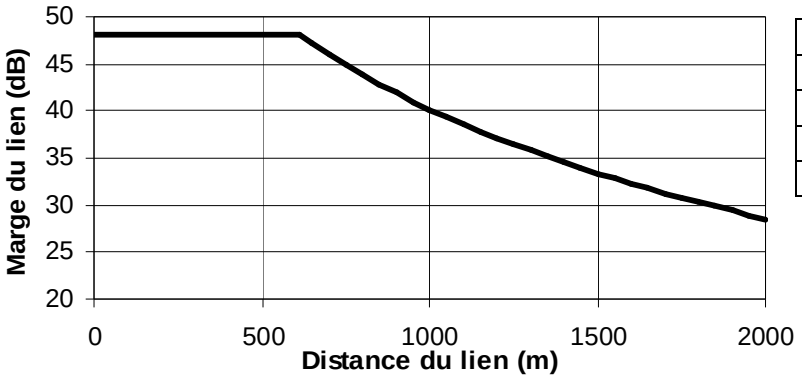
[25] Fsona (2002), "*Link margin and free space optics*", application brief

La marge du lien est le rapport entre la puissance reçue en absence d'atténuation atmosphérique et la puissance reçue minimale en dessous de laquelle les données ne sont plus correctement transmises. Elle illustre donc la capacité d'une installation OSF à faire face à l'atténuation atmosphérique. Notons que cette marge tient compte non seulement des caractéristiques du système OSF, mais également de la distance entre les dispositifs qui composent le lien. Il ne s'agit donc pas d'une propriété d'un dispositif mais de celle d'un lien particulier. Pour les systèmes actuels, les marges des liens varient entre 30 et 60 dB. Remarquons que des formules plus compliquées doivent être utilisées pour tenir compte de caractéristiques plus complexes telles que l'auto tracking ou la multiplicité de faisceaux.

Lors de la détermination des caractéristiques, il convient également de se mettre d'accord sur la manière de les mesurer. La puissance de l'émetteur est-elle mesurée au niveau du laser ou de l'ouverture? S'agit-il de la sensibilité du récepteur à l'ouverture ou au niveau du détecteur? A quel taux d'erreurs maximal cette sensibilité correspond-elle? De même, la divergence du faisceau doit être déterminée de manière conventionnelle. Elle est en effet égale à l'angle à partir duquel l'intensité du signal lumineux correspond à une fraction conventionnelle de l'intensité de ce signal au centre du faisceau.

Ces mesures permettent alors de déterminer pour chaque produit OSF une fonction reliant la marge du lien à la distance parcourue par celui-ci. La figure n°9 illustre une telle fonction.

Figure n°9: Relation entre marge et distance d'un lien



Puissance émise à l'émetteur	8 mW
Ouverture à l'émetteur :	1,5 cm
Puissance reçue au récepteur:	-30 dBm
Ouverture au récepteur:	20 cm
Divergence du faisceau:	0,3 mRad

Source : calculs personnels

Notons que pour le dispositif représenté, il n'y a pas d'atténuation géométrique jusqu'à une distance d'environ 600m, comme dans ces conditions le faisceau au récepteur est moins large que l'ouverture de celui-ci. Une fois que l'utilisateur potentiel d'OSF a choisi un produit délivrant une certaine bande passante et a défini la distance couverte par le lien, il peut déterminer, à l'aide d'un tel graphique, la

marge du lien. Sur base de cette marge et de statistiques météorologiques propres à la région, il pourra ensuite estimer la disponibilité espérée du lien.
La figure n°10 illustre le pouvoir atténuant du brouillard. Toutefois, dans la grande majorité des cas, peu de statistiques précises seront disponibles et seule l'installation du lien pendant une période relativement longue permettra d'estimer la disponibilité à long terme. Il ne sera donc presque jamais possible de prédire les performances finales d'un lien avant de l'avoir installé et testé.

Figure n°10: Illustration du pouvoir atténuant du brouillard

Lien situé à Denver, Colorado. La ligne jaune fait 2,4km. Le grand immeuble au premier plan se trouve à 300m
Source: Journal of optical networking, June 2003, Vol. 2, N° 6

4.3 Conclusion

Dans cette partie, nous avons mis en avant les trois facteurs de performances des communications optiques sans fil: la distance, la bande passante et la disponibilité. Comme ces facteurs dépendent les uns des autres et que l'un ne peut être maximisé qu'aux dépens des autres, il faudra toujours les citer tous les trois lorsque nous aborderons le sujet des performances.

Nous avons également vu que pour estimer la performance des dispositifs de façon objective, sans tenir compte des conditions climatiques locales, la marge du lien constitue une mesure adéquate des capacités techniques des produits OSF. Représentée sur un graphique en fonction de la distance, la marge du lien permet de prédire la portée maximale des dispositifs en connaissance de statistiques météorologiques et de la disponibilité souhaitée du lien.

Titre 5: Offre des constructeurs

Il existe en tout une trentaine d'entreprises produisant des dispositifs OSF. Certaines sont spécialisées dans cette activité alors que d'autres, comme Terabeam, développent également des systèmes hertziens. Quelques sociétés, comme Canon, sont également présentes dans des métiers complètement différents.

L'observation de l'offre de ces entreprises amène à les répartir en deux groupes:

- Celles qui vendent plusieurs gammes de produits aux performances et aux prix divers. Généralement ces produits sont répartis en trois gammes. La gamme la plus basse offrant des produits basiques alors que la plus haute gamme présente des modèles avec auto-tracking et jusqu'à 8 faisceaux redondants. Font partie de ce groupe de sociétés Fsona, Lightpointe, Terabeam et Canon.

- Celles qui ne vendent que des produits basiques de basse gamme mais à des prix compétitifs. Ces sociétés sont beaucoup plus nombreuses que celles du premier groupe. Citons entre autre IRlan, PAV, CBL et Alcom. Il apparaît donc relativement facile de produire des dispositifs de bas de gamme, tandis que les options présentes sur les dispositifs de gamme plus haute requièrent plus de savoir faire et de fonds.

D'autre part, nous pouvons constater de façon générale que les sociétés productrices de dispositifs OSF ne vendent pas uniquement les appareils qu'elles construisent mais également tout ce qu'il y a autour. Ceci comprend:

- Les Terminaux OSF: le produit central
- Des accessoires: les mâts de fixation des dispositifs, les systèmes d'alimentation électrique,...
- Du software: Il s'agit d'une part, de programmes permettant de calculer et de prévoir les performances des dispositifs et d'autre part, de programmes assistant le client dans la gestion de son réseau.
- Des formations: les sociétés OSF forment leurs gros clients ainsi que leurs distributeurs à entretenir leurs produits.
- Les garanties: Il existe différents types des garanties en ce qui concerne la durée et l'étendue des dommages couverts.

Toutes ces composantes de l'offre sont vendues en paquet ou séparément.

Titre 6: Conclusions

Dans un premier temps, nous avons étudié les caractéristiques des systèmes optiques sans fil et avons découvert que ceux-ci ne sont pas des produits standards. Il existe en effet plusieurs manières de concevoir ces liens optiques : certains sont à tête intelligentes et d'autres sont à tête passive, certains fonctionnent à des longueurs d'ondes de 850 nm et d'autres à des longueurs d'onde de 1550 nm. Nous avons également pu observer que les dispositifs OSF sont des produits de grande précision présentant une certaine fragilité. Les lasers, à durée de vie limitée, doivent par exemple être maintenus dans des conditions de températures et d'humidité adéquates.

Nous avons ensuite décrit les contraintes limitatives des technologies optiques sans fil. Parmi celles-ci, l'atténuation par les hydrométéores et en particulier par le brouillard est sans conteste la plus contraignante, d'autant plus qu'à l'heure actuelle, aucune solution efficace ne permet de la contourner. Les autres types de dysfonctionnements des systèmes OSF, comme les problèmes d'alignement des dispositifs, peuvent par contre être surpassés par des systèmes de correction, certes coûteux mais efficaces.

Dans la partie suivante de ce chapitre, nous avons tenté de clarifier le concept de performances relatif à l'optique sans fil. Il convient en effet de bien comprendre toutes les subtilités liées à l'évaluation de la capacité des liens OSF. Les performances des liens optiques sans fil sont en effet déterminées par trois critères dépendant les uns des autres et qu'il n'est pas possible de maximiser simultanément : la portée, la bande passante et la disponibilité. Nous proposons donc d'utiliser la marge du lien comme mesure adéquate des capacités OSF.

Grâce à ce chapitre nous serons maintenant capables d'évaluer correctement la grande diversité de produits OSF et d'identifier leurs principales caractéristiques. Nous pourrons ainsi faire la différence entre des produits de bas de gamme, sensibles aux caprices de l'environnement et des produits de plus haute gamme, équipés pour être performants dans toutes les conditions.

Chapitre II: Technologies concurrentes

Titre 1: Introduction

Cette partie a pour objectif de comparer les technologies OSF avec les technologies concurrentes, dans un premier temps, au niveau des performances et, dans un deuxième temps, au niveau des coûts. Seront étudiées en profondeur les technologies qui se rapprochent le plus de l'optique sans fil et plus sommairement les concurrents plus éloignés. Le but est de mettre en relation, pour l'OSF et ses concurrents, les performances en terme de distance et de bande passante avec l'ensemble des coûts associés à ces performances. Nous pourrons alors déterminer pour quels profils "distance - bande passante" l'optique sans fil est économiquement compétitive par rapport à ses concurrents et où elle ne l'est pas.

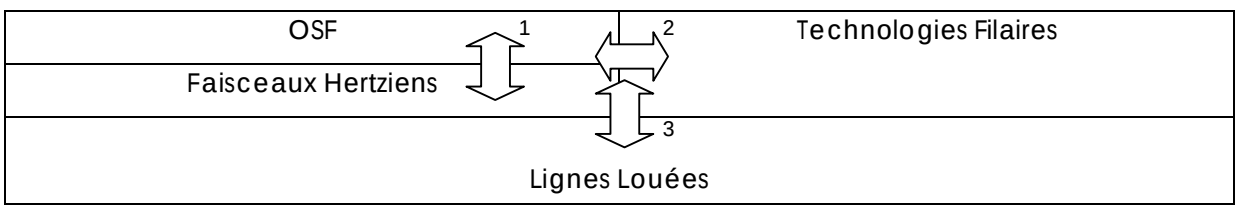
En plus des critères économiques, Il faudra également veiller à déceler les critères non économiquement discriminants mais qui excluent ou imposent une technologie plutôt qu'une autre. Nous pourrons alors, dans l'étape suivante, déterminer dans quelles applications les variables étudiées dans cette étape sont telles que le choix d'une connexion OSF est optimale.

Si une entreprise ou un opérateur prennent la décision d'implémenter un lien optique sans fil pour relier un point A à un point B, ils auront préalablement réalisé plusieurs choix:

- Celui de posséder la connexion entre A et B et non de la louer.
- Celui d'implémenter une connexion sans fil au lieu d'une connexion filaire.
- Celui d'implémenter une connexion sans fil optique au lieu d'une connexion sans fil hertzienne.

Nous analyserons ces choix de bas en haut en commençant par comparer l'OSF à la Radio. Nous confronterons ensuite les technologies sans fil étudiées aux technologies filaires. Finalement, nous pèserons le pour et le contre de l'implémentation d'une connexion par rapport à la location d'une ligne.

Figure n°11: Illustration de la méthodologie:



L'OSF a pour concurrent direct les faisceaux hertziens, pour concurrent secondaire, les technologies filaires et pour concurrent plus éloigné, les lignes louées.

Titre 2: Les technologies sans fil

Les technologies hertziennes, technologies sans fil concurrentes à l'OSF sont également basées sur la propagation dans l'air libre d'ondes électromagnétiques. C'est donc le même phénomène physique qui se produit lorsque nous envoyons un signal optique ou un signal hertzien: un champ électrique induit un champ magnétique qui induit à son tour un champ électrique et ainsi de suite, cette alternance se répandant dans l'espace à une vitesse dépendant du médium parcouru. La seule différence entre les ondes optiques et les ondes hertziennes réside dans la fréquence de cette alternance. Conventionnellement, on parlera d'un signal lumineux lorsque sa fréquence est supérieure à 300 GHz (ou sa longueur d'onde inférieure à 1 millimètre) et d'une onde hertzienne lorsque sa fréquence est inférieure à 300 GHz (ou sa longueur d'onde supérieure à 1 millimètre)[26].

Cette différence de fréquence entre les signaux optiques et les ondes hertziennes explique des différences dans leurs propriétés physiques. Bien entendu, ces propriétés ne changent pas brusquement de part et d'autre de la limite symbolique de 300 GHz, mais évoluent de façon continue d'un côté à l'autre du spectre. Il y a donc une grande différence entre les ondes hertziennes de basses fréquences et de hautes fréquences. C'est pourquoi nous n'étudierons pas l'entièreté des fréquences radio mais sélectionnerons des catégories d'ondes dont les fréquences les pourvoient de propriétés qui les rendent concurrentes à l'optique sans fil.

Afin de mieux sélectionner ces catégories d'ondes hertziennes, il est important de comprendre comment les propriétés de ces ondes varient en fonction de la fréquence:

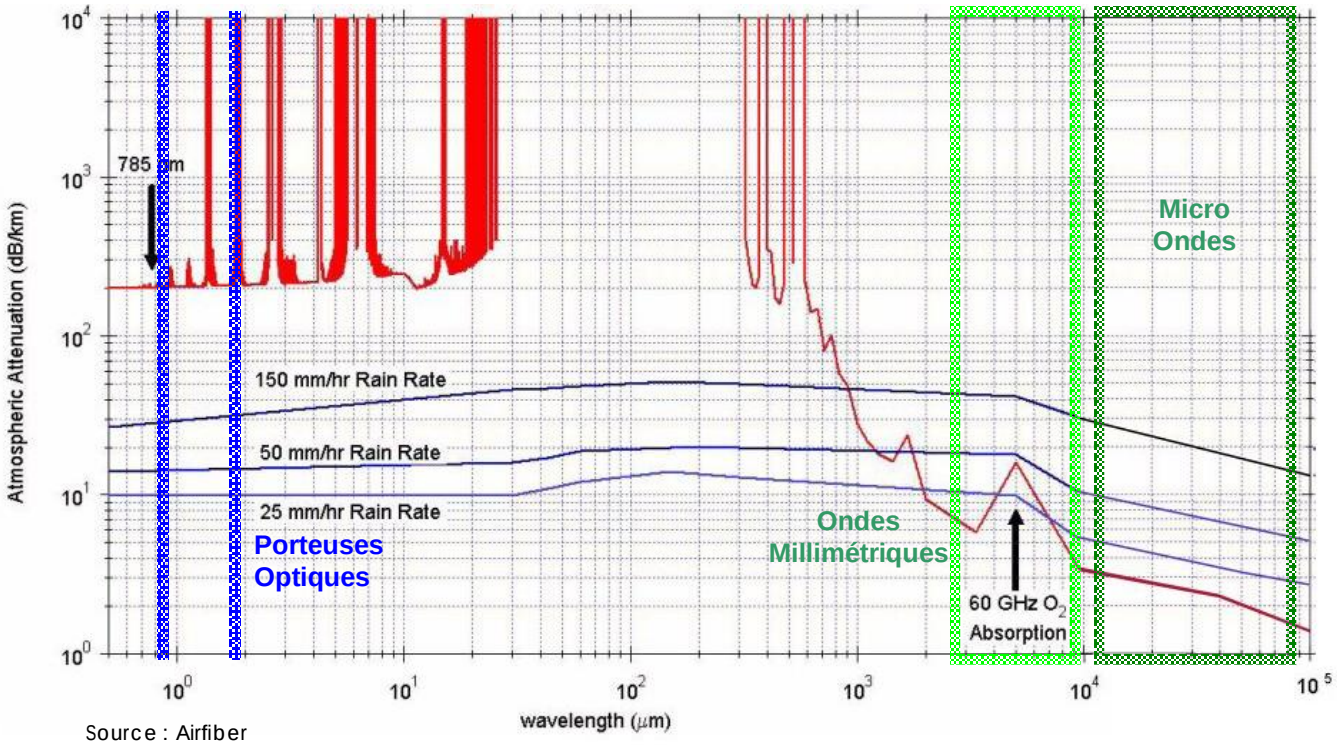
- Au niveau des fréquences hertziennes, l'atténuation d'un signal est d'autant plus importante que sa fréquence est élevée. A puissance égale, une fréquence élevée portera donc moins loin mais pourra être plus réutilisée géographiquement sans risque d'interférences. Ceci n'est pas le cas pour les fréquences optiques où l'atténuation augmente faiblement avec la longueur d'onde. Ces effets sont visibles sur la figure n°12.

- Les ondes électromagnétiques sont gênées dans leur propagation par des obstacles du même ordre de grandeur que leur longueur d'onde. Ceci explique que les signaux optiques soient surtout atténués par le brouillard aux gouttelettes fines, alors que les ondes hertziennes sont surtout atténuées par la pluie aux gouttes plus grosses. Ces effets sont également représentés sur la figure n°12.

[26] FCC (octobre 2003), "*United States Frequency Allocations – The radio spectrum*"

- Au plus la fréquence est basse, au plus le signal aura tendance à se réfléchir de façon spéculaire et à se diffracter. Les basses fréquences n'auront donc pas besoin de ligne de vue entre l'émetteur et le récepteur. Par contre, le signal sera beaucoup plus diffus au récepteur, ce qui permet des bandes passantes moins élevées que pour les hautes fréquences.

Figure n°12: Atténuation par le brouillard et la pluie depuis les fréquences optiques jusqu'aux micro ondes en fonction de la longueur d'onde



Source : Airfiber

En raison des propriétés décrites ci-dessus, nous étudierons les fréquences hertziennes les plus élevées, entre 1GHz et 300GHz. Ces fréquences ont des caractéristiques qui se rapprochent le plus des signaux optiques. Elles permettent en effet de transporter des bandes passantes élevées dans des situations de ligne de vue.

Notons cependant que le diamètre d'un faisceau hertzien est beaucoup plus large que celui d'un faisceau optique, ce qui rend plus facile l'interception éventuelle de données confidentielles. Cette interception est d'autant plus facile que les technologies hertziennes sont beaucoup moins rigoureuses en matière d'alignement. La confidentialité des données ne sera dès lors assurée que par un cryptage de celles-ci.

Afin d'orienter les ondes hertziennes sous forme de faisceaux, des antennes sont utilisées. Les antennes peuvent être comparées aux systèmes optiques des dispositifs OSF. Une large antenne correspond à une grande ouverture des systèmes optiques

émetteurs ou récepteurs. Nous avons vu qu'une augmentation de l'ouverture entraîne une augmentation des performances des dispositifs OSF. Ce principe vaut également pour la taille des antennes.

Pour l'évaluation des performances des technologies, la méthodologie utilisée n'est pas celle d'un scientifique qui tente de démontrer les limites physiques d'une technologie mais plutôt celle d'un économiste qui étudie les performances des produits disponibles sur le marché. Pour chaque technologie, les performances d'une dizaine de produits ont été répertoriées afin de fournir des ordres de grandeur pour les performances. La liste de ces produits est disponible en annexe n°1.

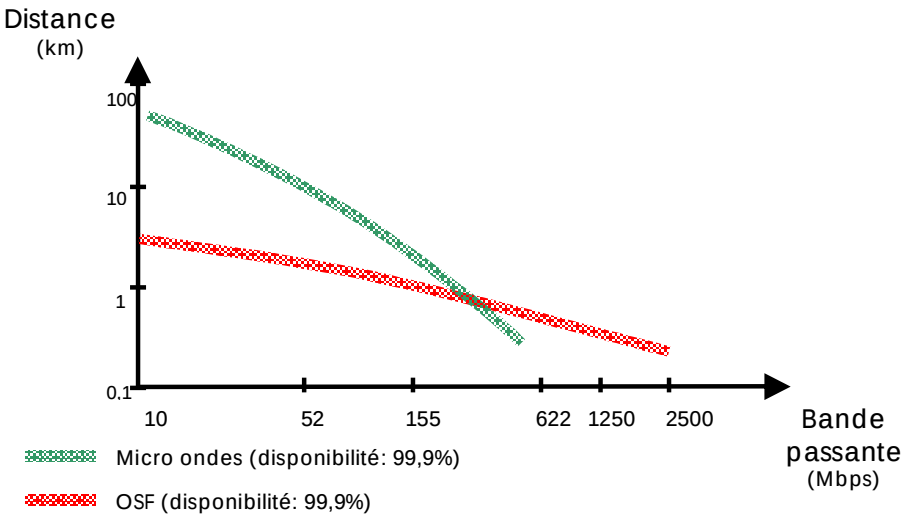
Nous segmenterons le spectre étudié en deux parties en raison de propriétés légèrement différentes:

- Les micro ondes: de 1 GHz à 30 GHz
- Les ondes millimétriques: de 30 GHz à 300 GHz

2.1 Micro Ondes (1GHz à 30GHz)

La figure n°13 fournit des ordres de grandeur pour les performances des systèmes hertziens à micro ondes. Pour les bandes passantes faibles, la technologie permet des distances de plusieurs dizaines de kilomètres, ce qui est beaucoup plus qu'avec l'optique sans fil. Par contre, il est impossible de trouver des dispositifs à micro ondes pour des bandes passantes supérieures à 500 Mbps. Du point de vue des performances, cette technologie fait donc concurrence aux produits optiques sans fil de faible bande passante et de gamme plus haute, permettant des distances plus élevées.

Figure n°13: Performances des dispositifs à micro ondes



Source : estimations personnelles, professionnels, dépliants de constructeurs

Les besoins en terme de ligne de vue des technologies à micro ondes sont déterminés par la loi de Fresnel selon laquelle un faisceau d'un certain diamètre, dépendant de la distance du lien et de sa fréquence, doit être dégagé à au moins 60% pour permettre un fonctionnement optimal de ce lien[27]. Par exemple, pour un lien à 5GHz parcourant une distance d'un kilomètre, ce diamètre s'élève à environ 8 mètres. Un tableau décrivant le rayon de Fresnel en fonction de la distance et de la fréquence du lien est disponible en annexe n°2.

Pour les faisceaux à micro ondes, des technologies de modulation à large spectre doivent être utilisées pour transmettre des bandes passantes élevées sur une largeur de spectre limitée. Bien que présentant une efficacité spectrale[28] élevée, ces méthodes de modulation nécessitent un traitement important du signal qui se traduit par des latences relativement élevées, de l'ordre de 5 millisecondes.

2.2 Ondes millimétriques (30GHz à 300GHz)

La figure n°14 fournit des ordres de grandeur pour les performances de systèmes hertziens à ondes millimétriques. Il faut distinguer ici les dispositifs fonctionnant à des fréquences autour de 60GHz de ceux fonctionnant à des fréquences inférieures ou supérieures. Cette bande autour de 60GHz est en effet caractérisée par une absorption importe par l'oxygène atmosphérique et les portées y sont donc plus faibles[29], de l'ordre de deux kilomètres pour les faibles bandes passantes et en dessous d'un kilomètre pour les bandes passantes élevées. Les autres fréquences, par contre, permettent d'atteindre des distances de plus de 5 kilomètres. En ce qui concerne les bandes passantes, les ondes millimétriques ne parviennent pas à dépasser 1,25 Gbps. Nous voyons que cette technologie est presque parfaitement comparable à l'optique sans fil en terme de distance et de bande passante.

Notons cependant que peu de produits sont actuellement disponibles au dessus de 60GHz. Seuls quelques constructeurs, comme Loea ou ELV-1, offrent des appareils fonctionnant à 70, 80 ou 90GHz. La raison essentielle en est que ces bandes de fréquence, auparavant militaires aux Etats-Unis, ont seulement été mises à la disposition du public par la FCC, la commission américaine qui gère les ondes hertziennes, en octobre 2003[30].

---

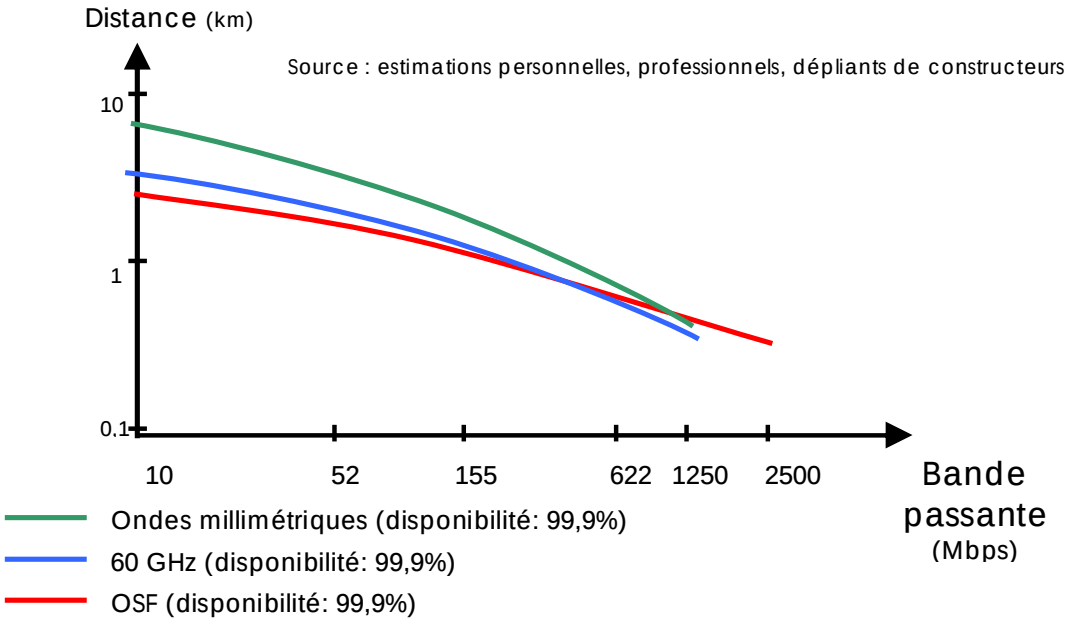
[27] Young M. F. (février 2004), "*Planning a Microwave Radio Link*", YDI

[28] L'efficacité spectrale d'une technique de modulation se mesure en nombre de mégabits transmis par seconde et par mégahertz de spectre utilisé

[29] Federal Communications Commission (décembre 1996), "*Report and recommendations of the millimeter communications working group to the FCC*"

[30] Burton J. (octobre 2003), "*FCC opens 70, 80, and 90 GHz spectrum bands for deployment of broadband millimeter wave technology*", Federal Communications Commission

Figure n°14: Performances des dispositifs à ondes millimétriques



Les besoins en terme de ligne de vue sont également déterminés par la loi de Fresnel, mais le faisceau entre l'émetteur et le récepteur devant être dégagé est beaucoup moins large. Dans le cas d'un lien de un kilomètre, le diamètre du faisceau est d'environ trois mètres pour une fréquence de 40GHz et d'environ deux mètres pour une fréquence de 60GHz. Les caractéristiques des faisceaux millimétriques se rapprochent donc plus de celles des faisceaux optiques que de celles des faisceaux à micro ondes.

La plupart des systèmes à ondes millimétriques utilisent une méthode de modulation par allumage et extinction dite OOK (On & Off Keying). Cette méthode très simple est la même que celle utilisée par les dispositifs OSF et induit peu de latence dans le lien.

2.3 Systèmes Hybrides

Nous avons vu précédemment que les signaux optiques sont fortement atténués par le brouillard alors que les ondes hertziennes le sont par la pluie. D'autre part, les signaux optiques se propagent relativement bien dans la pluie et les ondes hertziennes dans le brouillard. Ces propriétés sont illustrées dans la figure n°12. Bien que présentant toutes deux des points faibles, ces technologies peuvent être combinées pour en former une qui n'en a pas. En effet, dans toutes les circonstances, au moins un des deux systèmes fonctionnerait correctement: Il est impossible qu'il pleuve et qu'il y ait du brouillard simultanément, car la pluie ferait retomber le brouillard.

Conceptuellement, le principe semble simple, mais il est relativement complexe à mettre en œuvre. Pour cela, deux approches sont possibles:

a. Un lien optique principal est secondé par un lien hertzien à micro-ondes ou à ondes millimétriques qui rentre en fonction lorsqu'un brouillard épais provoque une rupture du lien optique[31]. Dans cette approche, les deux appareils sont connectés à un routeur qui effectue la transition d'un dispositif à l'autre. Entre le moment où le dysfonctionnement du lien optique est détecté et où le lien hertzien commence à envoyer ses premières données, un temps non négligeable se sera écoulé et des données perdues devront être réenvoyées. Ce phénomène est d'autant plus dérangeant lorsque les conditions météorologiques avoisinent les conditions limites d'opérabilité du lien optique, provoquant des transitions incessantes d'un lien à l'autre.

b. La deuxième approche est celle développée par Airfiber et consiste à utiliser les liens optiques et hertziens d'une façon plus symétrique[32]. A tout moment, les deux dispositifs fonctionnent et envoient leurs données simultanément. Du côté des récepteurs, un Contrôleur de Lien Redondant (ou RLC: Redundant Link Controller), développé par AirFiber, analyse les deux flux de données reçus, détecte les erreurs et sélectionne les données dépourvues d'erreurs. Dans cette approche, la transition d'un dispositif à l'autre s'effectue sans aucune interruption et sans perdre aucun bit de données. Notons que cette solution nécessite que les deux systèmes fonctionnent à la même bande passante, ce qui impose l'utilisation de faisceaux hertziens à ondes millimétriques pour les bandes passantes élevées.

Les systèmes hybrides fournissent des disponibilités beaucoup plus élevées que celles des dispositifs OSF ou hertziens séparément. Selon les equipementiers, des disponibilités de plus de 99,999% sont facilement atteintes à des distances de plus d'un kilomètre. Cependant, cette solution est beaucoup plus chère, car elle nécessite l'achat de deux systèmes auxquels s'ajoutent le routeur ou le Contrôleur de Lien Redondant. C'est sans doute pour cette raison que le produit développé par AirFiber ne rencontra aucun succès. La société cessa ses activités en février 2003 et fut rachetée par son concurrent Lightpointe.

[31] ELVA-1 (2004), "The hybrid FSO concept" http://www.elva-1.spb.ru/products/telecom/FSO_mmW_backup.html
[32] Bloom, S. (mai 2002), "The last mile solution: hybrid FSO Radio", AirFiber

2.4 Comparaison des coûts

2.4.1 Méthodologie

L'objectif de cette partie est de déterminer dans quelles circonstances il revient moins cher d'utiliser des systèmes optiques plutôt que des systèmes hertziens. Les coûts des technologies sans fil optiques et hertziennes varient avec la bande passante souhaitée et la distance souhaitée du lien. Il faudra donc comparer ces coûts pour chaque profil "distance-bande passante".

Nous avons commencé par sélectionner des bandes passantes à étudier. Il s'agit de bandes passantes standards fréquemment utilisées pour les produits optiques sans fil: 10, 50, 155, 622, 1250 et 2500 Mbps. Nous avons ensuite recherché quelques dispositifs optiques et hertziens fonctionnant aux bandes passantes sélectionnées dont nous avons étudié les caractéristiques en matière de distances et de coûts[33]. Il a également fallu déterminer, pour chaque bande passante et chaque technologie, des gammes de produits plus ou moins chers permettant d'atteindre des distances plus ou moins élevées ainsi que les critères demandant le passage à un dispositif d'une gamme supérieure. Cette première étape permet de déterminer le prix du matériel optique ou hertzien permettant de transporter une certaine bande passante sur une certaine distance.

Remarquons qu'il ne faut pas uniquement tenir compte du coût du matériel, mais également de l'ensemble des frais survenant l'année de l'achat et les années consécutives. C'est pourquoi nous avons également calculé les montants suivants:

Coûts d'investissement:

- Prix du matériel
- Installation du matériel et études d'implémentation
- Formation du personnel

Coûts récurrents:

- Licences
- Hébergement
- Entretien et garantie
- Consommation électrique

[33] En ce qui concerne les systèmes hertziens, nous avons uniquement sélectionné des dispositifs de type "point à point métropolitain full duplex", comme ils se rapprochent le plus des systèmes optiques.

Comme ces frais se répartissent sur plusieurs années, nous avons calculé la valeur actuelle nette des coûts d'utilisation sur 15 ans[34]. Nous avons ensuite calculé la redevance annuelle équivalente, c'est-à-dire, la somme payée annuellement qui engendrerait une valeur actuelle nette équivalente.
Toutes les valeurs citées plus loin relatives aux performances et aux coûts des technologies OSF et hertziennes sont des estimations approximatives et peuvent parfois varier du simple au double en fonction de nombreux facteurs. Afin de simplifier la tâche, nous avons été obligés de limiter les facteurs de coûts et de restituer des valeurs moyennes.

Dans le cadre d'une comparaison entre les coûts des technologies optiques et hertziennes, les valeurs absolues des frais ont moins d'importance que le différentiel de frais entre l'optique et l'hertzien. Nous nous sommes donc essentiellement concentrés sur cet aspect. Les valeurs absolues ont cependant un intérêt lors de la comparaison avec les technologies filaires ou les lignes louées. C'est pourquoi, lorsque les grandeurs sont incertaines ou dépendent de facteurs inconnus, nous adopterons comme principe d'utiliser des valeurs dans le haut de la fourchette afin de s'assurer de la compétitivité des technologies sans fil par rapport aux technologies filaires et aux lignes louées dans le pire des cas.

2.4.2 Performances et gammes

Afin de déterminer les prix des technologies en fonction de la distance du lien qu'elles permettent de réaliser, il faut d'abord répartir les produits en gammes et attribuer à chaque gamme une portée maximale. Lorsque la distance maximale sera atteinte au sein d'une gamme, on passe alors à la gamme supérieure, ce qui fera augmenter le prix.

A partir des spécifications des produits des constructeurs OSF, listées en Annexe n°1 et des papiers blancs au sujet de la disponibilité de leurs produits, nous avons déterminé des ordres de grandeur pour la portée des dispositifs haut de gamme en fonction de leur bande passante et de la disponibilité souhaitée dans un climat continental[35]. Ces chiffres sont disponibles dans le tableau n°5.

[34] Selon des professionnels interrogés, cette période de 15 ans correspond à la durée d'amortissement approximative d'une installation en fibre optique. Le choix de cette période d'actualisation assurera donc la comparabilité des valeurs actuelles nettes des installations sans fil et filaires.
[35] Un climat continental présente des caractéristiques d'humidité moyennes, par opposition au climat océanique ou maritime humide et au climat désertique sec. La disponibilité d'un dispositif OSF y sera donc moyenne.

Afin de simplifier le modèle et en nous basant sur les mêmes spécifications, nous posons des hypothèses sur la fraction de la portée des produits haut de gamme que sont capables d'atteindre les produits des gammes inférieures. Cette fraction supposée est de 70% pour les produits moyenne gamme et 40% pour les produits bas de gamme.

Tableau n°5: Portée du matériel optique haute gamme en fonction de la bande passante et de la disponibilité souhaitée, dans un climat continental

Bande Passante (Mbps)	99%	99,9%	99,99%	99,999%
10	5600 m	4100 m	2300 m	1100 m
50	5000 m	3700 m	2000 m	900 m
155	4200 m	3000 m	1700 m	700 m
622	2900 m	2000 m	1100 m	450 m
1250	2100 m	1400 m	700 m	300 m
2500	1200 m	700 m	300 m	100 m

Source : Interprétation personnelle de divers wihte papers, professinnels, dépliants des constructeurs

Tableau n°6: Portée du matériel optique basse et moyenne gamme par rapport à la portée du matériel optique haute gamme

GAMME	FRACTION PORTEE HAUTE GAMME
Basse	40 %
Moyenne	70 %
Haute	100 %

Source : Interprétation personnelle de divers wihte papers, professionnels et de dépliants des constructeurs

Nous effectuons le même travail pour les technologies hertziennes. A cette fin, nous commençons par choisir pour chaque bande passante les fréquences à utiliser. Comme les fréquences millimétriques sont plus efficaces pour atteindre les bandes passantes supérieures, nous les utiliserons pour les bandes passantes de 622 et de 1250 Mbps. Nous choisissons d'utiliser des produits à ondes millimétriques de 60 GHz, car ils sont les plus répandus. Pour les autres bandes passantes, nous choisissons des dispositifs à micro-ondes à 5,4 GHz en raison de l'absence de licence à payer pour cette fréquence. Rappelons que les technologies OSF n'ont pas de concurrents en 2500 Mbps.

Pour les dispositifs hertziens à micro-ondes, on ne peut pas vraiment parler de gammes de produits, car c'est essentiellement la taille de l'antenne qui détermine la portée du système. En nous basant sur les spécifications des produits hertziens des constructeurs, listées en annexe 1, nous supposons que l'utilisateur a le choix entre trois modèles d'antennes: la petite de 20 pouces de diamètre, la moyenne de 40

pouces de diamètre et la grande de 60 pouces de diamètre. Nous supposons également que les portées assurées par la petite et la moyenne antenne sont respectivement égales à 25% et 50% de celle de la grande antenne. Lorsque la distance du lien augmente, il faudra se procurer une antenne de dimension supérieure, ce qui fera augmenter le prix du système. Les tableaux 7 et 8 synthétisent l'ensemble des ordres de grandeurs et simplifications déduits des spécifications listées en Annexe n°1.

Tableau n°7: Fréquences et portées du matériel hertzien en fonction de la bande passante et de l'antenne utilisée pour une disponibilité de 99,9% dans un climat continental.

Bande Passante (Mbps)	Fréquence	Portée Petite Antenne	Portée Moyenne Antenne	Portée Grande Antenne
10	5,4 GHz	10.000 m	20.000 m	40.000 m
50	5,4 GHz	3.750 m	7.500 m	15.000 m
155	5,4 GHz	1.750 m	3.500 m	7.000 m
622	60 GHz	400 m	800 m	1.600 m
1250	60 GHz	350 m	700 m	1.400 m
2500	/	/	/	/

Source : interprétation personnelle de white papers, professionnels, dépliants des constructeurs Proxim et SAF

Tableau n°8: Diamètres et fractions de portée des antennes hertziennes micro-ondes par rapport à une antenne de 60 pouces.

ANTENNE	DIAMETRE	FRACTION PORTEE GRANDE ANTENNE
Petite	20 pouces	25 %
Moyenne	40 pouces	50 %
Grande	60 pouces	100 %

Source : interprétation personnelle de white papers, professionnels, dépliants des constructeurs Proxim et SAF

2.4.3 Prix du matériel

Des ordres de grandeur de prix des dispositifs OSF et hertziens ont été définis à partir de prix collectés auprès de deux distributeurs belges de systèmes sans fil et sur des sites vendant des systèmes sans fil en ligne. Remarquons que, pour les dispositifs OSF, il n'existe pas de système haut de gamme à 10 Mbps ni de système bas de gamme à 2500 Mbps. Dans ces deux cas, les prix de la gamme adjacente ont été utilisés comme prix de la gamme manquante.

Tableau n°9: Prix du matériel OSF selon la bande passante et la gamme (2 terminaux)[36].

Bande passante (Mbps)	Prix Bas de Gamme	Prix Moyenne Gamme	Prix Haut de Gamme
10	5.000 €	15.000 €	15.000 €
50	7.500 €	20.000 €	27.000 €
155	10.000 €	25.000 €	32.000 €
622	22.000 €	33.000 €	41.000 €
1250	35.000 €	52.000 €	60.000 €
2500	60.000 €	60.000 €	82.000 €

Source : revendeurs de matériel OSF, professionnels, sites internet de vente en ligne, Annexe 1

Tableau n°10: Prix du matériel hertzien à micro-ondes, antenne non incluse, en fonction de la bande passante (2 terminaux)

BANDE PASSANTE	PRIX
10 Mbps	7.000 €
50 Mbps	11.000 €
155 Mbps	18.000 €

Source : Estimation personnelles, revendeurs de matériel Hertzien, sites internet de vente en ligne, Annexe 1

Tableau n°11: Prix de paires d'antennes hertziennes à micro-ondes.

ANTENNE	PRIX
Petite (20 pouces)	800 €
Moyenne (40 pouces)	1600 €
Grande (60 pouces)	3200 €

Source : Estimations personnelles, sites internet de vente en ligne, Annexe 1

Tableau n°12: Prix du matériel hertzien à ondes millimétriques, antenne incluse, en fonction de la bande passante et de la gamme.

Bande passante (Mbps)	Prix Bas de Gamme	Prix Moyenne Gamme	Prix Haut de Gamme
622	37.000 €	40.000 €	45.000 €
1250	47.000 €	50.000 €	55.000 €

Source : Estimations personnelles, sites internet de vente en ligne, Annexe 1

[36] Lorsque des prix étaient disponibles en dollars, ils ont été convertis en euros en utilisant un taux de change de 1,2 dollars par euro. Ce même taux de change sera systématiquement utilisé par la suite. Lorsque des produits sont achetés à l'étranger, les frais de transport et douane ont été négligés.

Plusieurs observations peuvent être faites à partir de ces données:

- Le prix des dispositifs OSF varie entre 5.000 et 80.000 € alors que celui des dispositifs hertziens varie entre 8.000 et 55.000 euros.
- Pour les dispositifs OSF, à bande passante égale, le rapport de prix entre les systèmes de la gamme la plus haute et ceux de la gamme la plus basse est de l'ordre de deux ou trois. Par contre, pour les dispositifs hertziens, ce rapport est toujours inférieur à 1,5. On peut donc en conclure que les technologies OSF présentent un coût marginal de la distance beaucoup plus élevé que les technologies hertziennes[37]. Cela s'explique par le fait qu'en OSF des mécanismes coûteux de précision et de redondance doivent être utilisés pour augmenter la portée alors que pour les systèmes hertziens, une plus grosse antenne suffit.
- Pour une même bande passante, le prix d'un dispositif hertzien à micro-ondes, toutes gammes confondues, se trouve quelque part entre celui de la basse gamme et de la moyenne gamme OSF.

2.4.4 Installation du matériel

L'installation du matériel passe par trois étapes:

- L'étude d'implémentation
- Le câblage
- Le montage des dispositifs

a) L'étude d'implémentation

Elle consiste à prévoir la propagation des signaux et les éventuelles interférences afin d'optimiser l'orientation et le positionnement des dispositifs pour un fonctionnement plus efficace.

Pour les systèmes OSF, la propagation de signaux est relativement simple car elle s'effectue dans un faisceau très fin. Il suffit dès lors d'éviter la présence d'objets dans cet espace restreint. Pour l'OSF, les interférences entre deux liens sont impossibles, pour la même raison de propagation dans un faisceau très fin. La seule possibilité d'interférence provient du soleil, mais nous avons vu qu'elle est facilement prévisible et qu'elle peut être évitée par un positionnement adéquat des terminaux. Vladimir Sidorovich a développé un monographe permettant de prévoir les interférences solaires à partir de la latitude et des angles d'azimut et d'élévation des dispositifs. Ce

[37] Du moins, en ce qui concerne le prix du matériel

document et son mode d'emploi sont disponibles en Annexe n°3. Cette étude étant relativement simple, elle peut être faite par le technicien qui monte l'appareil. Pour simplifier, nous considérerons que cette étude ne coûte rien.

La propagation des signaux hertziens est beaucoup plus complexe car ils ne se propagent pas uniquement sur une ligne droite entre l'émetteur et le récepteur mais peuvent également s'écarter de cette trajectoire. Ce comportement est défini par la loi de Fresnel précédemment décrite. Le diamètre du faisceau est plus large à mi-chemin entre l'émetteur et le récepteur et dépend de la fréquence du signal et de la distance du lien.

Bien qu'ils soient beaucoup plus larges que les faisceaux optiques, les faisceaux hertziens tolèrent jusqu'à un certain point la présence d'objets en leur sein. D'autre part, le signal interagit de façon différente selon la nature des objets rencontrés. La présence d'une large étendue d'eau, par exemple, est néfaste au bon fonctionnement du lien. C'est pourquoi une étude doit être faite afin de modéliser la propagation du signal. Elle peut aller jusqu'à la création d'un modèle tridimensionnel du milieu de propagation. Cependant, ces précautions extrêmes ne sont obligatoires que pour des liens bien plus longs que la portée de l'OSF.

Comme les besoins d'études sont proportionnels au diamètre de Fresnel, nous supposerons une heure d'étude par mètre de diamètre du faisceau de Fresnel. Puisque cette étude est effectuée par des consultants qualifiés et qu'ils doivent se déplacer sur place, nous supposons un tarif horaire de 100 euros. Le tableau n°13 illustre les coûts de l'étude d'implémentation calculés en fonction des précédentes hypothèses.

Tableau n°13: Coûts de l'étude d'implémentation supposés en fonction de la fréquence et de la distance du lien hertzien:

DISTANCE	5 GHz	60 GHz
1 km	780 €	230 €
2 km	1.100 €	320 €
3 km	1.350 €	390 €
4 km	1.560 €	450 €
5 km	17.400 €	500 €

Source : Calculs et hypthèses personnelles, professionnels

Retenons que les coûts d'étude d'implémentation d'un lien OSF sont supposés nuls alors que ceux d'un lien hertzien sont estimés entre 230 et 17.400 € selon la fréquence et la distance du lien.

b) Le câblage

Il faut amener aux dispositifs le courant électrique et le câble transportant les données. Ces besoins existent aussi bien pour les technologies OSF que pour les technologies hertziennes. On peut cependant observer deux différences:

- A l'exception de quelques produits à tête passive, l'intégralité des fonctions des produits optiques est rassemblée dans un seul appareil qui doit être installé à l'endroit où les faisceaux optiques sont envoyés et réceptionnés. Des câbles doivent donc être tirés jusqu'à cet endroit. Les produits hertziens, par contre, sont souvent dissociés en une unité intérieure (Indoor Unit ou IDU), une unité extérieure (Outdoor Unit ou ODU) et une antenne. Parfois, il n'y a pas d'unité extérieure et l'antenne est directement reliée à l'unité intérieure. Seule l'unité intérieure nécessite l'alimentation électrique. Cependant un câble de données doit toujours exister entre l'unité intérieure et l'unité extérieure et entre l'unité extérieure et l'antenne. Ces câbles ne peuvent évidemment être trop longs, sous peine de réduire la puissance du signal à la sortie de l'antenne. Les avantages et inconvénients entre ces deux architectures sont les mêmes que ceux discutés précédemment entre les systèmes optiques à tête active et à tête passive.

- Contrairement aux produits hertziens dont l'antenne doit être disposée à l'extérieur[38], les produits optiques peuvent être placés derrière une vitre, ce qui multiplie les endroits propices à l'installation et réduit donc fortement les distances probables entre le dispositif optique et la source électrique ou le point de présence du réseau le plus proche. Nous avons vu que les vitres induisent une atténuation non négligeable du signal. La configuration derrière une vitre est donc déconseillée pour des liens de grande distance.

c) Le montage des dispositifs

Les dispositifs doivent évidemment être fixés sur un support. Cette fixation peut se faire, soit à un poteau attaché au sol, soit directement sur un mur. De ce point de vue, il n'y a pas beaucoup de différences entre le sans fil optique et hertzien. Remarquons cependant que les terminaux optiques sont souvent beaucoup plus lourds que les terminaux hertziens, ce qui rend leur installation plus difficile. Notons également que l'OSF nécessite un alignement plus précis et l'utilisation d'outils spécialisés pour les produits de haute gamme. Ceci devrait se traduire par des coûts d'installation sensiblement plus élevés.

[38] Selon un professionnel consulté, il serait également possible de placer un dispositif hertzien derrière une vitre, mais cette pratique semble moins répandue, sans doute en raison de la réduction des performances qui en résulte.

Un "white paper"[39] de AOptics estime les coûts de câblage et de montage d'un lien OSF (soit deux terminaux) à environ 20.000 euros. Nous utiliserons ce chiffre pour les systèmes OSF. Rappelons que les systèmes hertziens permettent d'économisér des coûts de câblage par leur séparation IDU-ODU-Antenne et nécessitent un montage plus facile et moins précis. C'est pourquoi nous supposerons des coûts un peu plus faibles pour ces systèmes (15.000€). Ces hypothèses sont affichées dans le Tableau n°14.

Tableau n°14: Coûts de câblage et de montage de liens OSF et hertziens

TYPE DISPOSITIF	COUTS DE MONTAGE ET DE CÂBLAGE
Optique Sans Fil	20.000 Euros
Hertzien	15.000 Euros

Sources : Aoptix, estimations peronnelles, professionnels

2.4.5 Formation des techniciens

Afin de pouvoir utiliser et entretenir les dispositifs achetés, les clients de produits OSF et hertziens doivent former leurs techniciens. Cette formation concerne le fonctionnement du dispositif, l'utilisation du software de gestion, l'entretien des appareils et les procédures à suivre en cas de dysfonctionnements.

Comme les dispositifs optiques haut de gamme nécessitent un entretien plus poussé et ont des composantes plus fragiles, nous supposons que leur utilisation nécessite une formation plus longue de quelques heures pour les systèmes de haute gamme. Nous présumons également que l'instruction d'un technicien coûte 100 euros par heure[40]. Les tableaux n°15 et n°16 reprennent le nombre d'heures de formation des techniciens pour les dispositifs OSF et hertziens.

Tableau n°15: Heures de formation des techniciens pour chaque gamme d'OSF

Source : estimations personnelles, professionnels

GAMME	HEURES DE FORMATION
Basse	3 heures
Moyenne	5 heures
Haute	7 heures

Tableau n°16: Heures de formation des techniciens pour les dispositifs hertziens

Source : estimations personnelles, professionnels

	HEURES DE FORMATION
Micro ondes	3 heures
Ondes millimétriques	5 heures

[39] Allen M., Pelosi L., Bhakta D. (octobre 2002), "Summary of business opportunity", Aoptix
[40] Ceci comprend le coût des cours et la rémunération du technicien pendant la formation

La formation du personnel coûte donc, selon nos hypothèses, entre 300 et 700 euros pour les systèmes optiques et entre 300 et 500 euros pour les systèmes hertziens.

2.4.6 Licences

Lorsque des individus ou des entreprises communiquent en émettant des ondes électromagnétiques d'une certaine fréquence dans l'atmosphère, ils pourraient causer des interférences auprès d'autres individus désirant communiquer sur la même fréquence. Pour éviter ces interférences, une fréquence ne peut être utilisée qu'une seule fois dans une zone déterminée dont la forme et les dimensions dépendent de la portée et de la directionnalité du signal. Afin d'éviter les conflits, l'Etat gère les droits d'utilisation des fréquences appelés licences. Les montants payés pour obtenir des licences varient d'un pays à l'autre. On peut cependant observer les généralités suivantes:

- Les fréquences optiques ne sont jamais sous licence parce qu'elles se propagent dans un faisceau tellement étroit que les interférences sont impossibles.

- La plupart des fréquences hertziennes sont sous licence, mais le montant de la licence diminue pour les fréquences élevées, car la portée diminue quand la fréquence augmente, ce qui réduit les risques d'interférences. A titre d'illustration, le tableau n°17 reprend les tarifs belges. Ils consistent en un montant fixe annuel auquel s'ajoute un montant variable en fonction du nombre de MHz de largeur de bande hertzienne que l'on désire utiliser. La première année, Il faut encore ajouter à ces montants 617,6 € de frais d'ouverture de dossier. Notons également que des puissances maximales d'émission sont définies pour chaque fréquence.

- Il existe des bandes de fréquences sans licence autour de 2,4GHz et 5,4 GHz. Dans des endroits peu denses, l'utilisation de ces fréquences peut être une solution économique. Par contre, dans des lieux plus encombrés, les risques d'interférences futures sont beaucoup plus élevés. Aux Etats-Unis[41] et au Japon, une autre bande autour de 60 GHz ne requiert pas de licence en raison de la forte atténuation par l'oxygène atmosphérique à cette fréquence et des faibles risques d'interférences qui en résultent. Ceci ne vaut pas encore

[41] Federal Communications Commission (juillet 1997), "Millimeter Wave Propagation: Spectrum Management Implications"

pour l'Europe, mais le CEPT[42], organe européen de régulation des fréquences, souhaite une gratuité harmonisée de la bande 54-66 GHz dans les pays de l'union Européenne. Il faudrait donc s'attendre à ce que l'Europe s'aligne sur les Etats-Unis et le Japon.

Tableau n°17: Montant annuel des licences hertziennes en Belgique[43]

FREQUENCES	FIXE ANNUEL	VARIABLE ANNUEL PAR MHZ
Moins de 10 GHz	2578 €	49,6 €
10 à 20 GHz	1546 €	29,8 €
20 à 40 GHz	928 €	17,8 €
Plus de 40 GHz	556 €	10,6 €

Source: IBPT

Les coûts des licences ne sont pas les seuls frais dus à l'Etat dans le cadre de télécommunications. Celui-ci prélève également:

- Des commissions pour l'agrément de nouveaux dispositifs de télécommunications, qu'ils soient optiques ou hertziens. Comme ces frais sont payés par le constructeur ou l'importateur de l'appareil et non par l'acheteur, nous ne les intégrerons pas dans note analyse de coûts qui est orientée sur l'utilisateur.

- Des commissions pour l'exploitation de réseaux publics, qu'ils soient optiques ou hertziens. Un réseau est dit public lorsque son exploitant l'utilise pour revendre des services à des tiers. La commission annuelle payée dans ce cas peut monter jusqu'à 20.000 euros. Elle dépend de l'utilisation qui est faite du réseau et non des technologies utilisées. C'est pourquoi nous n'en tiendrons pas compte dans notre étude qui vise à comparer entre elles les technologies.

- Des taxes d'urbanisme prélevées par les communes dans le cas ou les liens optiques ou hertziens sont utilisés à but lucratif. Ces taxes peuvent atteindre jusqu'à 3000 euros par dispositif et par an. Comme elles ne sont pas d'application dans toutes les communes et qu'elles sont fortement variables, nous les négligerons. De plus, étant donné que ces frais s'appliquent généralement aussi bien aux dispositifs optiques que hertziens, ils ne peuvent influencer la compétitivité des deux technologies.

[42] Recommendation T/R 22-03, "Provisional recommended use of the frequency range 54,25-66 GHz by terrestrial fixed an mobile systems", CEPT, Athènes, 1990

[43] Tarifs en vigueur en 2004 pour les liaisons fixes bidirectionnelles à des fins professionnelles, de sécurité publique ou d'utilité publique (http://www.ibpt.be/Telecoms/ReseauxRadiocom/M55-2C.htm)

Dans notre évaluation des coûts, afin de donner des ordres de grandeur aux licences payées par les utilisateurs hertziens, nous utiliserons celles en vigueur en Belgique.

Rappelons que pour les bandes passantes de 10 à 155 Mbps, nous avons choisi une fréquence sans licence de 5,4 GHz, afin de s'assurer de la compétitivité de l'OSF dans les situations les plus favorables aux technologies hertziennes. Si cette bande sans licence devait être saturée, il serait nécessaire de migrer vers une bande avec licence. Les produits sélectionnés utilisent une bande large d'environ 50 MHz. Si on devait les utiliser dans les bandes réservées aux faisceaux hertziens entre 8,2 et 8,5 GHz, on devrait payer une licence annuelle de 5.058 €.

Pour les bandes passantes de 622 et 1250 Mbps, nous avons choisi des systèmes fonctionnant à 60 GHz. Comme ces bandes sont encore sous licence en Europe, nous tenons compte du paiement d'une licence. Les produits sélectionnés utilisent une bande large d'environ 300 MHz, ce qui engendre le déboursement d'un montant annuel de 3.736 €.

Comme les montants des licences sont relativement importants, il faudra analyser la sensibilité des résultats finaux à la migration vers des bandes avec licences pour les systèmes à micro-ondes et à la suppression de licences pour les systèmes à ondes millimétriques.

2.4.7 Hébergement

En vue de placer les dispositifs optiques ou hertziens aux endroits adéquats, les opérateurs de connexions sans fil doivent rémunérer les propriétaires des immeubles sur lesquels ils sont implantés. Cette prime d'hébergement ou "roof right" varie fortement d'un propriétaire à un autre. De plus, afin de bénéficier de l'asymétrie d'information, les opérateurs ont tendance à ne pas divulguer les prix payés à leurs bailleurs.

Les sommes payées peuvent atteindre jusqu'à 5.000 euros par emplacement et par mois pour des immeubles élevés et très bien localisés. Cependant, selon un professionnel interrogé, un loyer annuel autour de 1.000 euros par terminal[44] est plus habituel. Nous supposerons donc, aussi bien pour les liens optiques que hertziens, un coût annuel d'hébergement de 2000 €.

[44] Un même emplacement accueille souvent plusieurs terminaux d'un même opérateur, ce qui divise le prix par terminal

2.4.8 Entretien et Garantie

Une panne peut être très coûteuse et paralyser l'entièreté du réseau d'une entreprise ou d'un opérateur. C'est pourquoi les utilisateurs de technologies sans fil font le nécessaire pour prévenir les disfonctionnements du matériel acheté et pour assurer un bon dénouement au cas où ceux-ci devraient tout de même avoir lieu.

a) Entretien

Les dispositifs OSF demandent un entretien préventif au moins une fois par an. Celui-ci consiste à vérifier ou remplacer les lasers et les récepteurs, à nettoyer les systèmes optiques et à réaligner les dispositifs. Il peut être effectué soit par l'utilisateur du produit soit par une société spécialisée qui est souvent celle qui a vendu le produit. Nous présumerons ici qu'il est réalisé par le client, comme nous avons précédemment supposé que les techniciens de l'utilisateur étaient formés à l'entretien. Ceci permettra d'économiser les commissions payées à une société spécialisée.

Le tableau n°18, basé sur des entretiens avec des professionnels, reprend des ordres de grandeur pour le nombre d'heures d'entretien annuelles des produits OSF. Ce chiffre est plus grand pour les produits de plus haute gamme, comme ils contiennent plus de lasers et de récepteurs et demandent un alignement plus précis. Nous supposerons également que le technicien de l'utilisateur qui s'occupe de l'entretien coûte 75 € par heure.

Tableau n°18: Heures d'entretien annuelles d'un lien OSF (2 terminaux)

GAMME	Temps d'entretien annuel par terminal	Coût annuel par lien et par an
Basse	20 minutes	50 €
Moyenne	40 minutes	100 €
Haute	80 minutes	200 €

Source : professionnels, estimations personnelles

Selon les hypothèses posées, le coût annuel de l'entretien d'un lien optique revient donc entre 50 et 200 euros par an.

Les produits hertziens, quant à eux, ne nécessitent presque aucun entretien. Ils n'utilisent pas de lasers qui s'usent, ne craignent pas la saleté et demandent moins de rigueur du point de vue de l'alignement. Nous supposerons donc qu'ils ne nécessitent aucune heure d'entretien préventif par an.

b) Garantie

Plusieurs degrés de garanties existent pour les produits sans fil optiques et hertziens:

- Pas de garantie: l'utilisateur supporte lui-même tous les frais de réparation éventuels
- Garantie normale: le vendeur de la garantie supporte les frais de réparation ne résultant pas de l'usure normale du produit.
- Garantie normale avec service express: le vendeur de la garantie supporte les mêmes frais que pour la garantie normale et assure en plus une réparation dans un délai minimum.
- Garantie omnium avec service express: le vendeur de la garantie supporte tous les frais de réparation, même ceux qui résultent de l'usure normale et garantit une réparation dans un délai minimum.

Afin de simplifier notre analyse, nous supposerons ici que l'utilisateur souscrit une garantie omnium avec service express. En effet, cette garantie englobe à la fois les coûts liés aux dysfonctionnements, à l'usure et au remplacement des dispositifs. Nous ne devrons donc plus y ajouter les coûts du rachat de nouveau matériel lorsque l'ancien est usé ou le manque à gagner résultant d'un dysfonctionnement de longue durée.

Le Tableau n°19 représente le coût annuel supposé de cette garantie omnium, exprimé en pourcentage du produit neuf, pour les produits OSF et hertziens. Ces montants ont été déduits de prix de garanties vendues par des distributeurs en ligne et de discussions avec des professionnels. Comme la garantie tient compte de l'usure normale des dispositifs, elle devrait avoisiner, en pourcentage du prix d'achat, le taux d'amortissement linéaire du produit. Des taux d'amortissement de 15% et de 25% respectivement pour les produits hertziens et OSF correspondent à une période d'amortissement respective d'environ 6 et 4 ans, ce qui est consistant avec les périodes d'usure citées par les professionnels.

Tableau n°19: Prix d'une garantie omnium avec service express des produits OSF et hertziens en pourcentage du prix d'achat.

TYPE PRODUIT	FRACTION DU PRIX D'ACHAT
Produits hertziens	15 %
Produits OSF	25 %

Source : professionnels, estimations personnelles, Annexe 1

2.4.9 Consommation électrique

Les tableaux n°20 et n°21 donnent des ordres de grandeur de la consommation électrique des produits optiques et hertziens. Ceux-ci ont été déduits à partir de spécifications de produits listées en Annexe n°1.

Nous pouvons faire les observations suivantes:

- les produits OSF consomment un peu moins que les produits hertziens
- La consommation des produits optiques augmente avec la gamme, car les produits de haute gamme utilisent plus de lasers, alors que celle des produits hertziens à micro-ondes augmente avec la bande passante
- les produits hertziens millimétriques (622 et 1250 Mbps) consomment moins par Mbps que les produits hertziens à micro-ondes.

Nous supposons un prix de l'électricité moyen au Kilowattheure de 14 cents, ce qui correspond à 16 heures par jour d'un tarif diurne de 16 cents et 8 heures par jour au tarif nocturne de 10 cents[45]. Nous supposons également que les systèmes fonctionnent 24 heures sur 24 avec une consommation maximale. Il en résulte une dépense annuelle d'environ 1,2 euros par watt. En comptant la consommation pour deux dispositifs, nous pouvons calculer que le plus économe de liens optiques consomme 48 euros d'électricité par an alors que le lien hertzien le plus friand en électricité en consomme 240 € par an.

Tableau n°20: Consommation électrique maximale des produits OSF en fonction de la gamme

Source : dépliants de produits OSF, Annexe 1

GAMME	Consommation maximale par dispositif	Coût annuel par lien
Basse	20 Watts	48 €
Moyenne	35 Watts	84 €
Haute	50 Watts	120 €

Tableau n°21: Consommation électrique maximale des produits hertziens en fonction de la bande passante

Source : dépliants de produits Hertziens Proxim, Annexe 1

BANDE PASSANTE	Consommation maximale par dispositif	Coût annuel par lien
10	40 Watts	96 €
50	45 Watts	108 €
155	100 Watts	240 €
622	50 Watts	120 €
1250	50 Watts	120 €

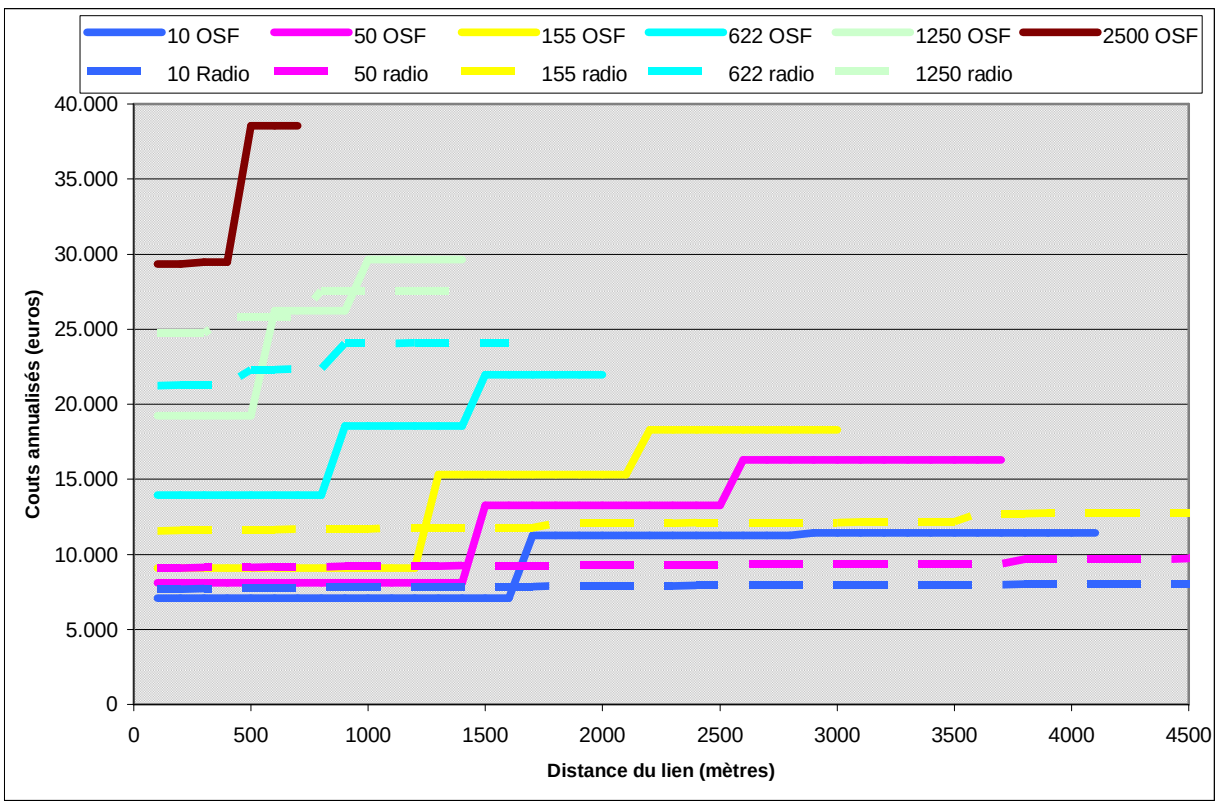
[45] http://www.electrabel.be/myhome/billsandtariffs/documents/electar_buv_fr.pdf

2.4.10 Résultats

A partir des hypothèses précédemment posées, pour chaque bande passante et chaque technologie envisagée, nous calculons l'ensemble des coûts d'investissements et des coûts récurrents en fonction de la distance. En fonction des mêmes variables, nous calculons la valeur actuelle nette de l'utilisation des technologies sur 15 ans en utilisant un taux d'actualisation de 15%. Nous déduisons ensuite de cette VAN la redevance annuelle équivalente, c'est-à-dire, la somme payée annuellement qui engendrerait une valeur actuelle nette équivalente.

La figure n°15 illustre cette redevance annuelle équivalente calculée pour chaque bande passante et chaque technologie étudiée en fonction de la distance du lien. Chaque couleur correspond à une bande passante. Les traits pleins représentent les technologies OSF et les traits pointillés les technologies radio. Les sauts effectués par les droites quand la distance augmente correspondent au passage à un produit de gamme supérieure, pour l'OSF, ou au passage à une plus grande antenne, pour la radio. Rappelons également qu'il n'y a pas de produits OSF haut de gamme en 10 Mbps et pas de produits OSF bas de gamme en 2500 Mbps. Cette dernière bande passante existe uniquement en OSF.

Figure n°15: Coûts annualisés des technologies OSF et Radio en fonction de la bande passante et de la distance, sans licence micro-ondes, avec licence millimétrique



Source : calculs personnels

Nous pouvons faire les observations suivantes:

- Pour les bandes passantes de 10 à 155 Mbps, seule la plus basse gamme OSF est compétitive par rapport aux micro-ondes. Pour les distances inférieures à 1000 mètres, les prix optiques et hertziens sont comparables avec un léger avantage pour l'optique. Pour les distances au-delà de 1500 mètres, les solutions hertziennes reviennent moins chères.
- Pour les bandes passantes de 622 et 1250 Mbps, les technologies optiques sont plus avantageuses du point de vue du coût annuel que les technologies millimétriques, sauf pour le 1250 Mbps haut de gamme, mais la différence est relativement faible.

- Seules les technologies hertziennes permettent d'atteindre des distances au-delà de 3000 mètres en 155 Mbps et au-delà de 4000 mètres en 10 Mbps
- Les portées maximales des technologies optiques et millimétriques sont équivalentes pour les bandes passantes de 622 et 1250 Mbps.

- Seules les technologies optiques permettent d'atteindre des bandes passantes supérieures à 1250 Mbps.

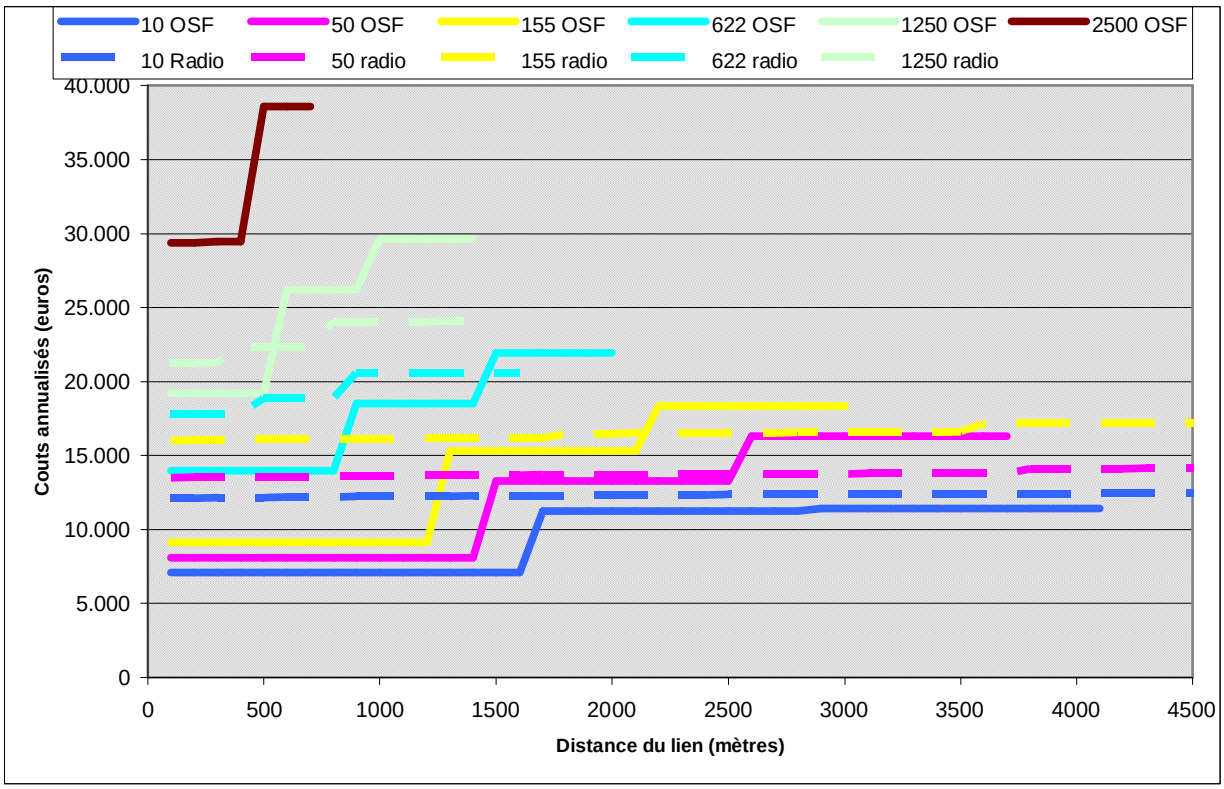
Les observations précédentes sont basées sur deux hypothèses contestables:

- Aucune licence n'est payée en micro-ondes, car on utilise la fréquence sans licence de 5,4 GHz. Or, il se pourrait que cette fréquence soit encombrée. Supposons donc qu'on choisisse une fréquence avec licence. Rappelons que le coût de ces licences est décroissant avec la fréquence. Nous sélectionnerons une fréquence de 8 GHz afin d'explorer la situation où les licences sont les plus chères.

- Une licence est payée pour la fréquence millimétrique de 60 GHz. Or, nous avons vu que l'Union Européenne à l'intention de rendre cette fréquence sans licence. Supposons donc qu'aucune licence n'est payée en 60 GHz

La figure n°16 représente les mêmes informations que la figure n°15, mais en tenant compte des hypothèses modifiées. Les différences sont non négligeables.

Figure n°16: Coûts annualisés des technologies OSF et Radio en fonction de la bande passante et de la distance, avec licence 8GHz, sans licence millimétrique



Source : calculs personnels

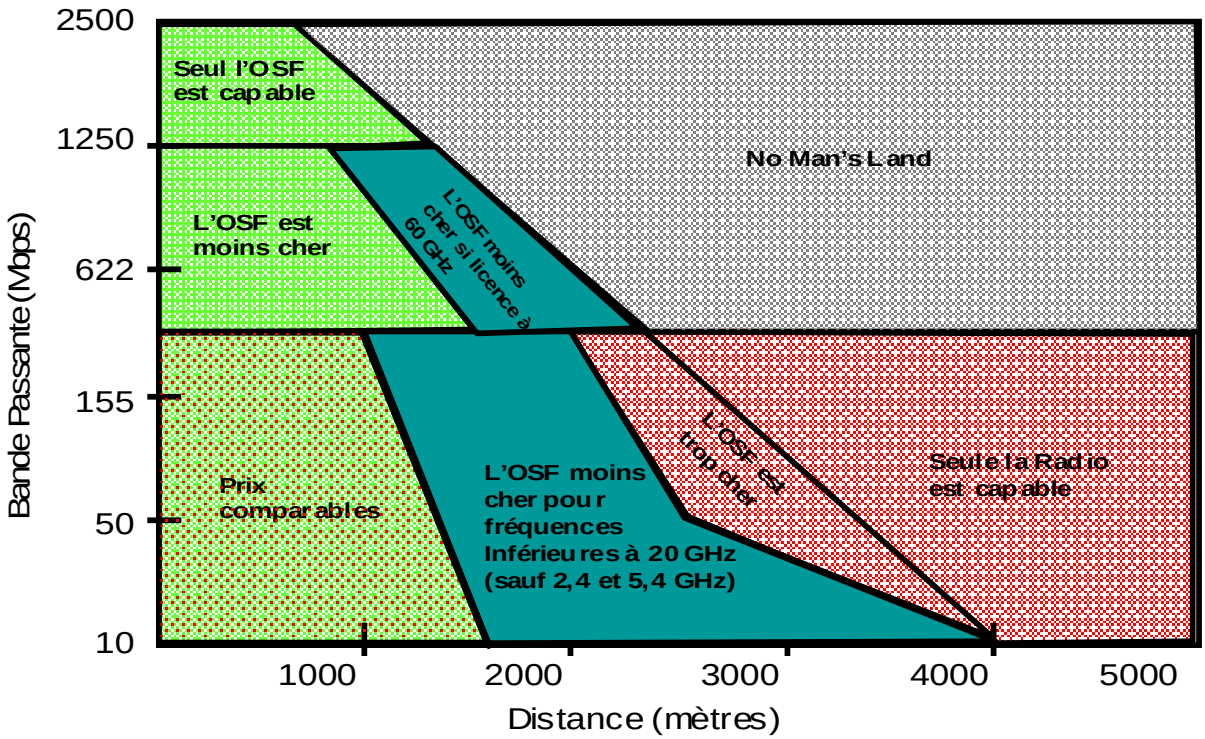
- Avec une licence à 8 GHz, pour les bandes passantes de 10 à 155 Mbps, les dispositifs OSF de moyenne gamme deviennent compétitifs par rapport aux systèmes à micro-ondes. Ils sont donc concurrentiels jusqu'à 2000 mètres en 155 Mbps, 2500 mètres en 50 Mbps et 4000 mètres en 10 Mbps. Que se passe-t-il lorsque l'on utilise, pour les dispositifs hertziens, des fréquences supérieures à 8 GHz pour lesquelles les licences à payer sont inférieures? A la suite du paramétrage du modèle avec différentes valeurs de fréquences, il apparaît que les systèmes OSF de moyenne gamme conservent leur avantage lorsqu'ils sont comparés à des dispositifs hertziens de fréquences inférieures à 20 GHz Au-delà de cette fréquence, les licences à payer deviennent suffisamment faibles pour que les systèmes à micro-ondes présentent un avantage économique significatif.

- Sans licence à 60 GHz, pour les bandes passantes de 622 et 1250 Mbps, les produits OSF de haute gamme ne sont plus, ou beaucoup moins compétitifs. L'OSF est concurrentiel jusqu'à 1000 mètres en 1250 Mbps et 1500 mètres en 622 Mbps.

2.4.11 Conclusion

A la suite des observations faites précédemment sur la figure n°15 et 16, nous pouvons segmenter l'espace "Portée-Bande passante" en différents ensembles en fonction de la compétitivité économique et technique des technologies OSF et hertziennes. L'objectif est d'identifier pour quels profils "distance-bande passante" le marché OSF présente le plus grand potentiel de développement. La figure n°17 représente cette segmentation.

Figure n°17: Segmentation de l'espace "distance-bande passante" en fonction de la compétitivité économique et technique des technologies OSF et hertziennes.



Source : Valentin Bauwens

Plusieurs segments peuvent être identifiés:

Pour les bandes passantes inférieures ou égales à 155 Mbps:

- Portées inférieures à environ 1200 m: Les technologies OSF et hertziennes ont des prix comparables et atteignent un même niveau de compétitivité.
- Portée entre environ 1200 et 3000 m: l'OSF est compétitif par rapport aux technologies hertziennes si des fréquences inférieures à 20 GHz sont utilisées (car les licences sont plus chères dans ce cas), sauf pour les fréquences de 2,4 et 5,4 GHz (car elles sont sans licence)
- Portée supérieure à environ 3000 mètres: l'OSF n'est pas compétitif, car il est plus cher ou pas capable.

Pour les bandes passantes de 622 et 1250 Mbps:

- Portée inférieure à environ 1200 mètres: l'OSF est fortement compétitif car il est moins cher.
- Portée entre environ 1200 et 2000 m: l'OSF est compétitif si une licence doit être payée pour utiliser la fréquence de 60 GHz

Pour une bande passante de 2500 Mbps:
l'OSF est très compétitif, car il est seul capable.

Nous pouvons conclure que globalement, la bande passante marginale est moins chère pour les technologies optiques que pour les technologies hertziennes et que la portée marginale est plus chère pour les technologies optiques que pour les technologies hertziennes, ce qui explique que l'optique sans fil soit le plus compétitif pour les bandes passantes élevées sur des courtes distances et que le sans fil hertzien soit plus compétitif pour des bandes passantes faibles sur des longues distances. Cette conclusion est parfaitement consistante avec les propriétés physiques de propagation des ondes optiques et hertziennes décrites en début de chapitre.

Titre 3: Les technologies filaires

Avant de prendre la décision d'implémenter un lien OSF, tout opérateur aura choisi d'utiliser une technologie sans fil plutôt qu'une technologie filaire. La plupart du temps, en effet, les opérateurs remplissent leurs besoins d'interconnexion en recourant aux technologies câblées.

Il est très difficile de dégager des généralités à propos du prix de l'implémentation des technologies filaires. Les coûts sont en effet extrêmement variables en fonction des circonstances, encore bien plus que pour les technologies sans fil. Nous pouvons cependant décomposer les coûts en trois parties:

- Le coût du matériel de communication et de son installation: modems, switchs, amplificateurs,...
- Le coût du médium: cuivre ou fibre optique
- Le coût de l'installation du médium.

Bien que le coût du matériel filaire et de son installation soit généralement plus faible que celui des technologies sans fil, nous pouvons constater qu'il existe deux coûts supplémentaires par rapport aux technologies sans fil résultant de l'achat et de l'installation du médium. Le coût du médium filaire n'est cependant pas énorme. Son installation, par contre peut être extrêmement coûteuse, mais les frais de l'installation dépendent fortement des circonstances. Pour les systèmes sans fil, par contre, le médium est gratuit et il ne doit pas être installé.

Une autre différence essentielle entre les technologies filaires et sans fil réside dans le fait que, lorsque la portée maximale du système filaire est atteinte, il suffit d'installer un dispositif amplifiant ou régénérant le signal pour atteindre des distances plus élevées. Le coût de cette opération ne représente alors qu'une fraction du coût total d'implémentation. Par contre, pour les technologies sans fil, il faudra réinvestir dans un lien additionnel, ce qui fera doubler les coûts.

En raison de la diversité des technologies filaires et de la variabilité de coûts associés, nous ne nous risquerons pas à faire une étude comparative approfondie des dépenses. Essayons cependant de fournir des ordres de grandeur pour les trois composantes de coûts précités. Pour cela nous devons préalablement choisir une technologie filaire à laquelle comparer les systèmes OSF. Nous sélectionnerons la fibre optique, comme le signal y est transmis par voie optique, comme pour les technologies OSF. De plus, les débits possibles y sont du même ordre de grandeur.

Il existe essentiellement deux variétés de fibres optiques: la fibre multimode et la fibre monomode. Le cœur de la première catégorie de fibres étant plus large que celui de la deuxième, plusieurs trajectoires sont possibles pour le signal optique dans une fibre multimode alors que seule la trajectoire la plus directe est possible dans une fibre monomode. Il en résulte une dispersion du signal beaucoup plus faible dans une fibre monomode et la possibilité d'y transporter le signal sans le régénérer sur des distances beaucoup plus élevées. Nous sélectionnerons ici de la fibre monomode afin de ne pas devoir intégrer dans nos calculs le prix de répétiteurs, la portée de dispositifs monomodes étant souvent beaucoup plus importante que celle des systèmes OSF. Notons cependant que le matériel de transmission monomode est souvent plus coûteux que le matériel multimode.

Analysons maintenant les différentes catégories de dépenses précitées en essayant de proposer des coûts dont le déboursement entraîne l'implémentation d'un système dont les caractéristiques sont les plus proches possibles des dispositifs OSF.

a) Le matériel de communication et son installation

Sur les conseils d'un vendeur professionnel de matériel optique[46], nous utiliserons des modems et multiplexeurs de la marque Pandatel afin de dégager des ordres de grandeur pour les prix de ce matériel. La tableau n°22 fournit les prix et caractéristiques de deux produits Pandatel, l'un présentant des performances plus faibles en terme de distance et de bande passante que les produits OSF typiques (le BM-Z) et l'autre présentant des performances plus élevées (le Fomux 3000).

Tableau n°22: Exemples de prix et de caractéristiques de produits optiques

Caractéristique	Pandatel BM-Z	Pandatel FOMUX 3000
Prix unitaire	800 €	13.000 €
Bande passante	Jusqu'à 2 Mbps	Jusqu'à 32 X 2500 Mbps
Distance	Jusqu'à 11 km	Jusqu'à 80 km
Nombre de brins	2	2
Type fibre	Monomode	Monomode ou multimode
SNMP	Oui	Oui
DWDM	Non	Oui
Système backup	Non	Oui

Source : Pandatel

Selon le même professionnel, le premier peut être obtenu à 800 € alors que le prix du second tourne plutôt autour de 13.000 €. Etant donné que les performances des

[46] DINH telecom, Herstal, Belgique

systèmes OSF se situent entre celles de ces deux produits, la valeur d'un dispositif de transmission sur fibre optique dont les performances sont comparables à celles des systèmes OSF doit donc se trouver entre ces deux prix. Nous supposerons donc que le prix moyen d'un tel dispositif est de 5.000 € par unité. Il est évident que le prix de ce matériel peut être beaucoup plus faible ou beaucoup plus important, mais l'objectif est ici de fournir des ordres de grandeur afin de comparer ces dépenses aux autres composantes du coût des technologies filaires et aux coûts des systèmes OSF.

Nous supposerons une configuration du matériel optique en "point à point", identique à celle utilisée pour les systèmes OSF, c'est-à-dire que deux dispositifs sont connectés entre eux par un canal exclusif. Le prix du matériel intervenant dans le lien est donc égal à celui de deux modems ou multiplexeurs auquel on ajoute le prix des répétiteurs éventuels intervenant pour régénérer le signal lorsque la portée maximale du matériel est atteinte. Rappelons que nous utilisons du matériel monomode dont la portée est bien plus élevée que celle de dispositifs OSF. Nous pouvons donc négliger le prix des répétiteurs et supposerons que le prix total moyen du matériel monomode intervenant dans un lien point à point en fibre optique est de 10.000 €.

b) Le médium

Plusieurs types de câbles optiques monomodes sont disponibles. La plupart du temps, les câbles utilisés contiennent un nombre élevé de fibres optiques (plusieurs dizaines). Il est en effet intéressant d'installer plusieurs fibres à la fois, comme le coût d'installation du câble est souvent beaucoup plus important que le prix de la fibre optique proprement dite. Dans le but de comparer ce qui est comparable, nous supposerons cependant l'utilisation d'un câble contenant le nombre minimal de fibres requis dans un lien "point à point", c'est-à-dire deux (une pour chaque sens de communication). Selon un vendeur professionnel de matériel de câblage[47], un tel câble coûte environ 750 € par kilomètre.

Remarquons que le même câble en version multimode coûte plus cher au mètre, ce qui semble paradoxal vu que le monomode est plus fin et plus complexe à produire. La raison en est que les câbles monomodes sont produits et achetés en quantités beaucoup plus grandes car ils permettent des portées plus importantes.

[47] Cebeo, Kuurne, Belgique

c) L'installation du médium

Les coûts d'installation de la fibre optique peuvent fortement varier en fonction de l'endroit où elle est placée et de la méthode d'installation utilisée. Nous verrons que ces dépenses constituent souvent la plus grande partie de la valeur d'investissement d'un lien en fibre optique. Dans son étude sur les plates-formes d'accès à haute bande passante[48], Stagg Newman avance des prix pour l'implémentation de systèmes Gigabit Ethernet à fibre optique.

Il y décrit notamment les coûts de placement de fibres optiques selon la façon dont elles sont installées:

- La méthode "Aerial": La fibre optique est suspendue le long de pylônes comme le sont certains câbles électriques à haute tension. Cette méthode est essentiellement utilisée dans des zones rurales. Elle revient à environ 10.000 $ par mile ou 5.200 € par kilomètre.

- La méthode "Pull through": La fibre optique est tirée à travers des canalisations souterraines existantes comme des égouts. Cette méthode revient à environ 25.000 $ par mile ou 12.900 € par kilomètre

- La méthode "Bury": la fibre optique est installée dans des petites tranchées superficielles. Cette méthode est essentiellement utilisée en banlieue des villes. Elle revient à environ 60.000 $ par mile ou 31.000 € par kilomètre

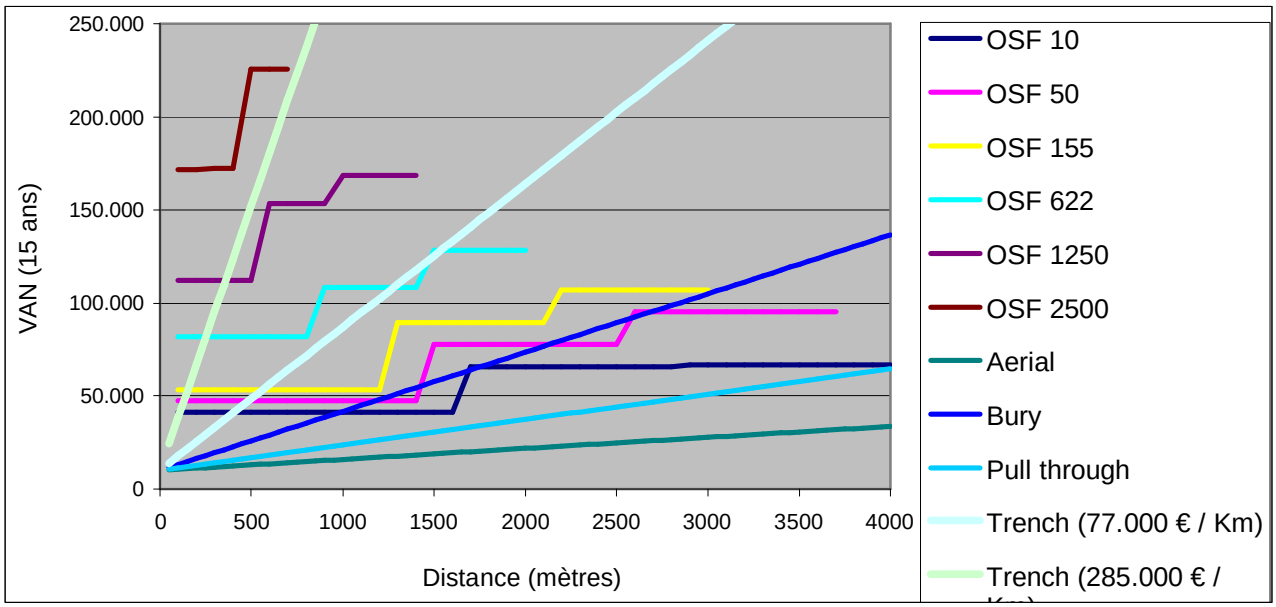
- La méthode "Trench": la fibre optique est placée dans des nouvelles conduites installées dans des tranchées profondes. Cette méthode est essentiellement utilisée en ville. Son coût dépend fortement des circonstances et peut varier entre 150.000 $ par mile ou 77.000 € par kilomètre et 550.000 $ par mile ou 285.000 € par kilomètre. Notons que dans les villes, il faut souvent y ajouter les droits de passage payés à la commune qui peuvent parfois s'élever à 250 € par mètre[49].

La combinaison des différents coûts décrits ci-dessus permet de déterminer une fonction liant la distance du lien en fibre optique au coût total d'implémentation. La Figure n°18 représente la Valeur Actuelle Nette de ces coûts en fonction de la méthode d'installation utilisée ainsi que la VAN de l'utilisation de technologies OSF. La

[48] Broadband access platforms, Stagg Newman, McKinsey and Company, avril 2002.
[49] Selon Bart Pen de la société Multicap (www.multicap.be)

VAN est calculée sur une période de 15 ans. Remarquons que nous négligeons d'éventuels coûts récurrents pour les systèmes à fibre optique et que la VAN des coûts est donc identique à celle des investissements. Rappelons que nous utilisons un prix moyen pour les coûts du matériel de transmission sur fibre optique et que le coût total représenté sur la Figure n°18 ne varie donc pas en fonction de la bande passante.

Figure n°18: Comparaison de la VAN des coûts d'implémentation des technologies à fibres optiques par rapport aux technologies optiques sans fil.



Source : calculs personnels

Nous pouvons faire deux observations essentielles:

- Les coûts les plus importants des technologies à fibre optique sont ceux proportionnels à la distance, notamment les coûts d'installation du médium, ceux-ci étant très variables en fonction de la méthode utilisée.
- Contrairement à ce que prétendent les constructeurs de dispositifs OSF, les coûts de tels systèmes ne sont pas toujours plus avantageux que ceux des technologies à fibre optique. Lorsque les méthodes "Aerial" et "Bury" sont utilisées, la fibre optique revient même toujours moins chère. Par contre, lorsque des tranchées doivent être creusées, la fibre optique n'est parfois intéressante que pour des faibles distances de quelques centaines de mètres. Le modèle OSF à 2500 Mbps semble toujours plus cher que la fibre optique.

Il faut cependant noter que les méthodes "Aerial" et "Bury" ne peuvent être utilisées que dans des zones peu denses et que la seule méthode applicable en ville est souvent le creusage de tranchées (méthode trench). La technologie OSF sera donc surtout avantageuse en ville.

D'autre part, il faudrait également considérer d'autres critères que la VAN dans le choix entre une technologie OSF ou à fibre optique. La fibre optique ne nécessite en effet pas de ligne de vue et ne craint pas le brouillard. La disponibilité d'un lien en fibre optique ne dépend donc que des dysfonctionnements du matériel et d'éventuelles coupures de la fibre. Par contre, la durée d'installation de la fibre optique peut être de plusieurs mois alors que l'installation d'un système OSF ne nécessite que quelques jours. De plus, alors que l'intégralité des dépenses en fibre optique est effectuée avant son utilisation, les systèmes OSF nécessitent un investissement initial moindre et permettent une répartition des dépenses sur la période d'utilisation du lien.

Le Tableau n°23 résume les avantages et inconvénients des technologies filaires par rapport à l'optique sans fil.

Tableau n°23: Avantages et inconvénients des technologies filaires par rapport à l'OSF

AVANTAGES	INCONVENIENTS
- Pas de ligne de vue requise - Plus grande fiabilité - Moins cher dans zones peu denses	- Implémentation plus lente - Investissement initial plus grand - Souvent plus cher en ville

Titre 4: Les lignes Louées

Lorsqu'un un opérateur a besoin d'une connexion entre deux points, il ne doit pas nécessairement la construire mais il peut également la louer. C'est le choix économique bien connu entre la possession ou la location d'une ressource.

Ainsi, des opérateurs ayant investi dans un réseau et n'utilisant pas l'intégralité de sa capacité en revendent l'utilisation à d'autres opérateurs où à des entreprises. La plupart du temps, l'opérateur revendeur sera un opérateur historique, mais pas nécessairement.

Les prix des lignes louées dépendent essentiellement de trois facteurs:

- La bande passante: Celle-ci varie de 2 Mbps à plusieurs Gbps. Notons cependant que seuls les prix des lignes louées à bande passante inférieure à 155 Mbps sont fréquemment publiés par les opérateurs. Pour les autres bandes passantes, les prix font l'objet de négociations individuelles.
- La distance entre les deux points connectés: Elle varie de quelques kilomètres à plusieurs centaines de kilomètres.
- La localisation des points connectés: Dans la plupart des pays, le territoire est découpé en zones classées en fonction de la densité du réseau et de la demande. Au moins le réseau est développé et la demande est importante aux extrémités de la connexion, au plus le prix sera élevé.

Le coût de ces lignes est constitué de deux composantes:

- L'installation: Il s'agit des frais de la connexion physique entre le bâtiment à relier et le point de présence le plus proche du réseau de l'opérateur. Chez Belgacom, par exemple, l'installation d'une ligne louée à haut débit (34 ou 155 Mbps) peut coûter jusqu'à 5.000 €.
- La location: redevance mensuelle payée à l'opérateur.

Le tableau n°24 reprend des ordres de grandeur pour la somme annuelle payée en frais de location de lignes louées virtuelles et les compare avec les coûts annuels équivalents des produits OSF précédemment calculés. Les coûts de lignes louées ont été déduits des tarifs en vigueur chez Belgacom[50], de discussions avec des professionnels[51] et d'une étude réalisée par la commission européenne[52]. Celle-ci

[50] http://www.belgacom.be/web/car/staticsite/en/leasedlines_tariffs/nat_digit_ll.html
[51] Eric Mannie, Intairlink
[52] Commission Européenne (décembre 2000), "*Sixth report on the implementation of the telecommunications regulatory package",* Annexe 7

publia en 2000 une analyse de la situation concurrentielle du marché des lignes louées dans l'Union Européenne. Des prix pratiqués par les opérateurs historiques y sont publiés. La Belgique faisait alors partie du groupe de pays où la concurrence était la moins développée et où les tarifs pratiqués étaient les plus élevés. En décembre 2002, la commission publia un nouveau document[53] décrivant l'évolution des prix dans l'Union Européenne. Ceux-ci auraient alors diminué de 30%. Pour estimer les prix d'aujourd'hui, nous supposerons donc que ceux-ci ont diminué de 35% par rapport à l'étude initiale de 2000. Il est difficile de trouver des prix publics au dessus de 155 Mbps. Cependant, selon un document de AOptics[54], les lignes louées à 622 et 2500 Mbps coûteraient en moyenne aux Etats-Unis respectivement 7000 et 14000 dollars par mois. En convertissant en Euro avec un taux de 0,83 dollars/euro, nous obtenons un prix annuel d'environ 70.000 et 140.000 euros.

Tableau n°24: Ordres de grandeur des frais annuels de location de lignes louées et coûts annuels équivalents de produits OSF comparables.

Bande passante Ligne Louée (distance < 5 km)	Tarif annuel	Bande passante OSF comparable	Coût annuel équivalent maximal
34 Mbps	20.000 €	50 Mbps	16.000
155 Mbps	40.000 €	155 Mbps	18.000
622 Mbps	70.000 €	622 Mbps	22.000
2500 Mbps	140.000 €	2500 Mbps	37.000

Source : commission européenne, Oaptix, Belgacom

Nous constatons que, d'un point de vue économique, les lignes louées sont beaucoup moins avantageuses que l'optique sans fil.

Cependant, cette différence de prix doit être mise en regard avec les avantages qu'offrent les lignes louées par rapport à l'OSF: Elles ne nécessitent pas de ligne de vue, présentent une plus grande fiabilité et nécessitent un investissement initial moindre. Le tableau n°25 présente différents avantages et inconvénients des lignes louées par rapport aux technologies OSF.

Tableau n°25: Avantages et inconvénients des lignes louées par rapport à l'OSF

AVANTAGES	INCONVENIENTS
- Pas de ligne de vue requise - Plus grande fiabilité - Moindre investissement initial	- Plus chères

[53] Commission Européenne (décembre 2002), "*Explanatory Memorandum: leased lines: commission closes the leased line sector inquiry and two ex-officio cases in Belgium an Italy*"
[54] Allen M., Pelosi L. Bhakta D. (octobre 2002), "Summary of business opportunity", AOptix

Titre 5: Autres Critères de sélection

Lors de notre étude des technologies sans fil, nous nous sommes uniquement intéressés aux coûts comme critères de sélection. Dans le cadre de la comparaison entre les technologies optiques et hertziennes, ce facteur de différentiation est essentiel, car les systèmes optiques et hertziens offrent des performances comparables (distance, bande passante, flexibilité…) sous des contraintes de nature proche (ligne de vue, climat,..).

Toutefois, au cours de notre comparaison avec des concurrents plus éloignés, nous avons ressenti qu'une approche basée uniquement sur les coûts serait nécessairement lacunaire. Les alternatives filaires et les lignes louées présentent en effet des caractéristiques différentes qui peuvent justifier les différences de prix rencontrées. D'autre part, certains facteurs pratiques, comme l'absence ou l'existence de ligne de vue, peuvent exclure d'office les systèmes sans fil au profit des autres technologies. Ces différentes alternatives de communication ne sont donc pas toujours substituables. Ce sont des produits différents s'adressant à des marchés distincts.

En plus des critères de distance, de bande passante et de coûts précédemment étudiés en profondeur, nous devrons donc nous concentrer sur d'autres critères de sélection inévitables lors de notre étude future des applications de l'OSF:

1) L'existence ou l'absence de ligne de vue: L'inexistence de ligne de vue exclue catégoriquement l'utilisation des technologies sans fil étudiées. Les systèmes filaires et les lignes louées sont insensibles à ce facteur.
2) Le besoin d'une connexion fiable: Même si les technologies sans fil actuelles présentent une disponibilité et un taux d'erreur acceptables dans la plupart des cas, certaines applications nécessitent un niveau de fiabilité très élevé que les technologies sans fil ne peuvent pas offrir. Il faudra dans ce cas recourir aux technologies filaires ou aux lignes louées.
3) Le besoin d'une implémentation rapide: Les technologies filaires nécessitent l'installation d'un médium qui peut facilement durer plusieurs mois. Lorsque la situation nécessite un court délai de connexion, les technologies sans fil présentent un avantage car elles peuvent être montées en quelques heures seulement. Notons que parmi les systèmes sans fil, les dispositifs optiques permettent un déploiement plus rapide comme ils ne nécessitent pas l'obtention d'une licence qui peut durer plusieurs semaines. Les lignes louées autorisent également des connexions rapides, à condition que les travaux d'installation soient effectués rapidement.

4) La durabilité de la connexion: Lorsque le besoin d'interconnexion est temporaire, l'investissement dans l'installation de systèmes filaires est économiquement non justifié. L'utilisation de technologies sans fil, nécessitant un investissement plus faible, devient intéressante pour des connexions moins durables de quelques années. Par contre, pour des besoins d'interconnexion de quelques mois, les lignes louées s'imposent.
5) Les ressources, besoins et risques financiers: La capacité à investir dans une solution d'interconnexion dépend des ressources financières de l'entreprise. C'est pourquoi, même si la solution optimale serait l'installation d'une solution filaire, l'entreprise est parfois contrainte, par manque de fonds suffisants, de recourir temporairement aux solutions sans fil ou aux lignes louées. De plus, comme les technologies sans fil et les lignes louées permettent l'installation rapide d'une connexion, elles autorisent également de percevoir rapidement les revenus engendrés par cette connexion. Par rapport à la location d'une ligne, l'acquisition du lien implique toutefois la prise d'une position financière plus ou moins risquée. On ne sait en effet jamais prévoir exactement l'utilisation qui en sera faite et les revenus qu'il permettra de générer. Le payement d'une prime de risque explique en partie les prix élevés demandés par les propriétaires des lignes louées à leurs locataires.

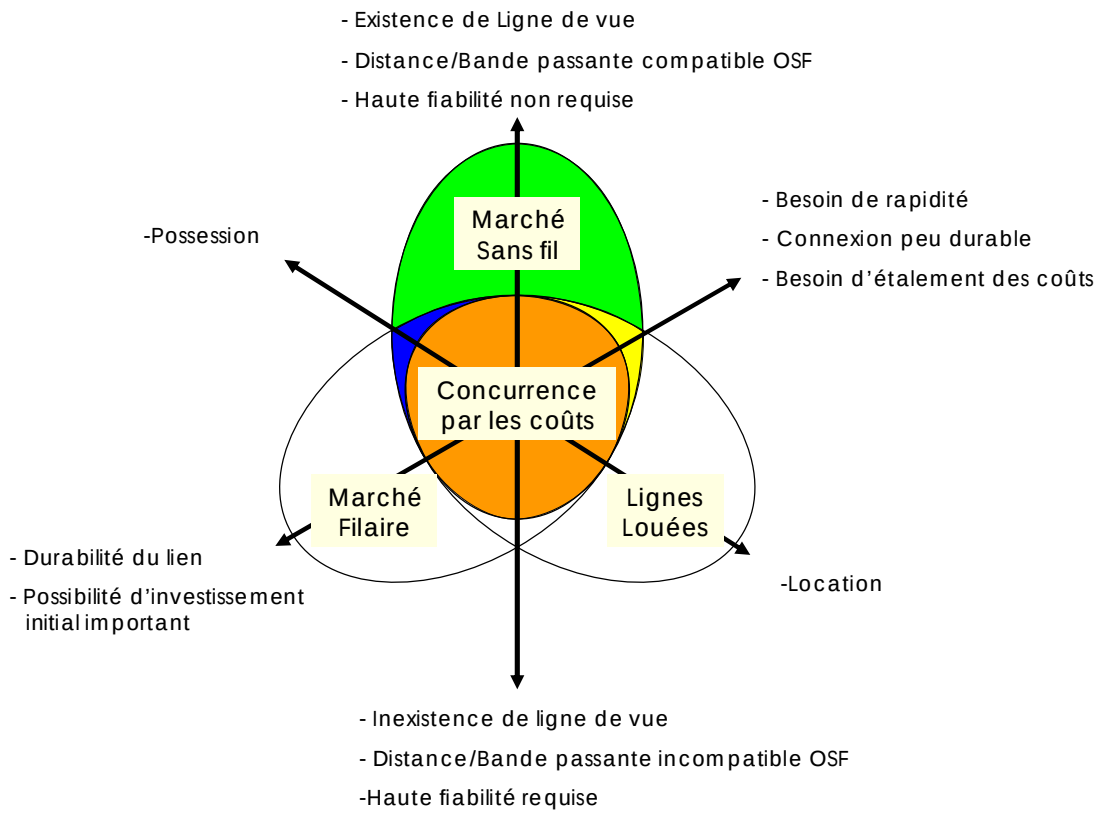
Le Tableau n°26 évalue les technologies étudiées selon les critères de sélection abordés ci-dessus. Remarquons que nous avons regroupé les technologies sans fil optiques et hertziennes, comme elles ne se différencient pas beaucoup selon ces critères.

Tableau n°26: Evaluation des systèmes d'interconnexion sans fil, filaires et des lignes louées selon les autres critères de sélection.

	SANS FIL	FILAIRE	LIGNES LOUEES
Fiabilité	Moyenne	Grande	Grande
Besoin ligne de vue	Oui	Non	Non
Rapidité d'implémentation/	Rapide	Lent	Rapide
Coût d'abandon	Moyen	Elevé	Nul
Répartition coûts	Un peu en investissement. Beaucoup d'entretien, garantie...	Presque tout en investissement. Peu d'entretien	Intégralité en coûts récurrents

La figure n°19 représente l'ensemble des critères de sélection des technologies de façon graphique. Ils sont regroupés selon trois axes correspondant chacun à un type de connexion (sans fil, filaire où lignes louées). De cette manière, on associe à chaque type de connexion les critères qui la discriminent le plus par rapport aux autres. Les technologies sans fil, par exemple, seront uniquement utilisées dans des applications où il existe une ligne de vue, où les exigences en terme de distance et de bande sont compatibles avec les performances des technologies sans fil et où une fiabilité de haut niveau n'est pas requise. Les systèmes sans fil se distinguent des systèmes filaires par une plus grande flexibilité et un étalement des coûts au cours de la période d'utilisation. Ils se distinguent également des lignes louées par le fait qu'on en a la propriété.

Figure n°19: Représentation des marchés de connexions et des critères de sélection.



Source : Valentin Bauwens

Les trois ensembles dessinés autour des axes représentent les marchés des connexions sans fil, filaires et loués. Les surfaces des ensembles situés en dehors des intersections représentent les situations où les facteurs discriminants d'un type d'interconnexion sont tellement importants par rapport à ceux des autres types d'interconnexions que seule une technologie peut être employée et n'a donc aucune concurrence. Par contre, les surfaces situées au niveau des intersections représentent des situations où des facteurs discriminants d'une seule technologie

n'ont pas une importance beaucoup plus grande que les autres. Dans cette situation, les technologies sont en concurrence et le choix d'un type d'interconnexion se fera en mettant en regard l'importance relative des différents critères de sélection et le coût des technologies.

Décrivons, à l'aide de la figure n°19, les différents segments du marché des technologies sans fil en fonction de l'importance des critères de sélection et de la situation concurrentielle qui y prévaut:

Dans le segment vert, les technologies sans fil sont les seules à pouvoir être utilisées. Il s'agira par exemple de circonstances dans lesquelles:

- Les conditions rendant possible l'utilisation de technologies sans fil sont remplies (ligne de vue, distance et bande passante compatibles, haute fiabilité non requise)
- Une rapidité d'implémentation est indispensable
- Aucun opérateur ne propose la location d'une ligne

Dans le segment jaune, les technologies sans fil sont en concurrence avec les lignes louées. Il s'agira par exemple de circonstances dans lesquelles:

- Les conditions rendant possible l'utilisation de technologies sans fil sont remplies
- Une connexion est requise pendant seulement quelques semaines
- Un opérateur propose la location d'une ligne

Dans ce cas, le choix se fera en comparant les coûts respectifs des technologies sans fil et des lignes louées.

Dans le segment bleu, les technologies sans fil sont en concurrence avec les technologies filaires. Il s'agira par exemple de circonstances dans lesquelles:

- Les conditions rendant possible l'utilisation de technologies sans fil sont remplies
- Aucun opérateur ne propose la location d'une ligne

Dans ce cas, le choix se fera en comparant les coûts respectifs des technologie sans fil et filaires et en les mettant en regard avec les besoins de rapidité ou d'étalement des coûts.

Dans le segment orange, les technologies sans fil sont en concurrence avec les technologies filaires et les lignes louées. Il s'agira de circonstances dans lesquelles:

- les conditions rendant possibles l'utilisation de technologies sans fil sont remplies
- Un opérateur propose la location d'une ligne

- Il n'y pas d'impératifs en ce qui concerne la rapidité de l'implémentation ou l'étalement des coûts.

Il convient de réaliser une comparaison des coûts des trois solutions, pondérée par les avantages et inconvénients respectifs des technologies.

Remarquons également que les critères abordés ci-dessus n'ont pas tous la même importance dans la sélection d'une technologie sans fil.

Certaines conditions sont indispensables à l'utilisation de ces technologies:

- Besoins de distance et de bande passante compatibles
- L'existe de ligne de vue
- Haute fiabilité de la connexion non requise

Les autres ne font que favoriser les technologies sans fil dans certaines circonstances:

- Besoins de rapidité d'implémentation
- Connexion peu durable
- Absence d'un opérateur offrant des lignes louées
- Besoin d'étalement des coûts

Au cours de l'analyse des applications de l'optique sans fil, nous étudierons donc prioritairement les critères de sélection qui rendent *POSSIBLE* l'utilisation de cette technologie

Titre 6: Conclusion

L'objectif de ce chapitre était d'évaluer la compétitivité technique et économique des dispositifs optiques sans fil par rapport aux principales techniques de communications concurrentes : les faisceaux hertziens, les technologies filaires et les lignes louées

LES FAISCEAUX HERTZIENS, concurrents les plus proches des technologies optiques sans fil, présentent des capacités similaires en terme de distance et de bande passante. Afin de les départager, nous avons donc dû faire une comparaison approfondie des coûts d'investissements et des coûts récurrents dont nous avons calculé la valeur actuelle nette.
Comme une grande partie des coûts étudiés dépendent de la distance couverte par le lien et de la bande passante qu'il transporte, les résultats varient également en fonction de ces facteurs. Une autre variable influençant fortement la compétitivité économique des produits OSF par rapport aux faisceaux hertziens est la présence ou l'absence de licences à payer pour l'utilisation des fréquences hertziennes. Les résultats de ne nos calculs montrent que globalement, les technologies OSF sont plus compétitives pour des liens de bandes passantes élevées sur des distances plus faibles et qu'elles perdent de leur compétitivité au fur et à mesure que la distance des liens augmente et que leur bande passante diminue. De plus, grâce à la modélisation des coûts, nous avons pu déterminer les portées compétitives de liens OSF de diverses bandes passantes, c'est-à-dire, la distance au-delà de laquelle le lien OSF n'est plus compétitif par rapport aux technologies hertziennes.

LES TECHNOLOGIES FILAIRES se différencient des technologies OSF, du point de vue économique, par l'existence de deux coûts d'investissement additionnels liés à l'achat et à l'installation du médium. Le coût de cette installation, très variable en fonction des circonstances et des méthodes d'installation utilisées, peut s'élever à une fraction très importante des coûts totaux. En général, les technologies OSF sont moins onéreuses que les technologies filaires, lorsqu'elles sont utilisées en ville. Cependant, contrairement à ce que prétendent les constructeurs OSF, il peut arriver que les technologies filaires reviennent moins chères que les liens OSF.

LES LIGNES LOUEES, quant à elles, peuvent coûter annuellement plusieurs fois le prix des liens optiques de bandes passantes équivalentes mais demandent un investissement initial moindre.

Cependant, lors de la comparaison avec les technologies filaires et les lignes louées, une approche basée uniquement sur les coûts serait nécessairement lacunaire, comme ces différentes alternatives de communication ne sont pas toujours substituables. C'est pourquoi nous avons énuméré, catégorisé et hiérarchisé différents critères de sélection, tels que l'existence de ligne de vue ou la rapidité d'implémentation, pouvant intervenir dans le choix d'une technologie OSF. Parmi ceux-ci, certains RENDENT POSSIBLE l'utilisation de dispositifs optiques alors que d'autres ne font que la FAVORISER dans certaines circonstances. Dans le chapitre suivant, nous nous concentrerons donc essentiellement sur la première catégorie de critères.

Chapitre III : Applications de l'OSF

Titre 1: Méthodologie

L'objectif de ce chapitre est de vérifier dans quelle mesure les communications optiques sans fil peuvent être implémentées de façon efficace et rentable au sein de quelques types de réseaux sélectionnés. Nous tenterons donc de déterminer les circonstances qui rendent possible cette implémentation et, afin d'avoir une idée de l'ampleur du marché, la fréquence de survenance de ces circonstances favorables.

Essayons de comprendre le raisonnement suivi par un client potentiel d'optique sans fil qui a besoin de connecter entre eux deux points. Ce besoin n'existe pas par lui-même. Il provient de la volonté de mettre en œuvre une application au sein d'un certain type de réseau. C'est cette application qui déterminera la nature de la connexion. C'est donc par l'analyse des applications sous-jacentes de quelques types de réseaux représentatifs que nous tenterons d'identifier en leur sein les connexions susceptibles d'avoir un profil "distance-bande passante" compatible avec l'optique sans fil et pour lequel l'optique sans fil est compétitif par rapport aux technologies hertziennes. Il faudra également tenir compte des besoins de ces connexions en terme de disponibilité.

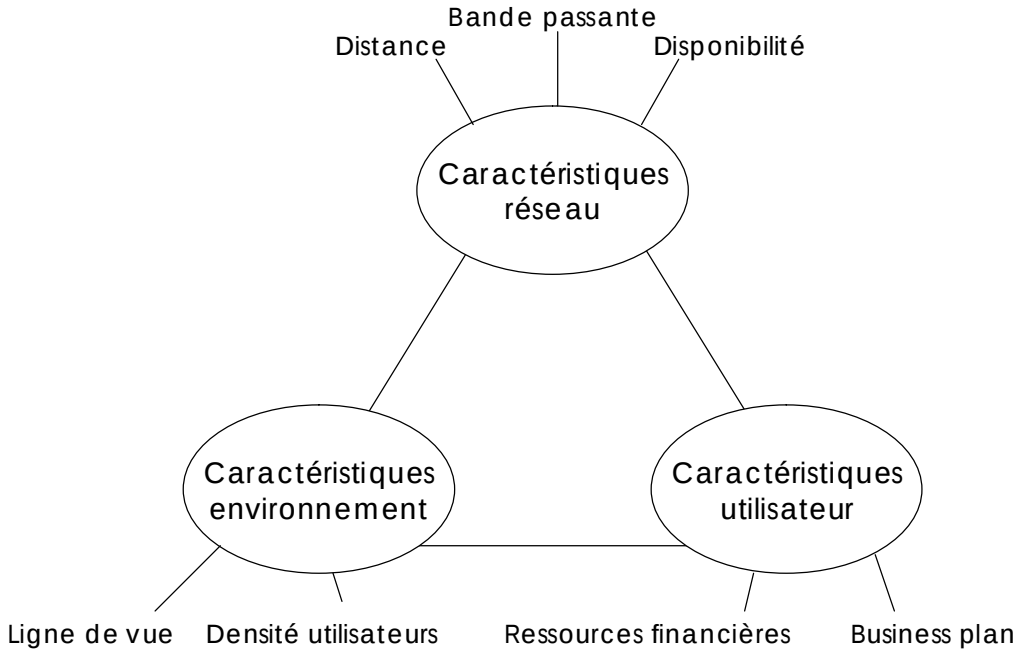
Supposons que le client potentiel a maintenant identifié quelques connexions au sein de son réseau qui, par leurs profils "distance-bande passante" et leurs besoins de disponibilité, pourraient être implémentées en optique sans fil. Le premier travail à effectuer consiste alors à vérifier s'il y a bien ligne de vue entre les points reliés par ces connexions. Cette inconnue doit être étudiée au cas par cas comme elle est indépendante de l'application ou du type de réseau et dépend uniquement de la topologie des lieux dans lesquels ce réseau est mis en oeuvre. Nous devrons donc essayer de trouver un indicateur caractérisant les lieux et permettant de prédire la survenance ou l'absence de ligne de vue.

D'autres facteurs, qui dépendent du client potentiel lui-même, rentrent également dans la balance. Le choix d'utiliser des liens OSF dépendra par exemple de l'étendue actuelle du réseau du client. S'il possède déjà un réseau de fibre optique présent partout, il n'aura aucun besoin d'installer des dispositifs OSF. Par contre, si le client potentiel dispose de ressources financières limitées ou que sa stratégie implique un déploiement rapide de connexions, il optera plus facilement pour des liens OSF qui nécessitent un investissement initial faible et sont rapidement implémentables.

Les trois facteurs qui influencent les critères de sélection sont donc l'application sous-jacente du réseau, les caractéristiques des lieux dans lesquels il est déployé et les caractéristiques propres à son exploitant. Nous tenterons de déterminer pour chaque réseau les circonstances dans lesquelles ces facteurs sont favorables et l'étendue de la survenance de ces circonstances.

La Figure n°20 résume les facteurs qui déterminent les critères de sélection des technologies OSF.

Figure n°20: Facteurs déterminant les critères de sélection des technologies OSF



Source : Valentin Bauwens

Lors de notre analyse des applications, nous nous concentrerons essentiellement sur l'étude des caractéristiques du réseau et de l'environnement. Les conditions de ligne de vue, de distance, de bande passante et de disponibilité qu'ils déterminent sont en effet déterminantes pour l'implémentation des liens OSF. Comme le réseau et l'environnement dépendent l'un de l'autre, nous tenterons de comprendre la manière dont ils interagissent par le biais de simulations.

Titre 2: Sélection d'applications

Les technologies OSF ont des applications diverses auprès des entreprises, des institutions, ou encore dans l'armée. Cependant, comme l'objectif de notre étude est de juger dans quelle mesure les technologies optiques sans fil sont appropriées pour l'utilisation dans le réseau d'un opérateur de télécommunications, nous analyserons exclusivement des applications propres aux opérateurs.

Parmi ceux-ci, il est courant de faire la distinction entre:

- Les opérateurs filaires: où l'utilisateur final accède au réseau par l'intermédiaire d'une technologie filaire. Ceux-ci incluent entre autres les réseaux de téléphonie fixe, les réseaux xDSL, les réseaux coaxiaux et les réseaux d'accès optiques.
- Les opérateurs sans fil: où l'utilisateur final accède au réseau par l'intermédiaire d'une technologie sans fil hertzienne. Ceux-ci incluent entre autres les réseaux GSM, UMTS et WiFi.

Afin de remplir au mieux notre objectif, il convient d'analyser des réseaux dont l'utilisation est fortement répandue, c'est pourquoi, pour les réseaux filaires, nous opterons pour l'étude des réseaux ADSL ainsi que leur version plus rapide, les réseaux VDSL. En ce qui concerne les réseaux sans fil, nous choisirons d'étudier les réseaux GSM et leur nouvelle génération, les réseaux UMTS.

Titre 3: Réseaux xDSL

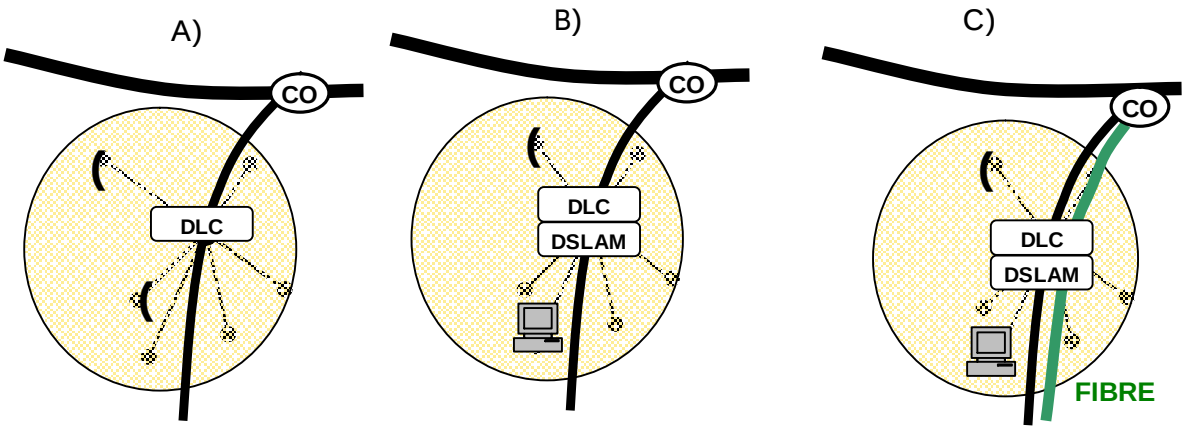
3.1 Architecture d'un réseau xDSL.

La technologie DSL (Digital Suscriber Line) est une technologie permettant de transmettre des informations digitales à des bandes passantes de plusieurs Mbps sur des lignes téléphoniques cuivrées existantes. Il existe plusieurs types de connexions xDSL. Parmi celles-ci, nous en étudierons deux:

- La technologie ADSL (Asymetric Digital Suscriber Line): celle-ci est dite asymétrique car l'utilisateur peut recevoir une bande passante plus élevée que celle qu'il peut envoyer. Les bandes passantes reçues varient de 512 Kbps à 6 Mbps.

- La technologie VDSL (Very high data rate Digital Suscriber Line): celle-ci est asymétrique comme l'ADSL, mais les bandes passantes reçues sont beaucoup plus élevées: elles varient entre 13 et 50 Mbps. Considéré comme le successeur de l'ADSL, il s'agit du standard xDSL le plus récent et donc, le moins répandu. De par les bandes passantes élevées offertes, le nouveau standard permettrait l'offre, par les lignes téléphoniques actuelles, de nouveaux services tels que la vidéo à la demande[55]. Remarquons que Belgacom compte investir 300 millions d'euros en trois ans afin d'offrir des services VDSL à 46% de population belge d'ici fin 2006[56]. Des tests sont actuellement en cours à Gand et à Mons.

Figure n°21: Architectures des réseaux téléphoniques et xDSL



Source : Valentin Bauwens

[55] DSL Forum (2001), "VDSL tutorial, Fiber-Copper access to the information highway"

[56] L'Echo (4 mars 2004), "*300 millions d'euros pour Broadway d'ici 3 ans*"

La figure n°21 A) représente un réseau moderne de téléphonie fixe utilisant la technologie DLC (Digital Loop Carrier). Dans ce système, les signaux analogiques provenant des téléphones des utilisateurs sont transportés sur un réseau de cuivre, appelé boucle locale, jusqu'à un point d'agrégation. A cet endroit, le signal analogique est converti en un signal digital par un appareil appelé Digital Loop Carrier (DLC). Il est ensuite envoyé sur un réseau digital qui dessert les différents DLC de l'opérateur de téléphonie fixe. Ce réseau digital peut être constitué de cuivre ou de fibre optique. Il est représenté sur la figure n°21 A) par le segment vertical passant par le DLC. Ce réseau s'agrège une fois de plus au niveau du Central Office (CO), point de présence du réseau central de l'opérateur. Le réseau central est toujours un réseau optique

Supposons que l'opérateur de téléphonie fixe décide d'offrir des services xDSL à ses clients connectés sur la boucle locale. Dans le cas où la connexion entre le DLC et le CO est optique, il utilisera le même réseau optique et la même boucle locale pour transporter le trafic internet. Cette situation est représentée par la figure n°21 B). La différence essentielle avec la situation précédente réside dans le fait que l'information ne circule plus sur la boucle locale sous forme analogique mais sous forme digitale. C'est pourquoi un dispositif doit être installé au niveau du DLC pour envoyer l'information sous forme digitale sur la boucle locale jusqu'au modem des abonnés xDSL. Ce dispositif est le DSLAM ou Digital Suscriber Line Access Multiplexer. Il peut desservir simultanément plusieurs centaines d'utilisateurs xDSL dans un rayon maximal inversement proportionnel à la bande passante offerte par utilisateur.

Dans le cas où la connexion entre le DLC et le CO n'est pas optique, une fibre optique devra être installée entre ces deux points, car la distribution d'un service xDSL nécessite des bandes passantes élevées sur cette section du réseau, incompatibles avec un réseau cuivré[57]. La Figure n°21 C) représente cette situation.

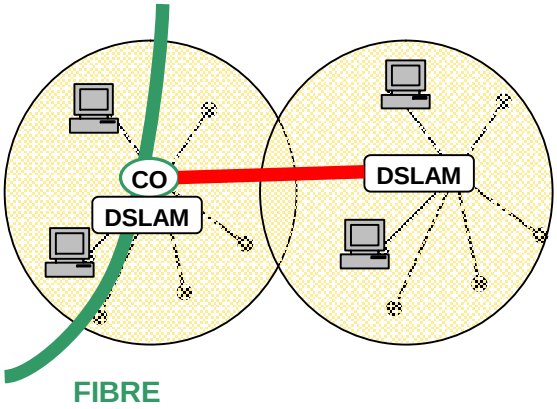
Remarquons que dans l'Union Européenne, un règlement communautaire impose le dégroupage de la boucle locale. Cela implique que l'opérateur historique, propriétaire de la boucle locale, est obligé d'en autoriser l'accès à des concurrents en échange d'une rétribution raisonnable. Ceux-ci peuvent donc amener leur propre fibre optique jusqu'au DSLAM à partir duquel ils distribuent leurs services sur la boucle locale de l'opérateur historique. Bien qu'il puisse utiliser la boucle locale de l'opérateur historique, l'opérateur concurrentiel doit encore construire son propre réseau de fibre optique desservant les DSLAM[58]. Il se retrouve alors dans la même situation que l'opérateur historique dans la figure n°21 C).

[57] International Engineering Consortium, "*Remote DSLAM Solutions*" http://www.iec.org/online/tutorials/adsl_dlc/topic04.html

[58] Eurofiber, "*Building a DSL access network with Dark Fiber*", white paper

3.2 Sélection d'une connexion adéquate pour l'OSF

Figure n°22: Connexion entre le CO et un DSLAM distant



Nous choisirons d'étudier, comme candidat potentiel à l'implémentation par OSF, la connexion entre le Central Office, situé sur le réseau central optique de l'opérateur, et un DSLAM distribuant des signaux xDSL sur un segment distant de la boucle locale. Pour un opérateur historique au réseau vétuste ou un opérateur concurrentiel désireux d'offrir en premier des services xDSL, la possibilité d'effectuer cette connexion par OSF peut en effet s'avérer très intéressante étant donné la rapidité et la flexibilité d'implémentation que présente cette solution par rapport aux solutions filaires[59].

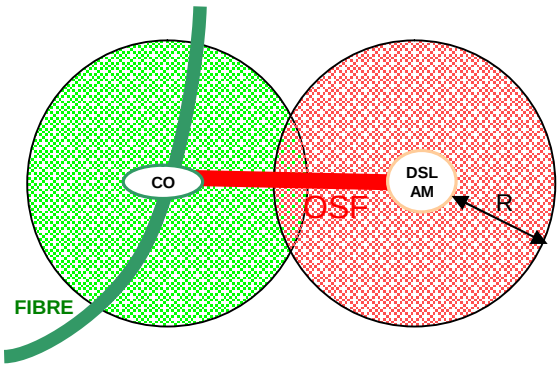
Le choix d'étudier la connexion CO-DSLAM est d'autant plus fondé que la technologie xDSL exige pour cette connexion une portée et une bande passante compatibles avec l'optique sans fil:

- La portée maximale d'un DSLAM sur la boucle locale n'est que de quelques kilomètres. La distance entre le CO et le DSLAM sera donc du même ordre de grandeur.
- Les bandes passantes par client xDSL sont de l'ordre de quelques Mbps et plusieurs dizaines de clients partagent un même DSLAM. Les bandes passantes requises par un DSLAM pourraient donc être supportées par des technologies OSF.

En ce qui concerne la disponibilité, les technologies OSF permettraient certainement de satisfaire les clients xDSL avec lesquels l'opérateur n'est presque jamais lié par un contrat de qualité de service. Pour une disponibilité de 99,9 %, le ralentissement induit par un système OSF serait de l'ordre de 1 seconde par 17 minutes de téléchargement, ce qui devrait constituer une nuisance négligeable pour l'utilisateur.

[59] Fsona (2002), "*DSL Backhaul*", application brief

3.3 Modélisation



L'objectif de ce modèle est d'analyser et de prédire comment les variables d'environnement influencent la possibilité d'implémenter la connexion CO-DSLAM par OSF. Après l'introduction des variables caractérisant un environnement quelconque, le modèle tient compte de paramètres et de contraintes imposés par la nature du service offert pour estimer si l'optique sans fil est ou n'est pas adéquat dans cet environnemnt.

Nous posons l'hypothèse que les zones de portée d'un DSLAM ont la forme de cercles dont le DSLAM est au centre. Au Central office, desservi par la fibre, se trouve également un DSLAM qui satisfait des utilisateurs situés dans la zone représentée par le cercle vert. Le principe du modèle est de calculer, en fonction de l'environnement, le rayon R des zones de portée des DSLAM. Ceci permet de calculer la portée requise du lien OSF, les besoins d'immeubles surélevés par km² et le coût de la couverture au km² et donc de juger la possibilité d'implémentation de la connexion par OSF.

Nous commencerons par décrire les variables d'environnement, les paramètres et les contraintes intervenant dans le modèle tout en leur attribuant des valeurs. Ensuite, nous décrirons en détail le fonctionnement du modèle avant d'en dévoiler les résultats.

3.3.1 VARIABLES D'ENVIRONNEMENT

a) Densité d'utilisateurs

La première variable influençant le rayon R est la densité d'utilisateurs xDSL par km². En effet, au plus ce nombre est élevé, au plus la zone desservie par un DSLAM devra être petite étant donné que celui-ci ne peut satisfaire qu'un nombre limité de clients. Pour fournir des ordres de grandeur à cette variable, nous utiliserons l'exemple de la Belgique.

- Pour les services ADSL, l'ISPA, l'association belge des fournisseurs d'accès, publie tous les trimestres des études de marché sur les connexions Internet en Belgique. Selon ces études, la Belgique comptait, en décembre 2003, 980.756

connexions à large bande résidentielles[60]. D'autre part, il y avait à ce même moment 4.368.284 ménages en Belgique. Nous pouvons donc calculer un taux de pénétration des ménages de 22%. En connaissance de ce taux de pénétration moyen et grâce à des statistiques sur le nombre de ménages[61] par commune et la superficie[62] des communes de Belgique provenant de l'Institut National des Statistiques, nous pouvons calculer pour chaque commune le nombre moyen d'utilisateurs de connexions à large bande par km². Nous posons ici l'hypothèse que le taux de pénétration des ménages est identique dans chaque commune de Belgique.

- Pour les services VDSL, il existe peu de statistiques concernant la densité d'utilisateurs étant donné que ces services ne sont encore opérationnels que dans très peu de pays[63]. Nous pouvons cependant prévoir que, dans une phase initiale de déploiement, une fraction limitée des utilisateurs actuels de connexions à large bande fera appel à des services VDSL. Nous poserons donc l'hypothèse que la densité d'utilisateurs VDSL potentielle est égale à un dixième de celle des utilisateurs actuels de connexions à large bande.

Les communes avec la plus grande densité d'utilisateurs de connexions à large bande sont celles de Bruxelles avec plus de 2000 clients par km². Par contre, les communes les moins denses comptent moins de 10 clients de connexions à large bande par km². Le Tableau n°27 donne une idée de la répartition de la densité d'utilisateurs de connexions à large bande calculée dans les communes Belges selon les statistiques de l'INS et le taux de pénétration de 22%.

Tableau n°27: Répartition de la demande de connexions à large bande par km²

Densité d'utilisateurs par km²	Pourcentage des communes Belges
Plus de 1000	2 %
Plus de 200	7 %
Plus de 50	34 %
Plus de 30	54 %
Plus de10	85 %

b) Ligne de vue

Il est indispensable de tenir compte dans notre modèle de la possibilité offerte par la topologie de l'environnement d'implémenter une connexion en ligne de vue. Cette

[60] Internet Service Provider Association Belgium (2004), "*ISPA figures 2003*"

[61] Institut National des Statistiques (http://ecodata.mineco.fgov.be/mdf/Menages.jsp)

[62] Institut National des Statistiques (http://www.statbel.fgov.be/figures/dsp2003_fr.asp)

[63] Les seuls pays où les connexions VDSL sont relativement développées sont le Japon, la Corée et Hong Kong

variable est cruciale pour l'optique sans fil, car elle est indispensable à son implémentation. Elle est par contre très difficile à estimer de manière globale comme elle devrait être estimée au cas par cas. Nous avons cependant tenté de trouver un indicateur global permettant d'estimer la propension à obtenir des circonstances de ligne de vue adéquates pour chaque commune belge.

Nous supposerons que tous les liens OSF sont installés au sommet d'immeubles d'une certaine hauteur à partir desquels une ligne de vue est possible[64]. Dans cette optique, nous pourrons utiliser des statistiques provenant du cadastre belge qui répertorie les bâtiments inscrits selon leurs nombres d'étages. Nous avons ainsi pu obtenir, auprès de l'Institut National des Statistiques[65], pour chaque commune belge le nombre de bâtiments ayant plus de 5 étages. Supposons qu'un étage mesure environ 3 mètres de hauteur et que, pour calculer la hauteur approximative du dispositif optique potentiel, il faut encore y ajouter deux mètres pour le toit et le poteau sur lequel est monté ce dispositif. Selon ces hypothèses, un immeuble de plus de 5 étages devrait pouvoir élever le système OSF à environ 20 mètres (6 X 3 + 2).

Il serait toutefois incorrect de supposer que tous les immeubles de plus de 5 étages pourraient servir de support à un dispositif OSF. Tous ces immeubles ne disposent en effet pas nécessairement de ligne de vue et même si c'était le cas, il faudrait encore avoir l'autorisation du propriétaire pour avoir accès au toit. De plus, il ne suffit pas d'avoir un immeuble d'une certaine hauteur, mais il faut également que cet immeuble se situe à l'endroit désiré. C'est pourquoi nous supposerons que seul un immeuble de plus de 5 étages sur trois est adéquat pour l'implémentation d'un lien optique. Le Tableau n°28 donne une idée de la répartition des points élevés adéquats par km² calculés selon les hypothèses précédentes, dans les communes belges.

Tableau n°28: Répartition de points élevés adéquats par km² en Belgique

Immeubles adéquats par km²	Pourcentage des communes belges
Plus de 10 par km²	2 %
Plus de 1 par km²	6 %
Plus de 1 par 10 km²	22 %
Plus de 1 par 20 km²	29 %
Plus de 1 par 50 km²	44 %

[64] D'autres supports pourraient être envisagés, comme par exemple, des pylônes de lignes à haute tension, mais ceux-ci ne présentent pas une stabilité suffisante. De plus, ils se trouvent rarement dans les endroits densément peuplés où le besoin de liens OSF est le plus grand

[65] Institut National des Statistiques (http://ecodata.mineco.fgov.be/mdf/Cadastre.jsp)

3.3.2 PARAMETRES

a) Service offert

La bande passante requise pour le lien OSF par km² couvert ne dépendra pas seulement de la densité d'utilisateurs mais également du service que l'on offre à ces utilisateurs.

- Pour l'ADSL, nous supposerons que nous offrons le même service que celui offert par la plupart des opérateurs ADSL en Belgique, c'est-à-dire, 3 Mbps. Cette bande passante n'est évidemment jamais garantie et il est rare de l'atteindre. Cependant, les opérateurs ADSL se fixent souvent, ne fût-ce qu'implicitement, une bande passante minimale qui devrait être garantie, même lors des heures de pointe. Il est ressorti de discussions avec des professionnels que cette garantie se situe à environ 20% de la bande passante maximale. Dans notre modèle, cette dernière est fixée à 3 Mbps. La bande passante garantie sera donc supposée égale à 600 Kbps.

Tableau n°29: Hypothèses relatives aux services ADSL offerts par utilisateur

Bande passante reçue maximale	3000 Kbps
Bande passante reçue garantie	600 Kbps

- Pour les services VDSL, trois bandes passantes reçues sont prévues par le standard[66]: 13, 25 et 52 Mbps. Nous sélectionnerons un taux de transfert intermédiaire de 25 Mbps. Nous supposerons également que cette bande passante est garantie à 20 % (5 Mbps sont garantis).

Tableau n°30: Hypothèses relatives aux services VDSL offerts par utilisateur

Bande passante reçue maximale	25 Mbps
Bande passante reçue garantie	5 Mbps

b) Sur-souscription

Pour déterminer le nombre de clients pouvant être desservis par le même lien OSF, l'opérateur ne se contentera pas de diviser la bande passante du lien par la bande passante maximale vendue aux utilisateurs. Il peut en effet augmenter fortement le nombre de clients par lien OSF en permettant à la bande passante des clients de descendre en-dessous de la bande passante reçue maximale lors des heures de pointe.

[66] DSL Forum (2001), *"VDSL tutorial, Fiber-Copper access to the information highway"*

La seule limite consiste alors à vérifier que la bande passante minimale soit garantie pendant l'heure de pointe. De plus, à l'heure de pointe, il n'arrive jamais que tous les abonnés utilisent simultanément la bande passante. Ils ne seront en effet jamais tous connectés simultanément et, lorsqu'ils le sont, ils ne reçoivent pas des données en permanence[67].

- Pour les services ADSL, nous nous baserons sur un article[68] écrit en 2000 par Tom Mitchell sur xchangemag.com, dans lequel l'auteur considère que maximum 20% des clients ADSL utilisent simultanément de la bande passante en heures de pointe. Cependant, en raison du développement important d'applications Internet friandes en bande passante telles que le Peer-to-peer et le audio- ou vidéo- streaming, nous supposerons un chiffre de 25%. L'opérateur ne devra alors prévoir que 25% de 600 Kbps, soit 150 Kbps par utilisateur. Alors que l'on vend au client une connexion à 3 Mbps, on ne lui prévoit que 150 Kbps, ce qui correspond à un ratio de sur-souscription de 20 (3000/150).

Tableau n°31: Hypothèses relatives à la sur-souscription ADSL

Pourcentage d'utilisation simultanée en heure de pointe	25 %
Ratio de Sur-souscription	20

- Pour les services VDSL, lorsque un utilisateur regarde de la vidéo à la demande, une bande passante élevée est requise en permanence tout au long de l'émission. L'utilisation simultanée en heures de pointe sera donc plus élevée. Nous supposerons qu'un tiers des abonnés utilisent simultanément la bande passante. Sur les 5 Mbps garantis, on ne devra alors plus prévoir que 1,66 Mbps par utilisateur, ce qui correspond à un ratio de sur-souscription de 15 (25/1,66).

Tableau n°32: Hypothèses relatives à la sur-souscription VDSL

Pourcentage d'utilisation simultanée en heure de pointe	33 %
Ratio de Sur-souscription	15

[67] Pappalardo D. (mai 2000), "DSL oversubscription", nwfusion.com
[68] Mitchell T. (avril 2000), *"Avoiding the Pitfalls of Oversubscription in DSL Networks"*, xchangemag.com

c) Croissance future

Lors de la planification du réseau xDSL, il faut également tenir compte de la croissance future de la demande. Il serait absurde d'installer un réseau qui ne pourrait répondre aux besoins de bande passante que pendant une année.

- Réseaux ADSL: Les statistiques de l'ISPA témoignent d'une forte croissance annuelle des connexions résidentielles à large bande en Belgique[69]. Ces données sont reprises dans le Tableau n°33, ainsi que les prévisions jusqu'en 2007.

  Tableau n°33: Croissance du nombre de connexions haut débit résidentielles en Belgique de 2001 à 2003 et estimations jusqu'à 2007.

2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
189 %	91 %	46 %	*30 %*	*20 %*	*15 %*	*10 %*

  Nous constatons que la croissance des connexions haut débit résidentielles est forte mais qu'elle diminue d'année en année jusqu'en 2003. Le taux de pénétration actuel des ménages est de 22%. Le nombre de connexions résidentielles peut donc continuer à croître. Nous supposerons cependant que cette croissance continue à diminuer. En supposant les taux de croissance tels qu'ils apparaissent dans le tableau n°33, nous obtenons un taux de pénétration de 44% en 2007, ce qui semble réaliste étant donné qu'une famille belge sur deux possède actuellement un ordinateur[70]. Notons que ce taux d'équipement des ménages pourrait encore augmenter jusqu'en 2007.

  Nous avons vu que la période d'amortissement d'un dispositif OSF est d'environ 4 ans. Au terme de cette période, il est donc possible de remplacer le système par un système de bande passante supérieure. Si nous tenons compte des taux de croissance supposés jusqu'à 2007, nous devrions donc prévoir un surplus de bande passante d'environ 100%.

- Pour les réseaux VDSL, nous avons supposé une pénétration initiale relativement faible (un dixième des utilisateurs de connexions à large bande) et devons donc compter sur une croissance future plus importante. Prévoyons donc un surplus de bande passante de 200%, ce qui correspond à une augmentation à 3 sur 10 en quatre ans de la proportion d'abonnés VDSL par abonnés ADSL actuels.

[69] Internet Service Provider Association Belgium (2004), "*ISPA figures 2003*"
[70] Internet Service Provider Association Belgium (2004), "*19ième étude de marché*"

d) Part de marché

Il est peu probable qu'un seul opérateur gagne toutes les parts de marché. C'est pourquoi nous supposerons une part de marché de 50% sur toute la Belgique, aussi bien pour les réseaux ADSL que pour les réseaux VDSL. Il faudra donc diviser par deux la densité d'utilisateurs au km².

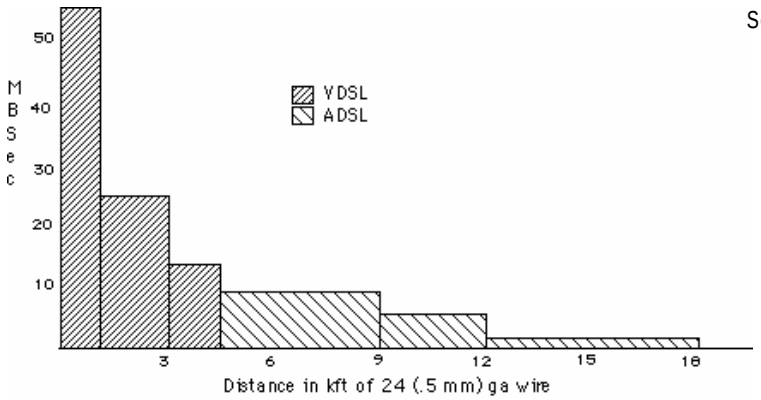
3.3.3 CONTRAINTES

a) Performances xDSL

La distance entre le DSLAM et le modem de l'utilisateur est limitée et cette distance maximale est inversement proportionnelle à la bande passante maximale promise par l'opérateur. La Figure n°23 représente la relation entre ces deux grandeurs.

Figure n°23: Relation entre la bande passante et la portée d'un DSLAM[71]

Source: DSLforum.org



- Réseaux ADSL: Nous avons ici choisi une bande passante maximale de 3 Mbps, ce qui limite la portée d'un DSLAM à environ 4 kilomètres[72]. Dans notre modèle ADSL, l'éloignement entre le DSLAM et l'utilisateur ne pourra donc pas dépasser cette distance.
- Réseaux VDSL: Nous avons choisi une bande passante maximale de 25 Mbps, ce qui limite la portée d'un DSLAM à environ 1 Kilomètre. Dans notre modèle VDSL, l'éloignement entre le DSLAM et l'utilisateur ne pourra donc pas dépasser cette distance.

b) Performances OSF

Nous imposerons que la portée des dispositifs OSF reste dans des valeurs que non seulement, la technologie OSF est capable d'atteindre, mais également pour lesquelles elle est compétitive par rapport aux technologie hertziennes. De plus, nous considérerons qu'il existe des licences en 60 GHz et que l'opérateur utilise des

[71] DSL Forum (2001), "VDSL tutorial, Fiber-Copper access to the information highway"

[72] Broadband access platforms for the mass market, Stagg Newman, Avril 2002

fréquences avec licences inférieures à 20 GHz pour les bandes passantes de 10 à 155 Mbps, ce qui maximise les situations dans lesquelles l'OSF est compétitif. Le Tableau n°34 synthétise les portées compétitives pour chaque bande passante, telles que définies à la fin du deuxième chapitre.

Tableau n° 34: portées maximales de compétitivité de l'OSF (99,9% de disponibilité)

BANDE PASSANTE	PORTEE COMPETITIVE
10 Mbps	4000 m
50 Mbps	2500 m
155 Mbps	2000 m
622 Mbps	2300 m
1250 Mbps	1500 m
2500 Mbps	800 m

Source : estimations à partir de la figure n°17

c) Rentabilité

Lorsque des dispositifs de plusieurs bandes passantes peuvent être implémentés, nous veillerons à minimiser les coûts en choisissant celui qui présente le plus faible coût annuel équivalent, tel qu'il est calculé dans le chapitre 2.

3.4 Fonctionnement du modèle xDSL

Lorsqu'on lui fournit des variables d'environnement, le modèle analyse la possibilité d'implémentation des dispositifs optiques de bande passante de 10 à 2500 Mbps. Si plusieurs dispositifs peuvent être implémentés, il choisit celui qui présente le coût le plus faible par utilisateur et par an.

Nous utilisons deux variables caractérisant l'environnement: le nombre de clients par km² ajusté pour une part de marché de 50% et le nombre d'immeubles adéquats par km² (représentant un tiers des immeubles de plus de 5 étages). Pour chaque bande passante de 10 à 2500 Mbps, le modèle tient compte de la croissance future de la demande et de la sur-souscription permise pour calculer le nombre de clients pouvant être desservis par le lien et donc, en connaissant la densité de clients par km², le rayon maximal de la zone desservie par un lien. Lors de la détermination de ce rayon, le modèle devra également veiller à ce qu'il demeure inférieur à la distance maximale entre le DSLAM et l'utilisateur.
Le rayon de la zone de portée étant déterminé, le modèle peut calculer le nombre de zones et donc le nombre de liens par km² ainsi que la portée requise pour un lien reliant entre elles deux zones.

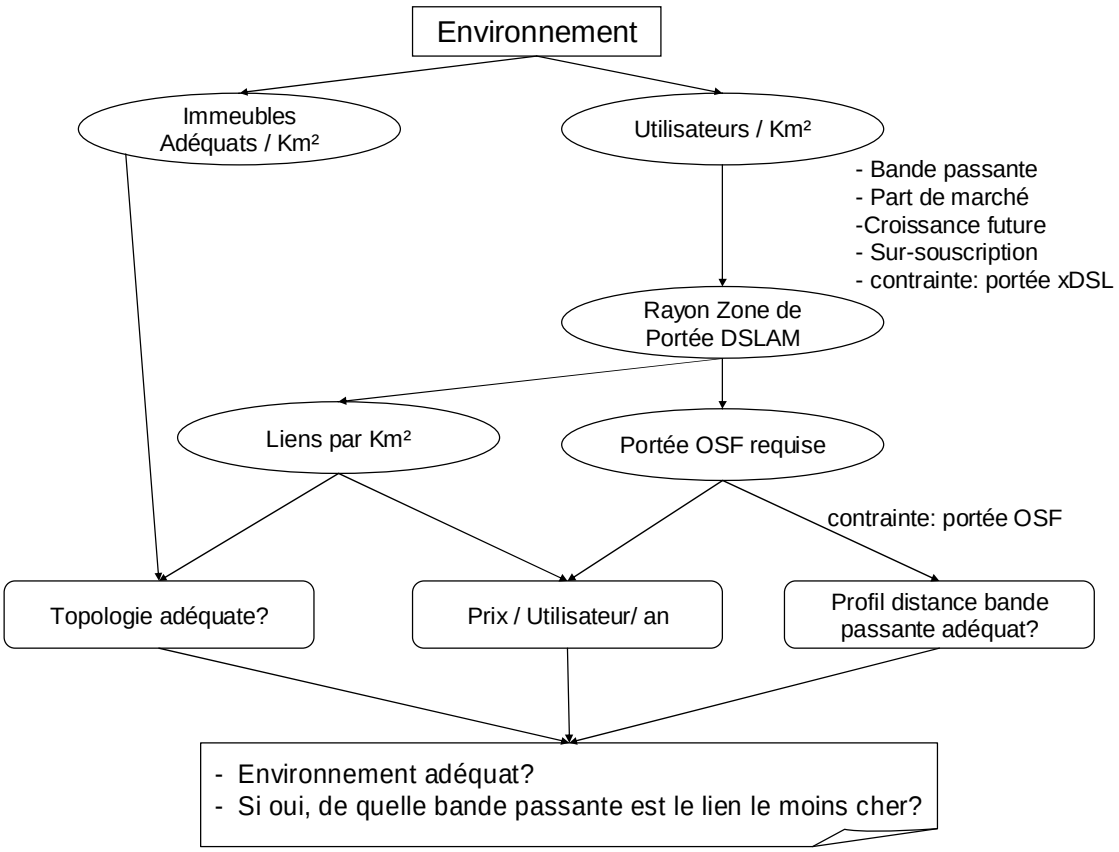
Le modèle effectue ensuite les opérations suivantes:

- Il compare, pour les dispositifs de chaque bande passante, la portée requise du lien à sa portée maximale de compétitivité et en déduit si l'environnement est adéquat du point de vue des performances "distance-bande passante".
- Il compare, pour les dispositifs de chaque bande passante, le nombre de liens requis par km² au nombre d'immeubles adéquats disponibles par km² et en déduit si l'environnement est adéquat du point de vue de la topologie
- Il calcule, pour les dispositifs de chaque bande passante, le coût de revient par utilisateur et par an

Ces opérations effectuées, le modèle peut déterminer les liens éventuellement adéquats à l'environnement et choisir parmi eux celui qui présente le coût le moins cher par utilisateur et par an.

Le fonctionnement du modèle xDSL est expliqué en détail dans l'annexe n°4

Figure n°24: Architecture du modèle



Source : Valentin Bauwens

3.5 Résultats du modèle ADSL

Afin de donner des ordres de grandeur pour l'étendue des circonstances dans lesquelles les liens OSF sont adéquats pour supporter la connexion entre le Central Office et un DSLAM d'un réseau ADSL, nous fournissons au modèle des données d'environnement propres à la Belgique. L'objectif n'est donc pas d'analyser la Belgique en particulier, mais nous nous y intéresserons en tant qu'illustration en ce qui concerne les facteurs d'environnement influençant l'implémentation de systèmes OSF. Ceci nous permettra d'observer la manière dont l'environnement agit sur la possibilité d'utiliser l'OSF dans un réseau ADSL.

Les données fournies au modèle ainsi que les résultats ADSL par commune sont disponibles respectivement en Annexe n°5 et n°6.

Nous commencerons par analyser séparément les résultats du modèle pour les conditions de profil "distance-bande passante" adéquat, de topologie adéquate et de minimisation des coûts. Nous étudierons ensuite les résultats globaux prenant en compte l'ensemble des critères et observerons la répartition géographique des communes adéquates.

a) Condition de profil "distance-bande passante" adéquat

L'utilisation d'un lien OSF entre le CO et le DSLAM d'un réseau ADSL requiert une densité d'utilisateurs minimale. Si cette densité n'est pas atteinte, pour ne pas être en sous capacité, le lien optique devra desservir une zone trop étendue et la longueur requise du lien sera au-dessus de sa portée. Le Tableau n°35 donne les densités d'abonnés minimales calculées pour des dispositifs de chaque bande passante OSF ainsi que le nombre de communes belges qui remplissent ce critère en supposant une part de marché de 50 %. Notons qu'il y a 589 communes en Belgique.

Tableau n°35: Densité d'utilisateurs effective minimale en fonction de la bande passante et communes adéquates du point de vue de ce critère

BANDE PASSANTE	DENSITE D'UTILISATEURS MINIMALE	COMMUNES ADEQUATES (50% part de marché)
10 Mbps	4 Utilisateurs / km²	519
50 Mbps	43 Utilisateurs / km²	78
155 Mbps	252 Utilisateurs / km²	14
622 Mbps	818 Utilisateurs / km²	2
1250 Mbps	3352 Utilisateurs / km²	0
2500 Mbps	26.816 Utilisateurs / km²	0

Source : calculs personnels

Comme les systèmes à 10 Mbps ont une portée relativement élevée de 4 km, ils n'ont besoin que de 4 abonnés par km², ce qui rend la plupart des communes Belges (519) adéquates en comptant sur une part de marché de 50%. L'utilisation de liens à 50 Mbps nécessite dix fois plus d'abonnés au km², d'une part à cause d'une bande passante plus élevée, mais également en raison d'une portée compétitive de seulement 2,5 kilomètres. Le nombre de communes adéquates est réduit à 78. Ce nombre diminue encore à 14 et 2 respectivement pour les bandes passantes de 155 et 622 Mbps. Au-delà de 622 Mbps, la densité d'utilisateurs requise est trop élevée et aucune commune ne se prête à l'implémentation d'OSF, même pour une part de marché de 100%, la commune la plus dense regroupant un peu plus de 2000 utilisateurs potentiels par km².

b) Conditions de ligne de vue

En fonction de la bande passante et de la densité d'utilisateurs, le modèle calcule le nombre de liens requis par km² desservi. Pour que les conditions de ligne de vue soient remplies, il faut qu'il y ait au moins le même nombre d'immeubles adéquats par km².

Pour une même densité d'utilisateurs, si on utilise des dispositifs OSF de plus faible bande passante, on aura besoin d'un plus grand nombre de liens par km². Or, le nombre d'immeubles adéquats de hauteur suffisante est limité. Cette contrainte jouera donc en faveur des dispositifs de bandes passantes élevées. Le tableau n°36 illustre ce phénomène pour la Belgique. Il donne le nombre de communes adéquates du point de vue de la topologie en ne tenant pas compte de la contrainte de portée limitée des dispositifs OSF précédemment étudiée.

Tableau n°36: Communes Belges adéquates du point de vue de la topologie

BANDE PASSANTE	COMMUNESE ADEQUATES
10 Mbps	24 communes
50 Mbps	110 communes
155 Mbps	222 communes
622 Mbps	260 communes
1250 Mbps	260 communes
2500 Mbps	260 communes

Source : calculs personnels

Pour les bandes passantes supérieures à 155 Mbps, le nombre de communes adéquates est de 260 et n'augmente plus. Cela provient du fait que près de la moitié des communes n'ont pas un seul immeuble adéquat. Seules 24 communes ont des densités d'immeubles adéquats suffisamment élevées pour permettre l'utilisation de liens optiques à 10 Mbps.

c) Minimisation des coûts

Lorsque des dispositifs de plusieurs bandes passantes sont adéquats dans le même environnement, le modèle choisit celui dont le coût par utilisateur et par an est le plus faible.

Lorsque des dispositifs de bandes passantes différentes peuvent être implémentés, pour une même densité d'utilisateurs, celui qui a la bande passante la plus élevée devra desservir un plus grand nombre d'utilisateurs sur une zone plus étendue, et devra donc avoir une portée plus élevée. Il devra donc souvent être d'une gamme supérieure. Le modèle devra donc choisir, par une minimisation des coûts, entre:

- (1) l'utilisation d'un certain nombre de dispositifs par km² de faible bande passante et de bas de gamme et
- (2) un nombre moins élevé de dispositifs par km² de bande passante élevée et de haute gamme.

Nous avons donc trois effets jouant sur les coûts:

- Effet du coût de la gamme: défavorable pour les dispositifs (2).
- Effet du coût de bande passante plus élevée par dispositif: défavorable pour les dispositifs (2).
- Effet du nombre plus élevé d'utilisateurs par dispositifs: défavorable pour les dispositifs (1).

En observant la figure n°15 à la fin du deuxième chapitre, représentant le coût annuel équivalent en fonction de bande passante et de la gamme, on constate qu'en passant à une bande passante supérieure, dans la même gamme, le coût annuel équivalent ne double jamais alors que la bande passante double toujours au moins. L'effet du coût de la bande passante plus élevée par dispositif est donc plus faible que l'effet du nombre plus élevé d'utilisateurs par dispositif. On peut parler d'économies d'échelle: Un dispositif de bande passante plus élevée procure un coût plus faible par Mbps.

Il reste encore à vérifier si les économies d'échelle ne sont pas compensées par l'effet du coût de la gamme. Les résultats du modèle montrent que ce n'est jamais le cas. Les économies d'échelle l'emportent toujours et il convient donc, dans tous les cas, de choisir le dispositif adéquat de la bande passante la plus élevée.

Le tableau n°37 montre le coût minimum moyen[73] calculé par le modèle par utilisateur et par an dans les communes belges adéquates en fonction de la bande passante.

Tableau n°37: Coûts moyens par utilisateur et par an et pourcentage du revenu par Utilisateur par An dans les communes belges en fonction de la bande passante

BANDE PASSANTE	Coûts moyens / Utilisateur / An	% revenu annuel (30 € / mois)	% revenu annuel (90 € / mois)
10	226 € / Utilisateur / An	63 %	21 %
50	62 € / Utilisateur / An	17 %	6 %
155	21 € / Utilisateur / An	6 %	2 %
622	9 € / Utilisateur / An	3 %	1 %
1250	/	/	/
2500	/	/	/

Source : calculs personnels

Nous constatons que le coût par utilisateur et par an diminue fortement lorsque l'on utilise des dispositifs de bandes passantes plus élevées. Les coûts par utilisateur sont en effet 25 fois plus faibles pour les dispositifs à 622 Mbps (9 € / an) que pour ceux à 10 Mbps (226 € / an).

Comparons à présent ces coûts avec les revenus qui pourraient être générés par les clients additionnels atteints grâce à L'OSF.

Selon un comparatif des tarifs ADSL belges effectué par le site www.adsl.be, disponible en annexe n°8, les connexions ADSL les moins chères à 3 Mbps coûtent un peu plus que 30 € par mois.

Par contre, une étude effectuée par l'entreprise de consultance Quantum-Web en mars 2004 auprès de 83 opérateurs dans 23 pays d'Europe a constaté un prix moyen de 74,61 € par mois pour une connexion à 512 Kbps[74]. Ceci confirme le communiqué de presse[75] de l'ISPA pour l'étude de marché du dernier trimestre de 2003 selon lequel la Belgique présente un excellent niveau performance/prix au niveau des offres ADSL. Les prix européens moyens pour les autres bandes passantes ne sont pas disponibles, mais supposons qu'il soit de 90 € pour un service à 3 Mbps. Le tableau n°37 montre les fractions du revenu annuel auxquelles correspondent les coûts induits par l'implémentation de dispositifs OSF par rapport aux revenus générés par des tarifs mensuels de 30 et de 90 €. Cette fraction ne dépasse jamais 25%, sauf pour le dispositif à 10 Mbps dans le cas d'un tarif mensuel de 30 € où elle atteint 63 %.

Résultats globaux

[73] La moyenne pour chaque type de dispositif, des coûts minimisés lorsque le dispositif est le moins cher dans une commune globalement adéquate.
[74] Warwick M. (mars 2004), "*Report reveals European broadband still expensive*", telecomtv.com
[75] Internet Service Provider Association Belgium (2004), "*19ième étude de marché*"

Nous regardons ensuite dans quelles communes la portée requise des dispositifs et la topologie de l'environnement sont simultanément adéquates et sélectionnons pour chacune d'elles le dispositif le moins cher par utilisateur. Les résultats globaux du modèle par commune sont disponibles dans l'annexe n°6. Regardons maintenant comment interagissent les facteurs de portée et de topologie adéquate.

Tableau n°38: Communes adéquates selon les critères

BANDE PASSANTE	COMMUNES ADEQUATES (Portée)	COMMUNES ADEQUATES (Topologie)	COMMUNES ADEQUATES (Portée & Topologie)
10 Mbps	519	24	24
50 Mbps	78	110	54
155 Mbps	14	222	14
622 Mbps	2	260	2
1250 Mbps	0	260	0
2500 Mbps	0	260	0

Source : calculs personnels

Nous avons deux facteurs restrictifs: la portée limitée des dispositifs OSF, qui disqualifie plus de communes pour les dispositifs de bandes passantes plus élevées, et le manque de bâtiments de hauteur adéquate, qui disqualifie plus lorsque les dispositifs ont une bande passante faible. Pour les bandes passantes supérieures ou égales à 155 Mbps, le facteur le plus restrictif est la portée limitée des dispositifs OSF. Pour une bande passante de 50 Mbps, les facteurs restrictifs s'équilibrent et pour celle 10 Mbps, le facteur le plus restrictif est le manque de bâtiments de hauteur adéquate.

Tableau n°39: Nombre de communes où les dispositifs sont sélectionnés [76]

BANDE PASSANTE	Dispositif le moins cher	COUT MOYEN/ UTILISATEUR/AN
10 Mbps	7 communes	226 €
50 Mbps	40 communes	62 €
155 Mbps	12 communes	21 €
622 Mbps	2 communes	9 €
1250 Mbps	0 communes	/
2500 Mbps	0 communes	/
TOTAL	61 communes	

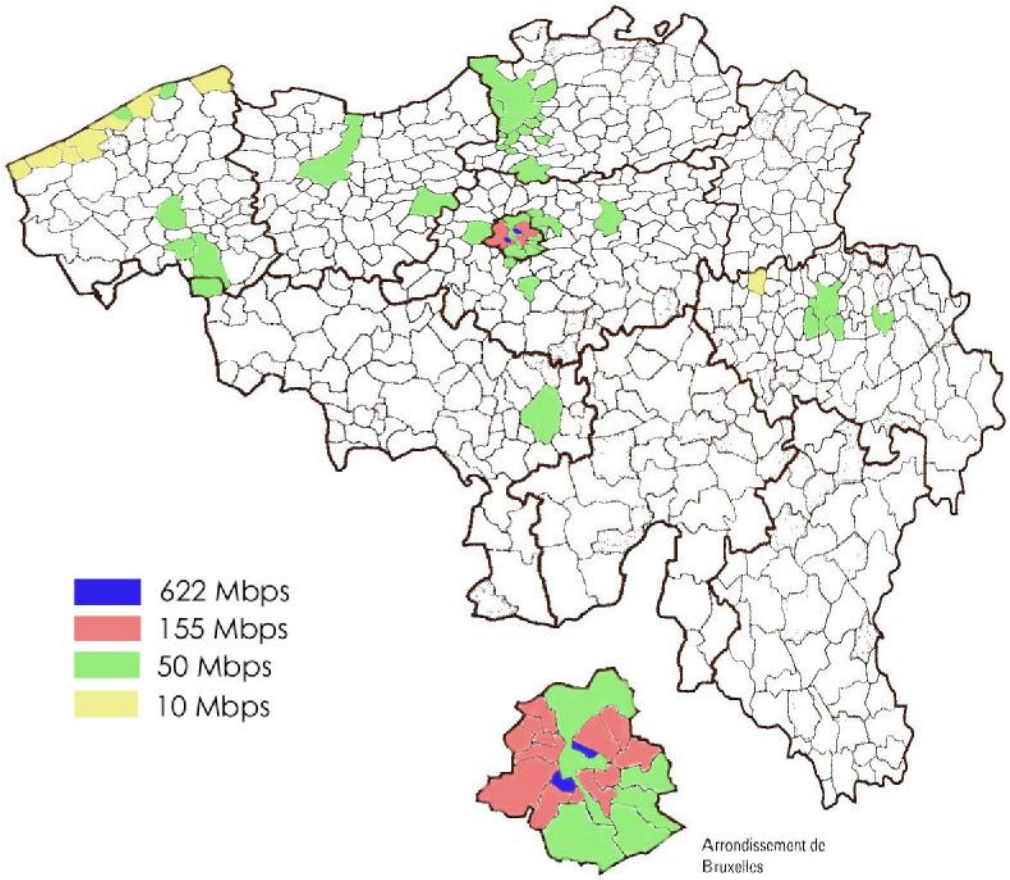
Source : calculs personnels

Lorsque l'on combine ces deux facteurs et que l'on choisit le dispositif le moins coûteux au km² par commune, il ne reste plus que 61 communes sur les 589 communes de Belgique où l'OSF est implémentable. Les résultats sont représentés dans le tableau n°39. Sur ces 61 communes, deux tiers utilisent des dispositifs à 50 Mbps. Seulement 2 communes (Saint-Gilles et Saint-Josse-ten-Noode) utilisent des dispositifs à 622 Mbps et le reste des communes utilisent des dispositifs à 10 et 155 Mbps.

[76] Les différences entre les tableaux n°38 et n°39 résultent du fait que le tableau n°38 montre le nombre de communes dans lesquelles les dispositifs sont adéquats alors que le tableau n°39 montre le nombre de communes dans lesquelles les dispositifs sont adéquats ET où ils sont les moins chers.

Inspectons maintenant leur disposition géographique. La Figure n°25 représente une carte de Belgique où les communes sélectionnées ont été coloriées.

Figure n°25: Répartition géographique des communes adéquates



Source : Valentin Bauwens

Nous pouvons faire les observations suivantes:

- Les communes adéquates coïncident essentiellement avec les zones urbaines les plus denses: Bruxelles, Anvers, Liège, Charleroi, Bruges et Courtrai. Nous pouvons donc conclure que l'utilisation de l'OSF dans les réseaux ADSL devrait être limitée aux endroits les plus densément peuplés.

- Les dispositifs OSF de 155 et 622 Mbps ne sont utilisables qu'à Bruxelles et ceux à 622 ne le sont que dans deux communes de Bruxelles. Nous en déduisons que ces dispositifs pourraient être utilisés dans des réseaux ADSL uniquement dans des métropoles comparables.

- Les dispositifs à 10 Mbps sont presque uniquement sélectionnés dans des communes de la Mer du Nord. Cela pourrait être expliqué par le fait que, dans toutes les autres communes où la densité d'utilisateurs est adéquate pour utiliser des liens OSF à 10 Mbps, il n'y a pas suffisamment d'immeubles

adéquats. Les communes du bord de mer ont en effet une densité d'immeubles adéquats plus grande par rapport à leur densité de ménages. Les nombreux buildings sur la digue pourraient être à l'origine de ces chiffres exceptionnels.

d) Conclusion ADSL

L'analyse de la structure des réseaux ADSL nous a amené à sélectionner la connexion entre le Central Office et le DSLAM comme susceptible d'être compatible avec les technologies OSF.

La modélisation des besoins de la connexion CO-DSLAM en terme de distance et de bande passante nous a permis de tester la sensibilité de son adéquation avec les technologies OSF par rapport à deux variables d'environnement cruciales: la densité d'utilisateurs potentiels et d'immeubles élevés. Cette étude a été réalisée sur l'environnement belge.

Nous avons observé que l'utilisation de liens optiques requiert une densité d'utilisateurs minimale qui dépend de la bande passante du lien. Cette densité n'est que de 4 utilisateurs par km² pour les dispositifs à 10 Mbps et de 818 utilisateurs par km² pour les dispositifs à 622 Mbps. Les dispositifs de bande passante supérieure requièrent des densités d'utilisateurs telles qu'ils ne sont pas implémentables en Belgique. En ce qui concerne le critère de densité suffisante d'immeubles élevés, son effet restrictif est surtout marqué pour les dispositifs à 10 Mbps. D'autre part, la volonté de minimiser les coûts par abonné nous mènera à sélectionner les dispositifs de bande passante plus élevée.

En combinant ces facteurs nous observons que, pour la Belgique, l'utilisation de l'OSF entre le CO et le DSLAM d'un réseau ADSL se limite aux communes les plus urbanisées. Le lien convenant au plus de communes est celui à 50 Mbps, les bandes passantes supérieures de 155 et 622 Mbps n'étant utilisées qu'à Bruxelles et le lien à 10 Mbps étant réservé à des situations particulières.

Le coût moyen par utilisateur et par an varie entre 9 euros pour les dispositifs à 622 Mbps et 226 euros pour les dispositifs à 10 Mbps. Pour les systèmes les plus fréquemment adéquats à 50 Mbps, ce coût est de 62 euros. Lorsque l'on compare ces frais aux revenus par utilisateur, on constate qu'ils peuvent en constituer une fraction non négligeable, surtout lorsque l'on utilise des dispositifs de bande passante faible dans des situations où, comme en Belgique, il existe une concurrence sur les prix. En effet, le dispositif le plus fréquemment adéquat à 50 Mbps engendre des

coûts équivalents à 17 % des revenus lorsque ceux-ci sont de 30 euros par utilisateur et par mois et de 6% lorsqu'ils sont de 90 euros. Cette fraction devrait être comparée de façon détaillée aux autres coûts encourus par les opérateurs. Cependant, pour des raisons de confidentialité, il est assez difficile d'obtenir des informations précises concernant la répartition des coûts des opérateurs ADSL. Un professionnel du secteur a pourtant accepté de commenter nos résultats. Selon celui-ci, les chiffres calculés semblent relativement élevés et ne pourraient dépasser les 10% du revenu pour la connexion entre le CO et le DLSAM. Ceci disqualifierait le système le plus fréquemment adéquat à 50 Mbps lorsque le revenu mensuel par utilisateur n'est que de 30 €.

Tableau n°40: Récapitulatif des observations

Type de dispositif	Densité d'utilisateurs et d'immeubles élevés adéquate	Coûts par utilisateur par an
10 Mbps		Trop élevé
50 Mbps	Adéquat dans communes urbaines	Peut dépasser 15% des revenus si marges faibles
155 Mbps	Adéquat à Bruxelles	Moins de 10% des revenus
622 Mbps	Adéquat dans deux communes de Bruxelles uniquement	Moins de 5 % des revenus
1250 Mbps	Densité d'utilisateurs requise trop élevée	
2500 Mbps	Densité d'utilisateurs requise trop élevée	

Alors que les conditions pratiques d'implémentation proscrivent l'utilisation de liens OSF à 1250 et 2500 Mbps, la minimisation des coûts nous amène à éliminer le dispositif à 10 Mbps.

L'utilisation de modèles à 50 Mbps, sélectionnés dans 40 villes belges de taille moyenne, dont la densité d'utilisateurs est supérieure à 40 par km², reviendrait probablement trop chère lorsque les tarifs sont très concurrentiels comme en Belgique. Un revenu mensuel par abonné de l'ordre de 50€ serait nécessaire pour en garantir la rentabilité.

Les liens à 155 et 622 Mbps par contre, semblent pouvoir être utilisés de façon rentable. Leur utilisation est cependant limitée à 14 communes de Bruxelles présentant une densité d'utilisateurs supérieure à 250 par km².

Nous pouvons donc conclure que l'implémentation de liens OSF entre le CO et le DSLAM d'un réseau ADSL devrait être réservée aux grandes métropoles présentant des densités d'utilisateurs de l'ordre de 250 par km² pour que la rentabilité de l'installation soit garantie. La rentabilité de l'utilisation de liens à 50 Mbps dans des villes de dimension moyenne, dont la densité d'utilisateurs est supérieure à 40 par km², ne serait par contre pas garantie dans des conditions de forte compétitivité.

3.6 Résultats du modèle VDSL

Après avoir analysé en profondeur les conditions d'utilisation de systèmes OSF au sein d'un réseau ADSL, il serait intéressant de voir si cette technologie ne serait pas plus adéquate pour fournir des services VDSL à bande passante plus élevée. Nous avons en effet pu observer que la technologie OSF est particulièrement concurrentielle pour des liens à bandes passantes élevées et que des économies d'échelle substantielles peuvent être réalisées. Voyons donc comment l'adéquation des systèmes OSF dans un réseau VDSL est influencée par les contraintes étudiées. Remarquons que nous pouvons directement exclure le dispositif à 10 Mbps car il ne permet pas d'atteindre les 25 Mbps promis par l'opérateur VDSL. Les résultats du modèle VDSL sont disponibles dans l'annexe n°7.

a) Condition de profil "distance-bande passante" adéquat

Le tableau n°41 montre le nombre de communes adéquates en ce qui concerne la densité d'utilisateurs pour les dispositifs de bandes passantes différentes. Le résultat diffère fortement de celui obtenu pour les réseaux ADSL où le nombre de communes adéquates était monotone décroissant en fonction de la bande passante des dispositifs. Nous observons pour les réseaux VDSL que toutes les communes sont adéquates pour les dispositifs à 50 et 622 Mbps, que seulement 21 communes sont adéquates pour les dispositifs à 155 Mbps et qu'aucune commune ne convient pour les autres dispositifs.

Tableau n°41: Portée compétitive et communes adéquates du point de vue de la densité d'utilisateurs en fonction de la bande passante

BANDE PASSANTE	PORTEE COMPETITIVE OSF	COMMUNES ADEQUATES (50% part de marché)
50 Mbps	2500 m	589
155 Mbps	2000 m	21
622 Mbps	2300 m	589
1250 Mbps	1500 m	0
2500 Mbps	800 m	0

Source : calculs personnels

Afin d'expliquer ces résultats particuliers, il est nécessaire de bien comprendre le fonctionnement de notre modèle. Lorsque celui-ci détermine le rayon requis pour la zone de portée d'un DSLAM, il compare deux rayons:

- Celui qui permet de remplir la capacité du dispositif OSF en fonction de la densité d'utilisateurs
- Le rayon maximal imposé par les limites de la technologie xDSL, càd la distance maximale entre le DSLAM et l'utilisateur.

Le modèle choisit ensuite le plus petit des deux comme rayon requis et vérifie si la distance entre deux DSLAM qui en résulte est compatible avec la portée compétitive du dispositif OSF.

Les résultats obtenus peuvent être expliqués par la combinaison de deux facteurs:

- La technologie VDSL ne peut qu'atteindre des clients situés à moins d'un kilomètre du DSLAM
- Nous avons supposé une densité d'utilisateurs VDSL plus faible que celle des utilisateurs ADSL.

Il en résulte que le rayon nécessaire à remplir la capacité du DSLAM est presque toujours supérieur à celui imposé par les limites de la technologies VDSL. Le rayon déterminé par le modèle pour la zone de portée du DSLAM sera donc toujours environ d'un kilomètre et la distance requise entre deux DSLAM environ de deux kilomètres. Comparons cette distance de deux kilomètres aux portées compétitives[77] des dispositifs OSF également mentionnées dans le tableau n°41. Pour les dispositifs dont la portée compétitive est supérieure à 2000 mètres, toutes les communes conviennent et pour ceux dont la portée compétitive est inférieure à cette distance, aucune commune ne convient. Le dispositif à 155 Mbps, qui présente une portée compétitive de 2000 mètres, n'est adéquat que pour quelques communes parmi les plus denses.

b) Conditions de ligne de vue

Le Tableau n°42 montre le nombre de communes adéquates du point de vue de la topologie pour les dispositifs de bandes passantes différentes. Nous observons que presque tous les dispositifs sont adéquats dans 55 communes. La raison de ce résultat particulier est la même que celle expliquée précédemment. Comme la distance requise entre deux DSLAM est presque toujours égale à environ deux kilomètres, la densité d'immeubles adéquats requise est presque toujours égale à environ 1 par 3 km². Il y a donc environ 55 communes belges ayant une densité d'immeubles adéquats supérieure à 1 par 3 km².

[77] Ces portées compétitives ne sont pas monotones décroissantes en fonction de la bande passante des dispositifs en raison d'un passage entre les dispositifs à 155 et 622 Mbps, d'une technologie à micro ondes à une technologie à ondes millimétriques

Tableau n°42: Communes belges adéquates du point de vue de la topologie

BANDE PASSANTE	COMMUNESE ADEQUATES
50 Mbps	48 communes
155 Mbps	55 communes
622 Mbps	55 communes
1250 Mbps	55 communes
2500 Mbps	55 communes

Source : calculs personnels

c) Minimisation des coûts

Le tableau n°43 représente les coûts moyens par utilisateur par an et par mois de l'emploi de technologies OSF entre le CO et le DSLAM dans un réseau VDSL.

Nous pouvons voir qu'il n'existe plus d'économies d'échelle lorsqu'on passe du modèle à 155 Mbps à celui à 622 Mbps. Les modèles à 622 Mbps fonctionnent en effet presque toujours en sous capacité, puisque la densité d'utilisateurs n'est pas suffisante et que la distance entre le DSLAM et un utilisateur est limitée à un kilomètre.

Tableau n°43: Coûts moyens par utilisateur par an et par mois en fonction de la bande passante

BANDE PASSANTE	Coûts moyens / Utilisateur / An	Coûts moyens / Utilisateur / mois
50	1431 €	119 €
155	488 €	41 €
622	535 €	46 €
1250	/	/
2500	/	/

Source : calculs personnels

Etant donné que seuls quelques opérateurs asiatiques offrent à ce jour des services VDSL expérimentaux, il est assez difficile d'estimer le prix que seraient prêts à payer les consommateurs. Les tarifs pratiqués par l'opérateur Japonais NTT[78] sont d'environ 21 euros[79] par mois pour un service à 25 Mbps. Notons que ce prix est seulement supérieur d'environ un euro à celui demandé pour un service ADSL classique chez ce même opérateur japonais. Nous ne pourrons pas utiliser ce tarif comme référence, puisqu'il est bien inférieur au prix demandé en moyenne en Europe pour une connexion ADSL. La différence de prix ADSL / VDSL pratiquée par NNT nous fournit cependant une information intéressante sur la plus-value apportée par une connexion VDSL par rapport à une connexion ADSL. Bien qu'une connexion VDSL soit environ 8 fois plus rapide, cela ne multiplie pas par 8 son utilité ou ses capacités de divertissement. A part la vidéo à la demande de qualité DVD, la plupart des applications multimédia envisageables sont actuellement supportées pas les

[78] http://www.ntt-east.co.jp/product_e/05/2.html
[79] 2888 Yen par mois, avec un taux de conversion de 135 Yen/Euro

connexions ADSL. C'est pourquoi nous estimerons le prix d'une connexion VDSL en Europe entre 50 et 110 euros par mois. Sous ces hypothèses, les coûts engendrés par l'utilisation de liens OSF varieraient entre 40 et 240 % des revenus. Ceci disqualifierait totalement l'utilisation des technologies OSF.

d) Conclusion VDSL

Bien qu'intuitivement, les connexions VDSL, comparables à des connexions ADSL à très haut débit, pourraient sembler plus adéquates pour être alimentées par des liens OSF, nous obtenons un résultat contraire.

Les points suivants différencient le plus les connexions VDSL par rapport aux connexions ADSL, telles que nous les avons paramétrées dans notre modèle:

- Une bande passante plus importante par utilisateur
- Une distance plus courte entre le DSLAM et l'utilisateur
- Une densité d'utilisateurs moindre

La distance plus courte entre le DSLAM et l'utilisateur implique de réduire la surface couverte par la zone de portée d'un DSLAM. La densité d'utilisateurs moindre, par contre, nécessiterait le contraire. Alors que les dispositifs de bande passante plus faible seraient capables, par leur portée, de desservir des zones permettant de remplir leur capacité, ils sont contraints de couvrir des surfaces plus faibles du fait de la distance limitée entre le DSLAM et l'utilisateur et donc de travailler en sous-capacité. En ce qui concerne les dipositifs de bande passante plus importante, ils sont également obligés de travailler en sous-capcité, comme leur portée ne leur permet même pas de desservir les zones de taille maximale.

De plus, la forte augmentation de bande passante requise par les services VDSL ne sera probablement pas accompagnée d'une augmentation équivalente des revenus, essentiellement en raison d'une valeur ajoutée limitée de la bande passante additionnelle.

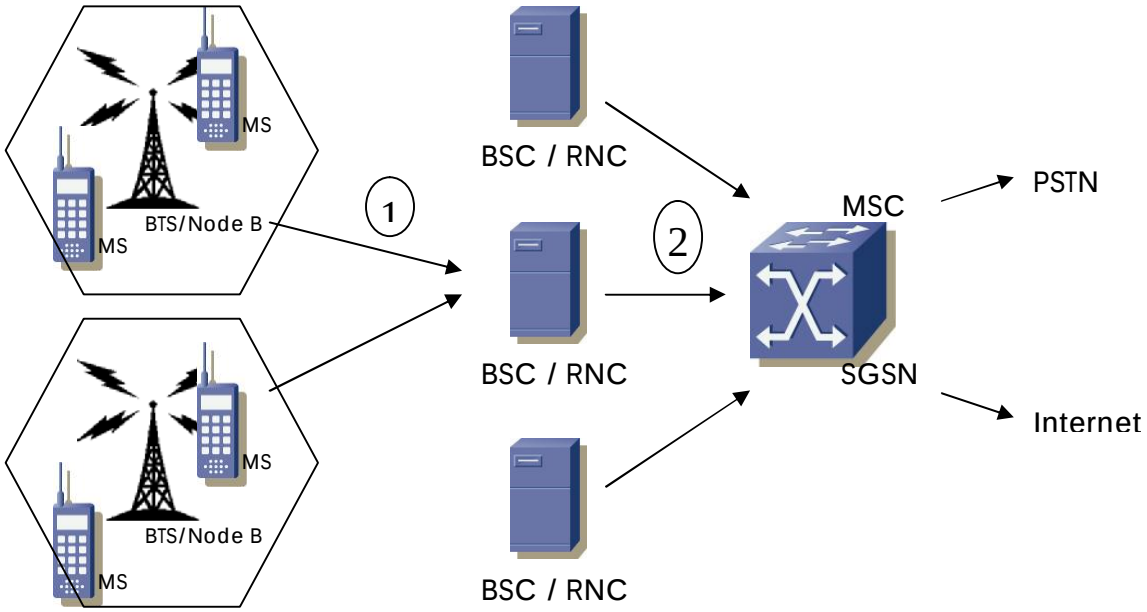
La combinaison de ces facteurs de sous-capacité et de réduction du revenu par Mbps offert entraîne une forte réduction de la rentabilité potentielle des connexions VDSL alimentées par OSF, ce qui nous pousse à prescrire cette solution.

Titre 4: Réseaux GSM/UMTS

4.1. Architecture d'un réseau GSM / UMTS

Le standard GSM (Global System for Mobile Communications) est un standard de communication européen pour les systèmes digitaux de radiocommunications mobiles. Il a été essentiellement conçu pour la transmission de conversations vocales. Le standard UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), est le successeur du standard GSM. Il a été étudié pour transmettre, outre la voix, des données à des bandes passantes pouvant atteindre 2 Mbps. En ce qui concerne le réseau d'accès hertzien, les deux types de réseaux sont structurés de la même manière. Ils sont représentés sur la figure n°27.

Figure n°27: Architecture d'un réseau GSM / UMTS



Source : Valentin Bauwens

Le terminal GSM ou UMTS, appelé Mobile Station (MS), communique par voie hertzienne avec une station fixe appelée Baste Transceiver Station (BTS) pour les réseaux GSM et Node B pour les réseaux UMTS. L'espace est ainsi réparti en cellules dépendant d'un BTS ou d'un Node B. Chaque station fixe est ensuite connectée à un contrôleur de stations fixes nommé Base Station Controller (BSC) pour les réseaux GSM et Radio Network Controller (RNC) pour les réseaux UMTS. Ce composant contrôle véritablement le réseau d'accès hertzien: il gère l'accès aux fréquences, dirige les transitions d'unités mobiles d'une cellule à l'autre et avertit les unités mobiles des appels entrants. Chaque BSC ou RNC gère de cette manière une fraction du réseau de l'opérateur. Selon les spécifications de contrôleurs de réseaux cellulaires

consultées[80], chaque contrôleur gérerait un maximum de 64 cellules. Ceci coïncide avec les ordres de grandeur mentionnés par un professionnel[81] selon lequel son réseau compterait environ 50 BSC pour 2000 BTS. Tous les BSC/RNC sont ensuite connectés avec un centre d'interconnexion mobile ou Mobile Switching Center (MSC) qui assure l'interconnexion avec le réseau téléphonique public (Public Switched Telephone Nework ou PSTN) ou d'autres MSC. Au même niveau que le MSC peut se trouver un Servicing GPRS Support Node ou SGSN qui assure la connexion avec le réseau Internet. Le MSC gère également des bases de données centrales comme celles où sont répertoriés les identités et positionnements actuels des utilisateurs du réseau.

4.2. Sélection d'une connexion adéquate pour l'OSF

Selon notre étude préalable des réseaux cellulaires, nous pouvons identifier deux types de connexions fortement répandues:

- Entre les stations fixes et les contrôleurs de stations fixes (1 sur Figure n°27)
- Entre les contrôleurs de stations fixes et le MSC / SGSN. (2 sur Figure n°27)

Nous pouvons certainement déjà exclure la connexion entre les contrôleurs de stations fixes et le MSC comme candidate à l'implémentation par optique sans fil pour des raisons de fiabilité. Cette connexion agrège en effet le trafic de plusieurs dizaines de stations de base et son disfonctionnement affecterait un nombre beaucoup trop élevé d'utilisateurs. Il ne serait donc pas raisonnable d'utiliser des liens optiques dont nous avons vu qu'ils présentent une disponibilité inférieure à celle des technologies filaires ou des lignes louées.

Pour la connexion entre les stations fixes et les contrôleurs de stations fixes, par contre, l'utilisation d'une connexion OSF est beaucoup moins risquée. Les utilisateurs de téléphonie mobile accepteraient en effet certainement les disfonctionnements induits par l'utilisation de l'OSF pendant seulement 8 heures[82] par an. D'autre part, les opérateurs de réseaux cellulaires sont rarement liés par des contrats leur imposant de garantir une certaine disponibilité.

Dans la suite de cette partie, nous étudierons les aspects pratiques de l'implémentation par OSF de la connexion entre les stations fixes et les contrôleurs de stations fixes des réseaux GSM et UMTS et tenterons de déterminer l'étendue des circonstances dans lesquelles cette implémentation est possible d'une part et économiquement justifiable d'autre part. Nous ne tiendrons pas compte des

[80] Samsung Digital (2003), "*SBSC-400 – Samsung base station controller*", Specification sheet
[81] Nicolas Parmentier, Belgacom
[82] En supposant que l'opérateur installe le lien OSF de façon à garantir une disponibilité de 99,9%

conditions de ligne de vue et de la topologie de l'environnement tel que nous l'avons fait lors de l'étude des réseaux ADSL étant donné qu'il est beaucoup plus difficile de déterminer un indicateur efficace permettant d'estimer la propension à obtenir des conditions de ligne de vue adéquates.

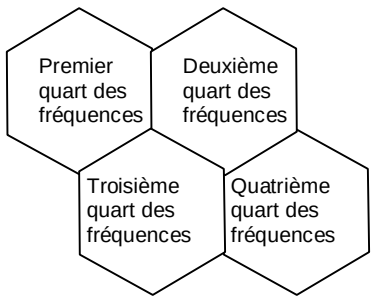
4.3. L'optique sans fil dans les réseaux GSM

Dans notre étude, nous supposerons que le réseau GSM transporte uniquement des conversations vocales. Le transport de données sera pris en compte lors de l'étude des réseaux UMTS.

Les stations fixes GSM peuvent avoir une portée d'une dizaine de kilomètres. Cependant, le facteur principal limitant la taille d'une cellule n'est pas la portée des stations fixes mais le nombre de canaux de fréquence dont dispose l'opérateur mobile. En effet, chaque canal permettant de satisfaire un certain nombre de conversations simultanées, le nombre de canaux disponibles détermine le nombre de conversations pouvant être simultanément gérées par cellule. C'est donc souvent la densité d'utilisateurs qui déterminera le rayon des cellules. D'autre part, pour des raisons d'interférences entre cellules, toutes les fréquences ne peuvent être utilisées dans toutes les cellules. L'opérateur va donc déterminer un canevas selon lequel il attribuera les fréquences aux cellules. Ce canevas comportera un certain nombre de cellules et chaque fréquence ne sera utilisée qu'une seule fois par canevas[83].

Nous supposerons par la suite, que l'opérateur mobile utilise un canevas de quatre cellules entre lesquelles les fréquences disponibles sont également réparties. La figure n°28 représente un tel canevas.

Figure n°28: Canevas cellulaire à 4 cellules



Source : Valentin Bauwens

Afin d'optimiser le ratio de réutilisation des fréquences par unité de surface sans augmenter les interférences entre cellules, les opérateurs utilisent souvent des

[83] Viinikainen A. (octobre 2003), "The cellulal concept – System design fundamentals"

antennes directionnelles qui permettent de segmenter les cellules en secteurs utilisant des fréquences différentes. Par la suite, nous supposerons que chaque cellule est découpée en trois secteurs parmi lesquels les fréquences de la cellule sont réparties de façon égale. Chaque canevas de cellules est donc réparti en 12 secteurs que partagent 4 cellules.

La bande de fréquence dont dispose un opérateur n'est pas illimitée. Celle-ci doit en effet être achetée auprès de l'organe régulateur des fréquences. En ce qui concerne les technologies GSM, deux bandes de fréquences peuvent être utilisées: une à 900 Mhz et l'autre à 1800 MHz[84]. Selon un professionnel de l'IBPT, l'organe belge régulateur des fréquences, il est de pratique courante chez les opérateurs d'acheter une douzaine[85] de MHz par bande de fréquence. Historiquement, ceux-ci ont commencé par utiliser les fréquences autour de 900 MHz pour ensuite passer en 1800 MHz lorsque leurs réseaux ont saturé.

Nous étudierons donc deux situations: celle d'un opérateur utilisant 12 MHz de fréquence dans la bande de 900 MHz et celle d'un opérateur utilisant 12 MHz dans la bande de 900 MHz et 12 autres MHz dans la bande de 1800 MHz. La technologie GSM utilisant 200 KHz par canal, 5 canaux peuvent être exploités par MHz. D'autre part, chaque canal peut gérer simultanément 8 communications et chaque communication demande une bande passante de 12 Kbps[86]. Notons également que même si un secteur peut théoriquement assurer un certain nombre de communications simultanées, ce chiffre ne sera jamais atteint en pratique. En effet, lorsqu'un canal se libère, il faudra toujours un certain temps avant qu'il soit à nouveau utilisé. Au plus l'opérateur désire réduire la probabilité qu'un appel soit refusé par manque de lignes disponibles, au plus il devra prévoir des lignes en excès de la demande, pour que quelques lignes soient libres à tout moment. Cette règle est formalisée par la loi de Erlang qui prédit la demande effective de communications simultanées pouvant être satisfaite à partir du nombre de lignes offertes et de la probabilité désirée qu'un appel soit refusé. Un graphique représentant cette loi est disponible en annexe n°10.

L'unité utilisée pour décrire la densité de la demande de communications simultanées est le Erlang/km². Il correspond au nombre d'heures de communications demandées pendant une certaine période de temps sur une surface de 1 km². Généralement les Erlang/km² sont exprimés sur une période d'une heure pendant l'heure de pointe.

[84] Aux Etats-Unis, une bande de fréquences autour de 1900 MHz est également utilisée
[85] Il s'agit en fait de 2 x 12 MHz, 12 MHz étant utilisés pour les communications du l'unité mobile vers l'unité fixe et les autres 12 MHz pour les communications de l'unité fixe vers l'unité mobile.
[86] Rysavy Research (novembre 2002), "*Data capabilities for GSM Evolution to UMTS*"

Les règles précédemment décrites nous permettent de calculer le nombre de communications pouvant être simultanément gérées par cellule et donc, en fonction de la densité de la demande de communications simultanées, le rayon maximal de cette cellule. Le Tableau n°47 montre les calculs effectués dans le cas d'un opérateur disposant de une et de deux bandes de fréquence de 12 MHz.

Tableau n°47: calcul du nombre de communications GSM simultanées

	12 MHz	2 x 12 MHz
Canaux	60 canaux	120 canaux
Canaux par cellule	15 canaux	30 canaux
Canaux par secteur	5 canaux	10 canaux
Appels théoriques par secteur	40 appels	80 appels
Appels effectifs par secteur selon la loi d'Erlang avec une probabilité de blocage de 1%	30 Erlang	65 Erlang
Erlang / Cellule	90 Erlang	195 Erlang
Mbps / Cellule	1,08 Mbps	2, 34 Mbps

Source : calculs personnels

Remarquons que la bande passante requise par cellule est largement inférieure à la capacité du lien optique de la bande passante la plus faible (10 Mbps).

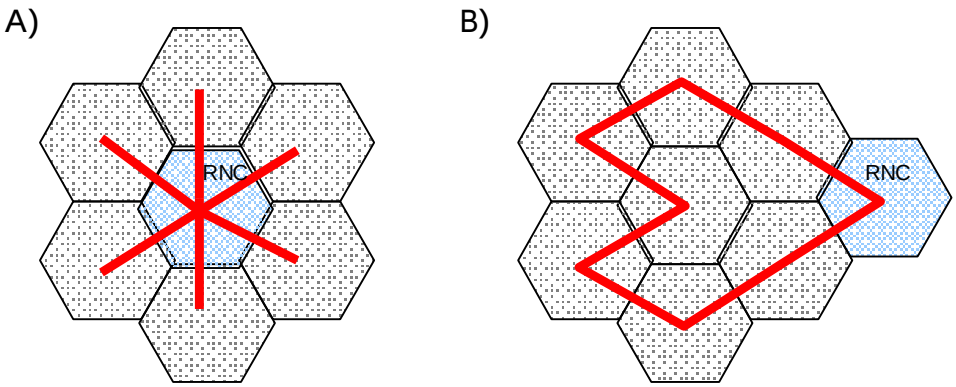
Selon un professionnel des télécoms[87], les opérateurs mobiles implémentent la plupart du temps les connexions entre les stations fixes et le contrôleur de stations fixes sous forme d'un réseau en étoile. Cela signifie que chaque station fixe dispose d'une connexion individuelle qui la relie au contrôleur de stations fixes. Pour cela ils utilisent généralement des lignes louées à quelques Mbps. La figure n°29 A) illustre cette situation.

L'utilisation de liens optiques de capacité beaucoup plus élevée nécessiterait de modifier l'organisation de ces connexions et de passer à une architecture en forme de boucle. La Figure n°29 B) illustre ce type d'architecture. Afin de ne pas complexifier nos calculs, nous poserons l'hypothèse que tous les liens faisant partie de la boucle offrent la même capacité[88]. La bande passante nécessaire pour les dispositifs d'une boucle serait alors égale à celle requise par cellule multipliée par le nombre de cellules desservies par la boucle. D'autre part, cette architecture en boucle permettrait d'atteindre des plus grandes distances à partir du contrôleur de stations fixes.

[87] Nicolas Parmentier, Belgacom

[88] Les liens optiques les plus éloignés du BSC pourraient avoir une capacité inférieure, mais ceci limiterait les capacités de redondance de la boucle.

Figure n°29: Réseaux en étoile et en boucle



Rappelons que le nombre maximal de stations fixes connectées à un même contrôleur de stations fixes est de 64. Nous avons calculé que les réseaux GSM à 12 et 24 MHz nécessitent une bande passante par cellule respective de 1,08 et 2,34 Mbps. Supposons que l'opérateur prévoit une bande passante plus grande par cellule pour tenir compte de la croissance future de la demande et qu'il prévoit 1,5 et 3 Mbps par cellule pour les réseaux à 12 et 24 MHz respectivement[89].

Ayant posé ces hypothèses, nous pouvons contrôler le nombre de cellules devant être desservies par la boucle optique pour que les dispositifs de cette boucle ne soient pas en sous capacité. Le tableau n°48 illustre ce nombre pour les dispositifs des différentes bandes passantes.

Tableau n°48: Cellules desservies par boucle en fonction de la bande passante des dispositifs OSF utilisés dans cette boucle.

Bande passante	12 MHz	2 X 12 MHz
10 Mbps	6	3
50 Mbps	33	16
155 Mbps	103	51
622 Mbps	414	207
1250 Mbps	833	416
2500 Mbps	1666	833

Source : Calculs personnels

Nous pouvons déjà exclure l'utilisation de boucles de liens optiques à 622, 1250 et 2500 Mbps, comme elles devraient desservir beaucoup plus que 64 cellules pour ne pas être en sous-capacité. En ce qui concerne les liens à 155 Mbps, ils pourraient uniquement être exploités dans un réseau GSM utilisant 24 MHz de largeur de bande.

[89] Cette croissance future serait soutenu par l'acquisition de nouvelles fréquences

Afin de vérifier si l'implémentation en boucle de liens OSF à 10, 50 et 155 Mbps pour connecter des stations fixes à un contrôleur de stations fixes est techniquement possible et économiquement justifiable, il convient de contrôler si les conditions suivantes sont remplies:

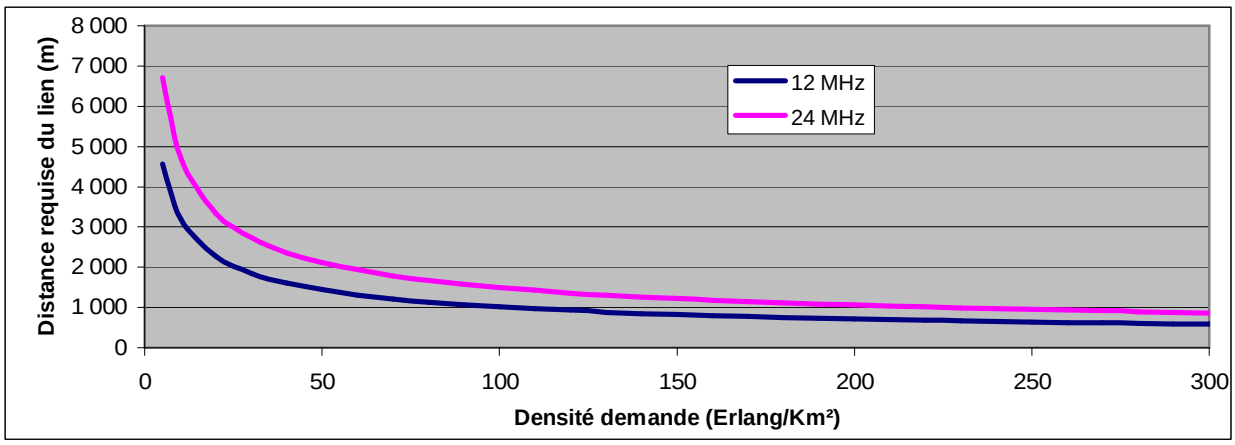
- La densité de la demande est suffisante sur une superficie suffisamment grande
- Les coûts par minute vendue sont suffisamment faibles

a) Condition de densité de demande suffisante sur une superficie suffisamment grande

Si la demande de communications simultanées par km² est relativement faible, le rayon d'une cellule devra être grand pour que la capacité de sa station fixe soit totalement exploitée. Dans le cas où des stations fixes sont reliées entre elles par une boucle de liens optiques, le rayon des cellules ne pourra pas dépasser une certaine valeur au-delà de laquelle la distance entre deux stations fixes deviendra supérieure à la portée des dispositifs OSF. Tentons de déterminer, pour les dispositifs de chaque bande passante, la densité de la demande minimale qui rend la distance entre deux stations fixes compatible avec la portée de ces dispositifs.

Ayant calculé que la capacité d'une cellule est respectivement de 90 et de 195 Erlang pour les réseaux à 12 et à 24 MHz, nous pouvons trouver, en fonction de la densité de la demande en Erlang/km², le rayon de la cellule qui assure sa pleine capacité de la station fixe. A partir de ce rayon peut être calculée la portée requise du lien OSF reliant deux stations fixes. La figure n°30 illustre la relation entre la densité de la demande et la portée requise du lien.

Figure n°30: Relation entre la densité de la demande et la portée requise du lien



Source : calculs personnels

A partir de la relation représentée par la Figure n°30, nous pouvons calculer en fonction de la portée compétitive[90] des dispositifs OSF, la densité de la demande minimale permettant de ne pas dépasser cette portée. Ces distances sont montrées dans le Tableau n°49.

Tableau n°49: Densité d'utilisateurs minimale pour l'implémentation de liens OSF dans des conditions de compétitivité par rapport aux faisceaux hertziens.

Bande passante	Distance compétitive	12 MHz	24 MHz
10 Mbps	4000 m	7 Erlang/km²	15 Erlang/km²
50 Mbps	2500 m	17 Erlang/km²	37 Erlang/km²
155 Mbps	2000 m		57 Erlang/km²

D'autre part, il ne suffit pas que la densité de la demande soit suffisamment importante dans une seule cellule. Il faudrait en effet trouver un endroit où elle le soit en moyenne sur un nombre suffisant de cellules adjacentes. La superficie requise pour une boucle peut être trouvée en multipliant le nombre de cellules par boucle, tel que déterminé dans le tableau n°48, par la superficie des cellules calculée en fonction de la densité de la demande. Les tableaux n°50, 51 et 52 contiennent les résultats de ces calculs pour les dispositifs de 10, 50 et 155 Mbps respectivement. Les cases grises correspondent à des situations où l'OSF est exclu car la densité de la demande définie dans le tableau n°49 n'est pas atteinte. Remarquons qu'il n'y a pas de grande différence dans ces résultats entre les réseaux utilisant 12 et 24 MHz de fréquence. Dans les réseaux à 24 MHz, les cellules sont deux fois plus grandes, mais la boucle parcourt deux fois moins de cellules.

Tableau n°50: Superficie requise pour une boucle de liens OSF à 10 Mbps en fonction de la densité de la demande et de la largeur de la bande de fréquence disponible.

MHz disponibles	Stations fixes	10 Erlang/km²	20 Erlang/km²	40 Erlang/km²	60 Erlang/km²	120 Erlang/km²	200 Erlang/km²
12	6	54 km²	27 km²	14 km²	9 km²	5 km²	3 km²
24	3	/	29 km²	15 km²	10 km²	5 km²	3 km²

Tableau n°51: Superficie requise pour une boucle de liens OSF à 50 Mbps en fonction de la densité de la demande et de la largeur de la bande de fréquence disponible.

MHz disponibles	Stations fixes	10 Erlang/km²	20 Erlang/km²	40 Erlang/km²	60 Erlang/km²	120 Erlang/km²	200 Erlang/km²
12	33	/	149 km²	74 km²	50 km²	25 km²	15 km²
24	16	/	/	78 km²	52 km²	26 km²	16 km²

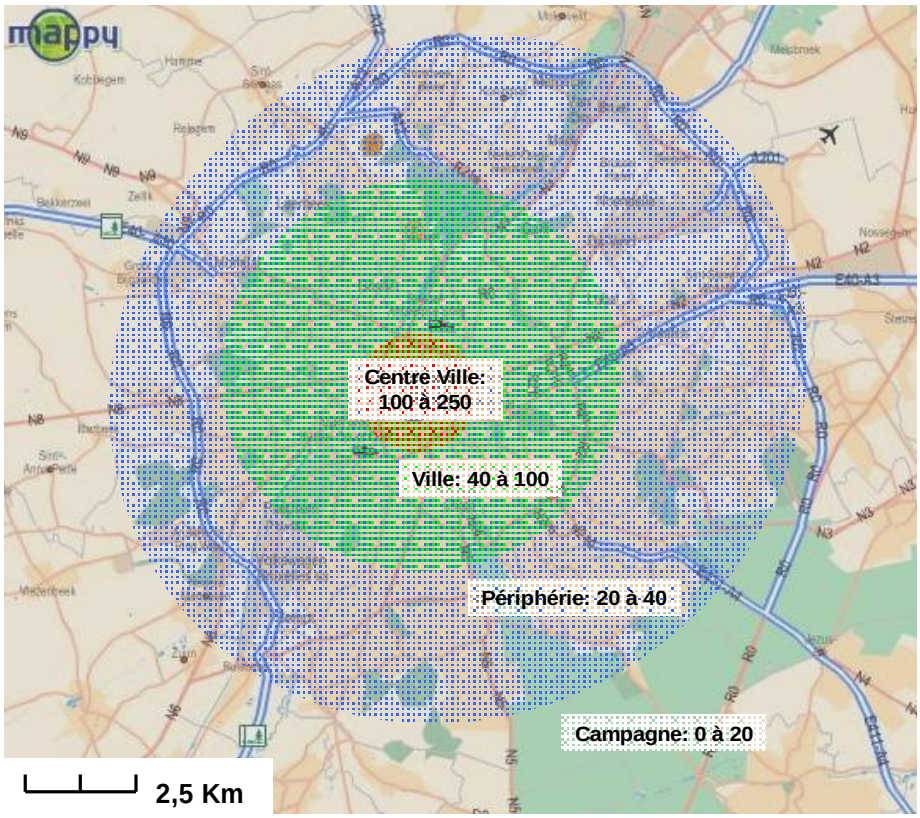
[90] Les portées compétitives des dispositifs OSF, calculées à la fin du deuxième chapitre, sont les distances en dessous desquelles ils sont compétitifs par rapport aux faisceaux hertziens.

Tableau n°52: Superficie requise pour une boucle de liens OSF à 155 Mbps en fonction de la densité de la demande.

MHz disponibles	Stations fixes	10 Erlang/km²	20 Erlang/km²	40 Erlang/km²	60 Erlang/km²	120 Erlang/km²	200 Erlang/km²
24	51	/	/	/	165 km²	83 km²	49 km²

Comparons à présent ces résultats avec des données réelles concernant la répartition géographique de la densité de la demande dans une métropole type. Pour des raisons de confidentialité stratégique, il est assez difficile d'obtenir des statistiques précises de ce genre. Un professionnel expérimenté[91] travaillant auprès d'un opérateur belge a cependant bien voulu nous fournir quelques ordres de grandeur de la répartition géographique de la densité de la demande en Belgique. La figure n°31 et le tableau n°53 décrivent les densités de la demande que l'on peut trouver dans les alentours de la ville de Bruxelles pendant les heures de pointe. Remarquons qu'il est important d'utiliser des données relatives aux heures de pointe, car ce sont elles qui déterminent le dimensionnement du réseau. En dehors des heures de pointe, le réseau sera en sous-capacité.

Figure n°31: Densité de la demande autour de la ville de Bruxelles (Erlang/km²).



Informations : Vincent Bultot / Réalisation : Valentin Bauwens

[91] Vincent Bultot, Proximus

Tableau n°53: Description des segments de la figure numéro n°31

Couleur	Délimitation	Appellation	Erlang/km²	Superficie[92]
Brun	Petite ceinture	Centre-ville	100 à 250	5 km²
Vert	Grande ceinture	Ville	40 à 100	45 km²
Bleu	Ring	Périphérie	20 à 40	127 km²

Regardons si les conditions de densité de la demande suffisante sur une superficie suffisamment grande sont remplies pour les dispositifs de bandes passantes différentes.

- Les lien OSF à 10 Mbps ont besoin, dans les réseaux utilisant 12 MHz, d'une densité de la demande d'au moins 7 Erlang/km² sur une superficie d'environ 60 km². Comme la densité de la demande en campagne varie entre 0 et 20 Erlang/km² sur des grandes étendues, les dispositifs à 10 Mbps pourraient probablement y être utilisés dans des réseaux à 12 MHz. Dans les réseaux à 24 MHz, par contre, une densité d'au moins 15 Erlang/km² est requise sur une supérficie d'une 40aine de km², ce qui sera dur à trouver en campagne. Par contre, en périphérie, où la densité varie entre 20 et 40 Erlang/km², les boucles constituées de liens optiques à 10 Mbps auront besoin d'une superficie comprise entre 15 et 30 km², ce qui est bien inférieur à la surface de la zone périphérique de Bruxelles. Ces boucles pourront donc y être utilisées. A fortiori, les dispositifs à 10 Mbps conviendront également à l'utilisation dans la ville et le centre-ville[93].

- Les lien OSF à 50 Mbps, utilisés dans un réseau à 12 MHz, ont besoin d'une densité d'au moins une 20aine d'Erlang/km² sur une superficie de 140 km². Pour les réseaux à 24 MHz, les densités de la demande doivent être supérieures à 40 Erlang/km² sur une superficie de 75 km². Ceci rend l'utilisation de boucles de liens à 55 Mbps impossible en campagne, où la densité varie entre 0 et 20 Erlang/km². Ces liens pourraient par contre être utilisés en périphérie, mais uniquement dans des réseaux à 12 MHz. En effet, comme la densité de la demande y tourne autour de 30 Erlang/km², une boucle d'un réseau à 12 MHz couvrirait une surface d'une 100aine de km², inférieure à celle de la périphérie bruxelloise. En ville, où la densité tourne autour de 70 Erlang/km², la surface couverte par une boucle serait juste supérieure à 40 km², ce qui correspond exactement à la superficie de la ville. Les dispositifs à

[92] La superficie de la ville ne comprend pas celle du centre ville et la superficie de la périphérie ne comprend pas celle de la ville et du centre-ville

[93] Pour affirmer qu'un dispositif est adéquat pour être utilisé dans une zone déterminée, nous permettons bien entendu que la surface couverte par la boucle déborde dans les zones adjacentes de densité inférieure

55 Mbps pourraient donc y être utilisés. A fortiori, les dispositifs à 55 Mbps conviendront également à l'utilisation dans le centre-ville[94].

- Les liens OSF à 155 Mbps ont besoin d'une densité de la demande d'au moins 57 Erlang/km² sur une superficie d'environ 170 km², ce qui ne se retrouve nulle part en Belgique. Nous pouvons donc exclure l'utilisation de liens à 155 Mbps dans un réseau GSM.

Tableau n°54: Synthèse des résultats

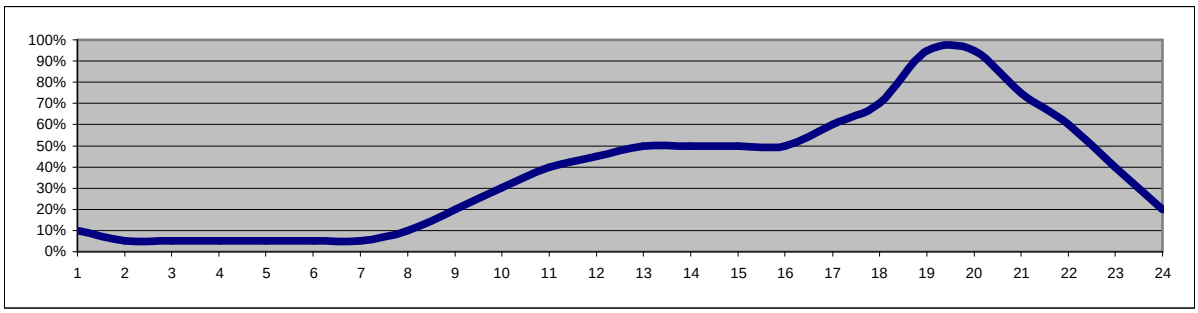
	10 Mbps	50 Mbps	155 Mbps
Campagne	12 MHz seulement	r	r
Périphérie	a	12 MHz seulement	r
Ville	a	a	r
Centre ville	a	a	r

b) Coût par minute

Essayons maintenant de dégager le coût de revient des liens OSF par minute de conversation vocale vendue. Pour cela Il faut calculer le nombre de minutes vendues par Erlang de capacité du réseau. Rappelons que lorsque nous parlions précédemment de la densité de la demande par km², il s'agissait de la demande au moment de l'heure de pointe. Nous ne pouvons donc pas en déduire directement le nombre de minutes vendues par an.

Supposons donc la répartition de la demande au cours de la journée par rapport à la demande à l'heure de pointe, telle que représentée sur la Figure n°32. Celle-ci a été déduite de conversations avec des professionnels[95].

Figure n°32: Répartition de la demande au cours de la journée par rapport à la demande à l'heure de pointe.



Informations : Nicolas Parmentier / Réalisation : Valentin Bauwens

[94] Pour affirmer qu'un dispositif est adéquat pour être utilisé dans une zone déterminée, nous permettons bien entendu que la surface couverte par la boucle déborde dans les zones adjacentes de densité inférieure
[95] Nicolas Parmentier, Belgacom

Nous pouvons calculer à partir de cette figure que l'utilisation moyenne de la capacité est d'environ 40%. Il suffit donc de multiplier par 40% le nombre d'Erlang pouvant être desservis par dispositif[96] à l'heure de pointe pour obtenir le nombre moyen d'Erlang vendus par dispositif. Nous multiplions ensuite ce nombre par le nombre de minutes contenues dans une année pour obtenir le nombre de minutes vendues par dispositif et par an. En connaissant les coûts annuels équivalents des dispositifs optiques tels qu'ils sont calculés à la fin du deuxième chapitre, nous pouvons en déduire le coût par minute de conversation vendue. Les résultats sont disponibles dans le tableau n°55 pour les dispositifs que nous n'avons par exclus précédemment. Remarquons que ces coûts ne varient pas en fonction de la densité de la demande par km², le rayon de cellules ayant été calculé de façon à ce qu'elles recouvrent un nombre constant d'Erlangs.

Tableau n°55: Coût de revient des liens OSF par minute de conversation vendue (en Cent par minute) pour les réseaux disposant de 12 et 24 MHz de fréquence

BANDE PASSANTE	12 MHz	24 MHz
10	0,078	0,041
50	0,091	0,043

Source : Calculs personnels

Nous pouvons constater que:

- lorsque la largeur de la bande de fréquence utilisée double, le prix est environ divisé par deux. Ceci provient du fait que les réseaux à 12 MHz sont constitués de deux fois plus de cellules deux fois plus petites, le nombre de liens reliant ces cellules sera donc doublé.

- Lorsqu'on utilise des dispositifs de bande passante plus élevée, le prix par minute offerte augmente proportionnellement au coût annuel équivalent du dispositif. En effet, l'utilisation de liens de plus grande bande passante ne permet que de multiplier le nombre de cellules desservies par boucle, sans beaucoup changer le nombre d'Erlang par dispositif. Il est donc plus avantageux de choisir le dispositif à 10 Mbps.

[96] Le nombre d'Erlangs pouvant être desservis par dispositif est calculé en divisant le nombre d'Erlangs desservis par une boucle par le nombre de liens composant cette boucle. Le nombre d'Erlangs desservis par boucle est quant à lui obtenu en multipliant la capacité d'une cellule par le nombre de cellules desservies par la boucle. Notons que le nombre de cellules desservies par la boucle est inférieur d'une unité par rapport au nombre de liens composant la boucle, comme une des cellules traversées se trouve au même endroit que le contrôleur de stations fixes

Comparons ces coûts aux revenus par minute d'un opérateur GSM. Si nous observons les prix en vigueur en Belgique tels qu'établis par un comparatif de speed.be, disponible en Annexe n°9, nous constatons qu'à l'exception d'un opérateur, tous les opérateurs belges demandent une rémunération d'au moins 10 cents par minute. Le coût de revient par minute de la connexion entre la station fixe et le contrôleur de stations fixes varierait alors entre 0,4 et 0,9% du revenu par minute.

c) Conclusion GSM

Après avoir déterminé la capacité des cellules GSM en communications simultanées ainsi que leurs besoins en terme de bande passante, nous avons calculé les densités minimales de la demande ainsi que les superficies minimales devant afficher ces densités rendant possible l'utilisation de liens optiques pour transporter les données entre les stations fixes et les contrôleurs de stations fixes. Nous avons ensuite comparé ces caractéristiques requises de l'environnement avec des statistiques réelles de la répartition géographique de la densité de la demande autour de la ville de Bruxelles.

Nous avons étudié le cas de deux types d'opérateurs: ceux qui disposent de 12 MHz de fréquence et ceux qui en utilisent 24 MHz

Selon nos calculs, seuls les liens optiques à 10 et 50 Mbps pourraient être employés pour relier les stations fixes et les contrôleurs de stations fixes. Par contre, l'utilisation des dispositifs de bande passante plus élevée nécessiterait des densités d'utilisateurs trop grandes sur des superficies trop importantes.

Les opérateurs utilisant 12 MHz de fréquence devraient pouvoir se servir du dispositif à 10 Mbps dans tous les types d'environnements. L'utilisation du dispositif à 50 Mbps ne serait par contre pas autorisée en campagne.

En ce qui concerne les opérateurs utilisant 24 MHz de fréquence, ils ne pourraient pas employer les liens optiques à 10 Mbps à la campagne et l'utilisation de dispositifs à 50 Mpbs ne leur serait autorisée qu'en ville.

L'analyse des coûts de revient des dispositifs OSF nous a amenés à conclure que ceux-ci devraient rester inférieurs à 1 % des revenus qu'ils contribuent à générer, ce qui ne devrait pas avoir d'effet négatif sur la rentabilité de l'opérateur.

4.4. L'optique sans fil dans les réseaux UMTS

Nous avons vu que l'architecture des réseaux UMTS ressemble fortement à celle des réseaux GMS, avec des unités mobiles, des stations fixes et des contrôleurs de stations fixes. Pourtant, ces réseaux fonctionnent de manière totalement différente. L'UMTS n'utilise en effet pas la même interface radio que le GSM pour les communications entre les unités mobiles et les stations fixes. Il s'agit de l'interface radio UTRA (UMTS Terrestrial Radio Access). Nous avons vu que dans un réseau GSM, les fréquences sont réparties entre les cellules selon un canevas qui permet d'éviter les interférences. Dans un réseau UMTS par contre, toutes les cellules utilisent les mêmes fréquences et les interférences sont évitées par une gestion minutieuse des puissances d'émission des stations mobiles et fixes. Ce système permet, entre autres, de modifier le périmètre des cellules en fonction de l'évolution de la demande[97].

La principale évolution du standard UMTS par rapport au standard GSM est qu'il permet de véhiculer, outre la voix, des services de données à des bandes passantes pouvant atteindre 2 Mbps. Cependant, cette bande passante maximale sera réservée à des endroits spécifiques et pour des vitesses de déplacement faibles. Dans la majorité des endroits, la bande passante maximale tournera plutôt autour de 384 Kbps[98]. Le tableau n°56 énumère quelques services types pouvant être offerts par UMTS et les bandes passantes associées.

Tableau n°56: Services UMTS et bandes passantes utiles associées

SERVICE	BANDE PASSANTE
Voix	12 Kbps
Musique	128 Kbps
Données	144 Kbps
Vidéoconférence	384 Kbps

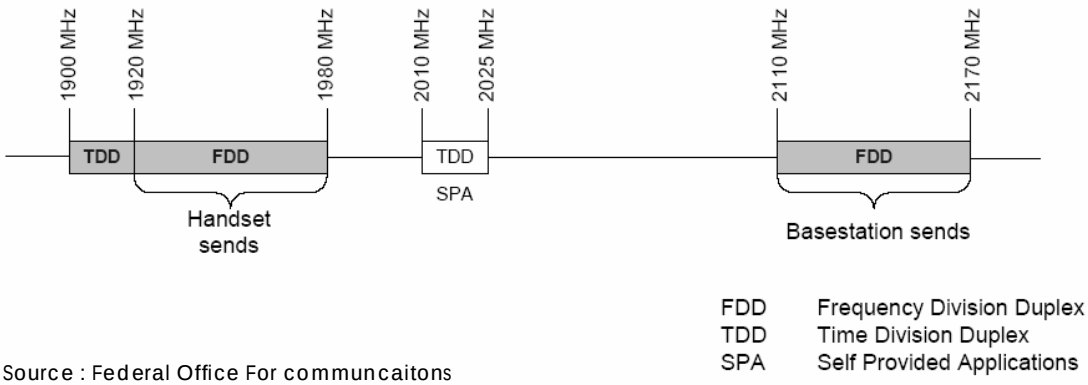
Source : Cisco Systems

Remarquons que pour obtenir la bande passante effectivement transmise sur le réseau entre la station fixe et le contrôleur de stations fixes, il faut tenir compte des données de gestion appelées *overheads* transitant sur cette connexion. Alors qu'ils sont négligeables dans les réseaux GSM, les overheads varient entre 10 et 50 % de la bande passante utile[99]. Cette différence est causée entre autres par la nature et la diversité des modes de transferts de données pouvant être supportés par le standard UMTS[100].

[97] Ce phénomène est appelé "Cell Breathing"
[98] Federal Office For Communications (décembre 2000), "*UMTS factsheet*"
[99] Tanguy Popeler, Proximus
[100] Cisco Systems (2001), "*Overview of GSM, GPRS, and UMTS*", Chapter 2

L'interface UTRA prévoit deux modes de fonctionnement opérant sur des bandes de fréquences différentes. La figure n°33 illustre la répartition de ces fréquences entre les deux modes.

Figure n°33: Répartition des fréquences UMTS[101]



Source : Federal Office For communcaitons

Le mode FDD (Frequency Division Duplex) est opérationnel sur deux bandes de fréquence d'une part, entre 1920 et 1980 MHz et d'autre part, entre 2110 et 2170 MHz. La première bande est utilisée pour les communications montantes (de la station mobile à la station fixe) et la deuxième pour les communications descendantes (de la station fixe à la station mobile). Le FDD est plus approprié pour offrir des services symétriques[102] à pleine mobilité et à couverture étendue et à des débits pouvant atteindre 384 kbps.

Le mode TDD (Time Division Duplex) fonctionne sur une bande de fréquence entre 1900 et 1920 MHz. Ce mode de transmission est plus approprié aux services asymétriques offerts à des usagers lents dans des zones restreintes et à des vitesses pouvant aller jusqu'à 2 Mbps.

A l'heure actuelle le mode FDD fait l'objet du plus grand nombre de développements industriels[103].

Notons que l'intégralité des fréquences ne sera jamais attribuée à un seul opérateur. Les fréquences sont attribuées par canaux de 5 MHz. Ainsi, en Belgique, les opérateurs UMTS se sont chacun procurés deux fois[104] 3 canaux de 5 MHz dans la

[101] Federal Office For Communications (décembre 2000), "*UMTS factsheet*"
[102] où les bandes passantes envoyées et réçues sont équivalentes
[103] IBPT (septembre 1999), *"Synthèse des résultats de la consultation publique relative à l'évolution du marché de la téléphonie mobile vers la troisième génération en Belgique"*
[104] Un pour les communications montantes et un autre pour les communications descendantes

bande FDD et 1 canal de 5 MHz dans la bande TDD[105], ce qui correspond à une capacité d'émission de 20 MHz par station fixe. Cependant, le forum UMTS a estimé qu'à l'horizon 2010, la largeur de la bande de fréquence requise par opérateur serait de l'ordre de 80 MHz[106].

Comme nous avons vu que ce sont surtout les applications FDD qui seront utilisées, nous supposerons que les opérateurs utiliseront surtout les fréquences dans ce mode de fonctionnement et négligerons les canaux de 5 MHz qui leur ont été attribués pour les applications TDD. Par la suite, nous étudierons donc deux scénarii: celui où la demande de services UTMS est telle que 15 MHz (3 x 5) suffisent par opérateur et celui où l'augmentation de la demande nécessite une attribution de 60 MHz (12 x 5) par opérateur.

a) Calcul de la capacité d'une cellule UMTS

Afin d'estimer la distance entre deux stations fixes et les bandes passantes requises entre les stations fixes et les contrôleurs de stations fixes, nous devons avoir une idée de la capacité des cellules UMTS en unités de service simultanées[107]. Par rapport aux réseaux GSM, deux éléments vont compliquer nos calculs:

- Le fait que toutes les cellules utilisent la même fréquence et que la capacité est déterminée par la gestion des interférences.
- Le fait que plusieurs types de services, aux bandes passantes diverses, peuvent être rendus simultanément.

Dans son livre "UMTS, les origines, l'architecture, la norme", Pierre Lescuyer fournit une formule approximative permettant d'estimer la capacité d'une cellule (N) en supposant qu'un seul service est offert:

$$N \approx \left(\frac{D}{B}\right) \cdot \left(\frac{E_b}{N_o}\right)^{-1}$$

Les paramètres rentrant en compte dans cette formule sont les suivants:

- D: le débit utile du service offert (kbps)
- B: La largeur de la bande disponible (MHz)
- E_b/N_o: Le rapport signal à bruit. La réception correcte des informations transmises requiert un certain rapport entre l'énergie utile par bit d'information et le bruit ou le niveau d'interférence ambiant[108]. Ce rapport est différent pour

[105] IBPT (décembre 2000), "*Projet d'Arrêté royal fixant le cahier des charges et la procédure relative à l'octroi d'autorisations pour les systèmes de télécommunications mobiles de troisième génération*"

[106] IBPT (septembre 1999), *"Synthèse des résultats de la consultation publique relative à l'évolution du marché de la téléphonie mobile vers la troisième génération en Belgique"*

[107] En unité se service = en nombre de communications sumultanées, connexions internet simultanées,…

[108] Lescuyer P. (juin 2002), "*UMTS – les origines, l'architecture, la norme*", Dunod

les différents services offerts. Le Tableau n°57 Fournit des rapports E_b/N_o typiques pour certaines bandes passantes[109].

En connaissance de ces paramètres, nous pouvons calculer la capacité approximative d'une cellule par canal de 5MHz en supposant qu'un seul service est offert. Le tableau n°57 Fournit également les résultats de ces calculs. Notons que lorsque des services de bandes passantes plus élevées sont offerts, la bande passante utile totale pouvant être véhiculée par cellule est plus importante

Tableau n°57: Energie par bit utile/densité spectrale du bruit en fonction du débit utile[110] et capacité des services exclusifs par canal de 5 MHz

Débit Utile du service	E_b/N_o	Capacité par cellule et par canal de 5 MHz	Bande passante totale du débit utile
12 Kbps	5 dB	133 appels	12 x 133 = 1,6 Mbps
144 Kbps	1,5 dB	26 connexions	144 x 26 = 3,7 Mbps
384 Kbps	1 dB	11 connexions	384 x 11 = 4,2 Mbps

Des formules relativement complexes existent pour calculer la capacité d'une cellule en tenant compte d'un mélange donné de services. Cependant, afin de simplifier nos calculs, nous estimerons cette capacité par une méthode d'approximation. Cette méthode consiste à multiplier les capacités par cellule de chaque service lorsqu'il est exclusivement offert par les fractions de la capacité de la cellule que sont supposés occuper ces services. Selon Tanguy Popeler, spécialiste du dimensionnement des réseaux UMTS, cette méthode d'approximation permet d'obtenir des ordres de grandeur réalistes. Pour calculer la capacité d'une cellule en unités de service, nous devrons donc poser des hypothèses sur les fractions de la capacité occupée par chaque service et donc sur le nombre de connexions à 144 et 384 kbps demandées par conversation vocale.

b) détermination du mélange de services

Pour simplifier nos calculs, nous réduirons le nombre de bandes passantes possibles à trois et supposerons que les rapports E_b/N_o sont identiques pour tous les services fonctionnant à la même bande passante :

- communications vocales à 12 Kbps
- Accès internet à 144 Kbps
- Vidéoconférence et vidéo à la demande à 384 Kbps

[109] En réalité ce rapport ne dépend pas uniquement de la bande passante utilisée, mais aussi de la qualité requise de la connexion par exemple
[110] Tanguy Popeler, Proximus

Dans une simulation[111] du trafic UMTS réalisée par UMTS Forum en 2003, on peut trouver une répartition du volume du trafic journalier (en Tbyte) en fonction de divers services.

En classant le volume de trafic de ces services dans les catégories de bandes passantes précédemment définies, on obtient des fractions du trafic de 35, 40 et 25 % respectivement pour les services à 12, 144 et 384 Kbps. Nous supposerons[112] que ces pourcentages correspondent à la fraction de la capacité d'une cellule qu'utilisent ces trois catégories de services dans le scénario "15 MHz".

Le scénario "60 MHz" est basé sur une forte augmentation de la demande de service UMTS. Or, il est peu probable que, dans cette situation, la demande de services vocaux augmente autant que les autres services, étant donné que le marché des conversations vocales est beaucoup plus mâture. Nous redistribuerons donc la répartition de la capacité de la cellule en faveur des services de bande passante plus élevée en attribuant respectivement 10, 55 et 35 % aux services à 12, 144 et 384 Kbps. Ces hypothèses sont résumées dans le tableau n°58.

Tableau n°58: Hypothèses posées concernant la fraction de la capacité d'une cellule occupée par les services de bandes passantes différentes

DEBIT UTILE	15 MHz	60 MHz
12 Kbps	35 %	10 %
144 Kbps	40 %	55 %
384 Kbps	25 %	35 %

Source : estimations personnelles à partir d'informations de l'UMTS FORUM

Multiplions maintenant les capacités par cellule de chaque service lorsqu'il est exclusivement offert par les fractions de la capacité de la cellule que sont supposés occuper ces services. Nous obtenons ainsi la capacité, en unité de service, d'une cellule fournissant le mélange de services supposé ci-dessus. Par la suite, nous supposerons que les rapports entre les densités de la demande des différents services sont conformes aux rapports entres les capacités par cellule des différents services décrits dans le tableau n°59[113].

[111] UMTS forum (novembre 2003), *"3G offered traffic characteristics, final report"*, page 31

[112] Nous estimerons donc la répartition de la capacité d'une cellule en unités de services par sa répartition en volume de trafic, ce qui entraine un biais vu que les services à plus haute bande passante utilisent moins de capacité en unités de services par Kbps offert

[113] Par exemple, dans le scénario "15 MHz", Il y aura toujours 10 connexions à 144 Kbps demandées par 46 communications vocales demandées.

Tableau n°59: Capacité par canal et par cellule selon les hypothèses posées

DEBIT UTILE	Capacité par canal (scenario "15 MHz")	Capacité par canal (scenario "60 MHz")	Capacité par cellule (15 MHz)	Capacité par cellule (60 MHz)
12 Kbps	133 x 0,35 = 46	133 x 0,10 = 13	139	159
144 Kbps	26 x 0,40 = 10	26 x 0,55 = 14	30	168
384 Kbps	11 x 0,25 = 3	11 x 0,35 = 4	8	47

Souce : calculs personnels

c) Bande passante requise par cellule

Pour trouver la bande passante requise par cellule, nous multiplions le nombre de services pouvant être offerts simultanément par leur bande passante utile et additionnons le tout. Il faut encore y ajouter les overheads pour obtenir la bande passante transitant effectivement entre la station fixe et le contrôleur de stations fixes. Nous avons vu précédemment que ces overheads engendraient un trafic équivalent à 10 à 50 % du débit utile. Nous supposerons une valeur intermédiaire de 30%. Le tableau n°60 montre les résultats obtenus.

Tableau n°60: Bande passante requise par cellule selon les hypothèses posées

	15 MHz	60 Mhz
12 Kbps	2,17 Mbps (139 x 12 x 1,3)	2,49 Mbps = (159 x 12 x 1,3)
144 Kbps	5,75 Mbps = (30 x 144 x 1,3)	31,61 Mbps = (168 x 144 x 1,3)
384 Kbps	4,25 Mbps = (8 x 384 x 1,3)	23,78 Mbps = (47 x 384 x 1,3)
TOTAL	12,17 Mbps	57,87 Mbps

Source : calculs personnels

d) Calcul du nombre de cellules par boucle

Comme pour les réseaux GSM, nous supposerons que nous utiliserons des boucles de liens optiques de capacités identiques, sauf lorsque la capacité d'un dispositif ne lui permet pas de transporter le trafic de plusieurs cellules. Dans ce cas, nous supposerons une disposition en étoile. Le tableau n°61 montre le nombre de cellules pouvant être desservies par boucle en fonction de la bande passante des liens qui la composent. Les chiffres en gras correspondent à des situations où le nombre de cellules par boucle a légèrement été arrondi vers le haut. En effet, nous supposons que les dispositifs à 10 et 50 Mbps peuvent transporter le trafic d'un seule cellule dans les scénarios "15 MHz" et '"60 MHz" respectivement, comme les besoins de capacité maximaux respectifs sont de 12 et 58 Mbps. Cette légère sur-capacité est acceptable[114].

[114] Beaucoup de constructeurs OSF offrent également des dispositifs à 55 Mbps

Tableau n°61: Cellules desservies par boucle en fonction de la bande passante des dispositifs OSF utilisés dans cette boucle.

Bande passante	15 MHz	60 MHz
10 Mbps	1	0
50 Mbps	4	1
155 Mbps	12	3
622 Mbps	51	10
1250 Mbps	102	21
2500 Mbps	205	43

Source : calculs personnels

Nous pouvons faire les observations suivantes:

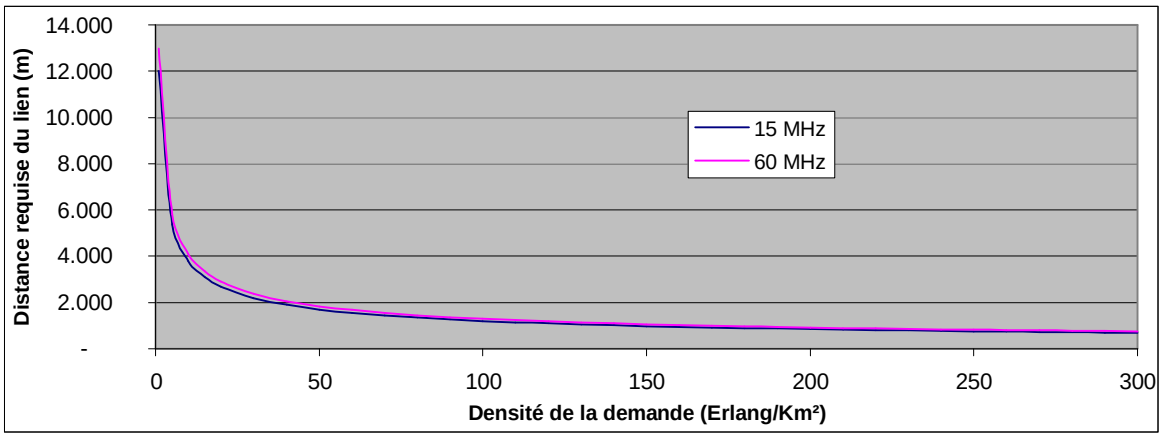
- Le dispositif à 10 Mbps ne peut être utilisé que dans le scenario "15 MHz" et dans une configuration en étoile.
- Le dispositif à 50 Mbps doit être utilisé dans une configuration en étoile dans le scénario "60 MHz".
- En supposant que le nombre de stations fixes par contrôleur de stations fixes ne peut pas dépasser 64, les dispositifs à 1250 et 2500 Mbps ne peuvent pas être utilisés dans le scénario "15 MHz"

e) Condition de densité de la demande suffisante sur une superficie suffisamment grande.

Nous avons supposé que les rapports entre les densités de demandes des différents services sont constants et qu'ils correspondent à la répartition de la capacité des cellules supposée. Dans ce cas, si la capacité d'une cellule pour un certain service est suffisante pour satisfaire les besoins de ce service dans un certain périmètre, ce sera également le cas pour les autres services. Nous pourrons donc comparer la capacité de cellules en conversations vocales à la densité de la demande de conversations pour estimer le rayon requis des cellules. Nous travaillerons donc de la même manière que nous l'avons fait pour les réseaux GSM et utiliserons les mêmes statistiques de répartition géographique de densité de la demande.

Vérifions maintenant s'il est possible de trouver des endroits dont la densité de la demande est suffisamment grande pour que la portée requise du lien soit inférieure à la distance compétitive. La figure n°34 Illustre la relation entre la densité de la demande et la portée requise du lien. En comparant cette relation aux portées compétitives des liens OSF, nous pouvons déterminer la densité de la demande minimale requise pour chaque lien.

Figure n°34: Relation entre la densité de la demande et la portée requise du lien



Source : Calculs personnels

Cet exercice est effectué dans le tableau n°62. Remarquons que la portée d'une antenne UMTS est d'environ 2 km[115]. Or, la distance compétitive des liens OSF est de 4 km. Comme les dispositifs OSF sont ici utilisés pour relier entre elles deux cellules, le fait de respecter la portée compétitive de ces dispositifs implique de respecter la portée maximale des antennes UMTS.

Tableau n°62: Densité d'utilisateurs minimale pour l'implémentation de liens OSF dans des conditions de compétitivité par rapport aux faisceaux hertziens.

Bande passante	Distance compétitive	15 MHz	60 MHz
10 Mbps	4000 m	9 Erlang/km²	*(Bande passante insuffisante)*
50 Mbps	2500 m	23 Erlang/km²	27 Erlang/km²
155 Mbps	2000 m	36 Erlang/km²	42 Erlang/km²
662 Mbps	2300 m	28 Erlang/km²	32 Erlang/km²
1250 Mbps	1500 m	*(trop de cellules par boucle)*	75 Erlang/km²
2500 Mbps	800 m	*(trop de cellules par boucle)*	265 Erlang/km²

Source : Calculs personnels

Vérifions à présent s'il est possible de trouver une surface présentant cette densité de demande minimale, suffisamment grande pour accueillir toutes les cellules d'une boucle. La superficie requise pour une boucle peut être trouvée en multipliant le nombre de cellules par boucle, tel que déterminé dans le tableau n°61, par la superficie des cellules calculée en fonction de la densité de la demande. Les tableaux n°63, 64, 65 et 66 ont été calculés de cette manière. Les cases grises correspondent à des situations où l'OSF est exclu car la densité de la demande définie dans le tableau n°62 n'est pas atteinte. Comparons ces résultats à la figure n°35.

[115] Federal Office For Communications (décembre 2000), "*UMTS factsheet*"

Tableau n°63: Superficie requise pour une boucle de liens OSF à 50 Mbps en fonction de la densité de la demande.

MHz disponibles	Stations fixes	10 Erlang/km²	20 Erlang/km²	40 Erlang/km²	60 Erlang/km²	120 Erlang/km²	200 Erlang/km²
15	4		25 km²	12 km²	8 km²	4 km²	3 km²

Tableau n°64: Superficie requise pour une boucle de liens OSF à 155 Mbps en fonction de la densité de la demande et de la largeur de la bande de fréquence disponible.

MHz disponibles	Stations fixes	10 Erlang/km²	20 Erlang/km²	40 Erlang/km²	60 Erlang/km²	120 Erlang/km²	200 Erlang/km²
15	12			37 km²	25 km²	12 km²	7 km²
60	3			11 km²	7 km²	4 km²	2 km²

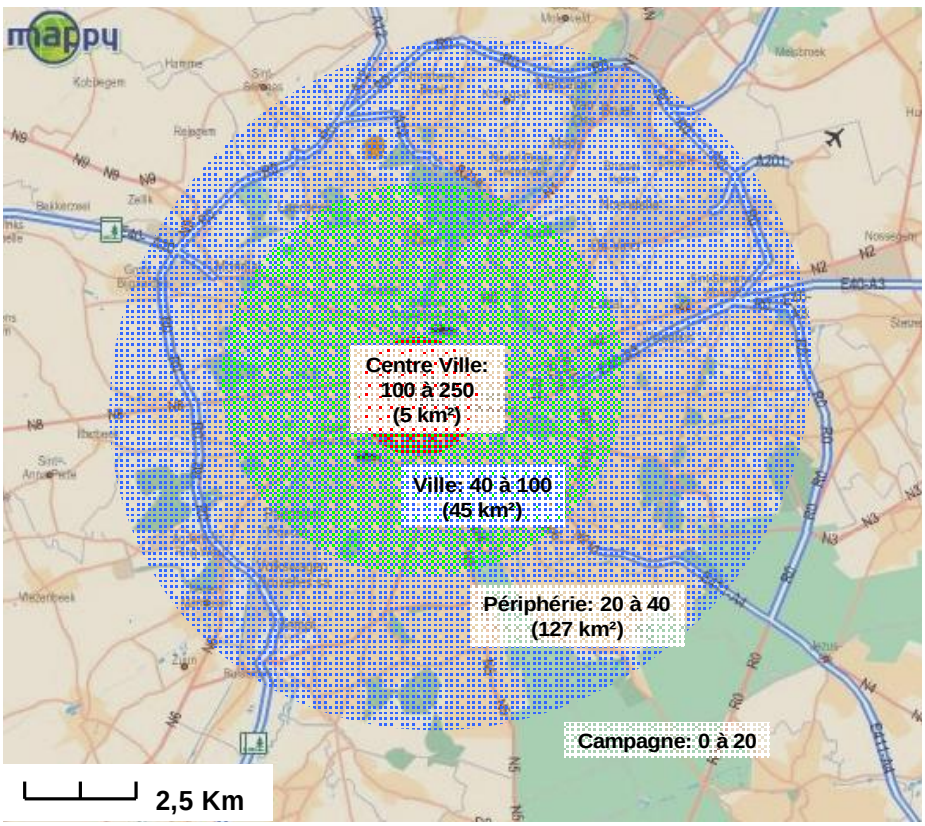
Tableau n°65: Superficie requise pour une boucle de liens OSF à 622 Mbps en fonction de la densité de la demande.

MHz disponibles	Stations fixes	10 Erlang/km²	20 Erlang/km²	30 Erlang/km²	60 Erlang/km²	120 Erlang/km²	200 Erlang/km²
15	51			212 km²	106 km²	53 km²	31 km²
60	10			48 km²	24 km²	12 km²	7 km²

Tableau n°66 Superficie requise pour une boucle de liens OSF à 1250 Mbps en fonction de la densité de la demande.

MHz disponibles	Stations fixes	10 Erlang/km²	20 Erlang/km²	40 Erlang/km²	75 Erlang/km²	120 Erlang/km²	200 Erlang/km²
60	21				41 km²	25 km²	15 km²

Figure n°35: Densité de la demande autour de la ville de Bruxelles (Erlang/km²).



Les liens à 10 Mbps peuvent uniquement être utilisés dans le scénario "15 MHz" et dans une configuration en étoile. Comme ils ne requièrent qu'une densité de la demande de 9 Erlang/km², leur utilisation est possible dans toutes les zones de la carte.

Les liens à 50 Mbps nécessitent une densité de la demande minimale de 23 Erlang/km² dans le scénario "15 MHz" et 27 Erlang/km² dans le scénario "60 MHz", ce qui les empêche d'être utilisés à la campagne. Par contre, à partir de la périphérie, les densités de la demande deviennent suffisantes et les conditions de superficie suffisante sont respectées dans le scénario "60 MHz"

Les liens à 155 Mbps nécessitent une densité de la demande d'au moins une 40aine d'Erlang/km², aussi bien dans le scénario "15 MHz" que dans le scénario "60 MHz", ce qui rend leur utilisation possible à partir de la ville. Les conditions de des superficie suffisante y sont remplies

Les liens à 622 Mbps ne pourraient pas être utilisés dans le scénario "15 MHz", comme ils requièrent de densités d'utilisateurs trop élevées sur des surfaces trop importantes. Cette utilisation serait par contre envisageable dans le scénario "60 MHz". Ils requièrent alors une densité de la demande minimale de 32 Erlangs sur une superficie d'environ 48 km². Ces conditions sont remplies à partir de la périphérie.

Les liens à 1250 Mbps requièrent une densité de la demande d'au moins 75 Erlang/km² sur une superficie de 41 km², ce qui correspond tout juste aux propriétés de la ville. L'utilisation d'une boucle de liens à 1250 Mbps supposerait donc de l'implémenter sur l'entièreté d'une ville, ce qui est contestable pour des raisons de fiabilité.

Les liens à 2500 Mbps ne peuvent jamais être utilisés, comme la bande passante requise est beaucoup trop importante.

Tableau n°67: Synthèse des résultats

	10 Mbps	50 Mbps	155 Mbps	622 Mbps	1250 Mbps	2500 Mbps
Campagne	a (15 MHz)	r	r	r	r	r
Périphérie	a (15 MHz)	a	r	a (60 MHz)	r	r
Ville	a (15 MHz)	a	a	a (60 MHz)	? (60 MHz)	r
Centre ville	a (15 MHz)	a	a	a (60 MHz)	? (60 MHz)	r

f) Calcul du coût de revient

Nous calculerons ici le rapport entre les coûts engendrés par les liens optiques sans fil par Mégabyte vendu et les revenus générés par la vente d'un Mégabyte.

Commençons par déterminer les revenus annuels générés par cellule. Ces revenus sont la somme des ceux générés par les différents services. Pour les services de données nous supposerons que l'opérateur touche 0,5 euro par Mégabyte vendu, aussi bien pour les services à 144 Kbps que pour ceux à 384 Kbps. Ce tarif correspond à celui pratiqué par Proximus pour son service UMTS: la *vodafone mobile connect card*[116].

Tableau n°68: Calcul du revenu par cellule

	15 MHz	60 MHz
Mbps en heure de pointe (sans overheads)	7,69 Mbps	42,61 Mbps
Mbps moyen	3,07 Mbps	17,04 Mbps
MBps moyen	0,38 MBps	2,13 MBps
MB / an	12.121.186 MB	67.181.620 MB
Revenus données par an	6.060.593 €	33.590.810 €
Revenus voix par an	2.628.000 €	3.069.504 €
TOTAL	8.688.593 €	36.660.314 €

Source : calculs personnels

Pour calculer les revenus générés annuellement par cellule par les services de données, nous partons de la capacité de données utiles offerte par cellule à l'heure de pointe pour ces services de données (on ne tient donc pas compte des overheads). Nous faisons les mêmes hypothèses que dans la partie GSM concernant la répartition du trafic au cours de la journée et multiplions donc cette capacité par 0,4 pour obtenir le trafic moyen par cellule. Pour l'instant, nous travaillons, en Mégabit par seconde (Mbps). Or, les tarifs des opérateurs sont exprimés en Mégabyte (MBps) par seconde. Nous devons donc convertir nos chiffres en les divisant par 8. Multiplions ensuite le trafic moyen par cellule en MBps par le nombre de secondes contenues dans une années (365 x 24 x 60 x 60) pour obtenir le nombre total de MB vendus par an et multiplions encore ce chiffre par le tarif de 0,5 €/MB. Nous obtenons les revenus annuels par cellule des services de données auxquels nous devons ajouter les revenus des services vocaux, calculés de la même manière que pour les réseaux GSM. Ces calculs sont affichés dans le tableau n°68.

[116] http://business.proximus.be/fr/Vodafone_Mobile_Connect_Card/index.html

Connaissant les revenus générés par cellule et par an nous pouvons trouver ceux générés par une boucle entière et les comparer aux coûts des dispositifs[117] composant cette boucle. Nous obtenons les ratios coûts/revenus affichés dans les tableaux n°69 et 70.

Tableau n°69: Calcul du ratio coûts/revenus par boucle 15 MHz

	Cellules par boucle	Revenus par boucle	Coûts par liens	Coûts par boucle	Coûts/Revenus
10 Mbps	1	8.688.593	12000	12.000	0,138%
50 Mbps	4	34.754.372	16000	80.000	0,230%
155 Mbps	12	104.263.115	17000	221.000	0,212%
622 Mbps	51	443.118.237	22000	1.144.000	0,258%

Source : calculs personnels

Tableau n°70: Calcul du ratio coûts/revenus par boucle 60 MHz

	Cellules par boucle	Revenus par boucle	Coûts par liens	Coûts par boucle	Coûts/Revenus
50 Mbps	1	36.660.314	16000	16000	0,044%
155 Mbps	3	109.980.942	17000	68000	0,062%
622 Mbps	10	366.603.139	22000	242000	0,066%

Source : calculs personnels

Il apparaît que les coûts provenant des liens optiques sont toujours inférieurs à 0,25 % des revenus qu'ils contribuent à générer. Ils devraient donc permettre d'offrir des services UMTS de façon rentable.

[117] Nous utiliserons les coûts annuels des dispositifs optiques déterminés dans la figure n°15 et 16 lors de la comparaison avec les faisceaux hertziens dans le chapitre 2.

g) Conclusion UMTS

Après avoir déterminé la capacité des cellules UMTS ainsi que leurs besoins en terme de bande passante, nous avons calculé les densités minimales de la demande ainsi que les superficies minimales devant afficher ces densités rendant possible l'utilisation de liens optiques pour transporter les données entre les stations fixes et les contrôleurs de stations fixes. Nous avons ensuite comparé ces caractéristiques requises de l'environnement avec des statistiques réelles de la répartition géographique de la densité de la demande autour de la ville de Bruxelles.

Nous avons étudié deux scénarii: celui où la demande de services UMTS est moyen et où 15 MHz de fréquence suffisent aux opérateurs et celui où la demande augmente fortement engendrant des besoins de 60 MHz de fréquence par opérateur

Selon nos calculs, les liens optiques à 10 Mbps pourraient seulement être utilisés dans le scénario de demande moyenne. Sous cette condition, ils pourraient cependant être employés dans tous les types d'environnements.
Alors que l'utilisation de liens optiques à 50 et 155 Mbps serait possible dans les deux scénarii, celle-ci se limiterait à la ville et à sa périphérie pour le modèle à 50 Mbps et à la ville uniquement pour le modèle à 155 Mbps.

En ce qui concerne les liens optiques à 622 et 1250 Mbps, leur utilisation ne serait possible que dans le scénario de demande importante. Les dispositifs à 622 Mbps pourraient uniquement être employés à partir de la périphérie de la ville. Quand aux dispositifs à 1250 Mbps, nous remettons en cause la possibilité de leur emploi, comme celle-ci impliquerait la couverture d'une ville entière de la taille de bruxelles, ce qui engendrerait des risques trop importants en terme de disponibilité.

L'analyse des coûts de revient des dispositifs OSF nous a amenés à conclure que ceux-ci devraient rester inférieurs à 1 % des revenus qu'ils contribuent à générer, ce qui ne devrait pas avoir d'effet négatif sur la rentabilité de l'opérateur.

CONCLUSION

L'objectif de ce mémoire est de déterminer dans quelle mesure les technologies optiques sans fil sont susceptibles d'être adoptées par les opérateurs de télécommunications.

La réponse à cette question sera affirmative si :

- les dispositifs OSF sont techniquement et économiquement compétitifs par rapport aux technologies concurrentes
- Les circonstances dans lesquelles les liens OSF peuvent être utilisés de manière efficace et rentable au sein des réseaux des opérateurs sont fortement répandues

A l'aide des connaissances acquises et des observations effectuées, il est maintenant temps de répondre à ces questions.

LES TECHNOLOGIES OSF SONT ELLES ECONOMIQUEMENT COMPETITIVES ?

Par rapport aux technologies hertziennes, les technologies OSF ont tendance à être moins chères pour des liens de bande passante élevée sur des distances plus faibles. En partique, nos calculs ont montré que, lorsque des licences hertziennes doivent être payées, les liens optiques sont compétitifs par rapport aux faisceaux hertziens lorsque leur portée ne dépasse pas approximativement 2000 mètres pour les liens de bandes passantes les plus élevées et 3000 mètres pour les liens de bandes passantes plus faibles. Par contre, la distance permettant d'assurer la compétitivité des dispositifs diminue à environ 1200 mètres lorsqu'on les compare aux faisceau hertziens sans licences.

Par rapport aux technologies filaires, les technologies OSF sont généralement moins chères lorsque le médium filaire doit être installé par des méthodes de creusage de tranchées. Par contre, quand le médium peut être placé de manière plus économique, la compétitivité de l'OSF n'est plus assurée. Ces méthodes moins chères sont cependant généralement réservées aux environnements ruraux, dont nous avons vu qu'ils conviennent peu à l'OSF

Par rapport aux lignes louées, nous avons calculé que les liens OSF reviennent toujours moins chers.

Il apparaît donc que, selon les critères de la Valeur Actuelle Nette, les technologies optiques sans fil sont effectivement compétitives par rapport à la plupart de leur concurrents, à condition cependant de ne pas dépasser les portées compétitives calculées.

DANS QUELLES CIRCONSTANCES LES TECHNOLOGIES OSF SONT ELLES UTILISABLES ?

Répondons à cette question par les constatations réalisées lors de l'étude de connexions au sein des quatre types de réseaux étudiés

ADSL / VDSL

L'utilisation rentable des liens OSF dans les réseaux ADSL semble limitée aux grandes métropoles présentant des densités d'utilisateurs suffisantes. Il est moins certain, par contre, que l'efficacité économique des technologies OSF utilisées en ADSL soit assurée dans des villes plus petites. D'autre part, les dispositifs OSF de bandes passantes supérieures à 622 Mbps ne sont jamais appropriés aux réseaux ADSL car ils demandent des densités d'utilisateurs trop importantes. Dans les cas des réseaux VDSL, il semble difficile de pouvoir utiliser des dispositifs OSF de façon rentable comme ils sont contraints de fonctionner en sous-capacité.

GSM / UMTS

Dans les réseaux GSM et UMTS, les dispositifs à 10 Mbps peuvent, grâce à leur portée plus importante, être employés de manière efficace sur des surfaces présentant des densité d'utilisateurs caractéristiques des environnements ruraux. L'environnement adéquat est par contre réduit aux zones péri-urbaines pour les systèmes à 50 Mbps et aux zones urbaines pour les liens à 155 Mbps, ces derniers ne pouvant être utilisés qu'en UMTS. Dans un scénario de demande importante, l'usage rentable de liens à 622 Mbps pourrait éventuellement être envisagé dans les réseaux UMTS. Les dispositifs OSF de bandes passantes supérieures à 622 Mbps ne sont par contre jamais appropriés car ils demandent des densités d'utilisateurs trop importantes sur des superficies trop étendues

Nos résultats montrent que les dispositifs de bandes passantes les plus importantes ne peuvent jamais être utilisés. Or, nous avons observé que la compétitivité de l'optique sans fil est surtout importante pour cette gamme de produits. D'autre part, quand l'utilisation de technologies OSF est possible, elle sera la plupart du temps restreinte aux environnements urbains les plus denses.

Nous pouvons donc conclure que le marché des technologie OSF est restreint, non pas par manque de compétitivité économique par rapport aux technologies concurrentes mais plutôt par la relative pauvreté des circonstances dans lesquelles elles peuvent être implémentées, le facteur le plus restrictif étant globalement le manque de densités d'utilisateurs suffisantes.

Lorsque les analystes de 2001 prévoyaient un marché énorme pour les technologies optiques sans fil, c'était en comptant sur une utilisation beaucoup plus dense des nouveaux services émergeants. De plus, le prix intéressant de l'OSF par rapport aux technologies concurrentes ne faisait que conforter leur confiance dans cette technologie.

Il n'est cependant pas exclu que la situation s'améliore dans l'avenir, avec l'augmentation de la densité de la demande des services de données. S'il existe un marché, il le sera surtout pour les dispositifs de bande passante plus faible, de l'ordre de 10 ou 50 Mbps dans les réseaux cellulaires et en particulier dans les réseaux UMTS, dans un scénario de demande importante.

BIBLIOGRAPHIE

- Achour M. (2002), "*Free Space Optics Wavelength Selection: 10µ Versus Shorter Wavelengths*"
- Achour M. (aout 2002), "*Simulating Atmospheric Free-Space optical Propagation, Part II: Haze, Fog and low clouds attenuations*"
- Achour M. (mai 2002), "*Optical Wireless: Benefits and challenges*"
- Actipole (juin 2003), "*Laser à Haut débit – Tête intelligente ou tête passive?*", livre blanc.
- ADC (2002), "*Digivance – Long range Coverage Solution – Dual band 800/1900 MHz system*", specification sheet
- Airfiber (2002), "*Wireless Backhaul*", application note
- Allen M., Pelosi L., Bhakta D. (octobre 2002), "*Summary of business opportunity*"
- Alwan J. (2001), "*Eye Safety and wireless optical networks*", Airfiber
- Andersen Consulting, Detecon, Telemate Mobile Consultants (février 1998), "*The GSM-CDMA Economic Study*"
- Beck M., Hoffstetter D., Aellen T., Faist J., Oesterle U., Ilegems M., Gini., Melchior H., (Janvier 2002), "*Continuous Wave Operation of Mid-Infrared Semiconductor Laser at Room temperature*", Nature
- Bernier P. (juillet 2002), "*The trouble with free space optics*", xchangemag.com
- Bernier P. (septembre 2001), *"Next Level drops VDSL price; technology still faces challenges"*, xchangemag.com
- Bloom S. (décembre 2001), "*The physics of free-space optics*", Airfiber, white paper
- Bloom, Korevaar, Schuster, Willebrand (avril 2003), "*Understanding the performance of free-space optics*"
- Bloom, S. (mai 2002), "*The last mile solution: hybrid FSO Radio*"
- Brisoux C., Bejjani C., Crespin G. (février 2002), "*Densification in cellular networks*", DESS
- Britz D. (2002), "*A review of the concept of availability as it relates to Free Space Optical Communications*", AT&T Labs
- Burstein P. (juin 2003), "DSL prime: the VDSL War", ISP-planet.com
- Burton J. (octobre 2003), "*FCC opens 70, 80, and 90 GHz spectrum bands for deployment of broadband millimeter wave technology*", Federal Communications Commission
- Business Wire (octobre 2003), "*Bechtel Evaluates Performance of Three Terabeam Systems*"
- Business Wire (octobre 2003), "*FAA in Albuquerque connects remote facilities using Terabeam's free-space optics systems*"
- Carlson R., Paciorek S. (2002), "*Environmental Qualification and field test results for the SONAbeam 155 an 622*"
- Colt Telecommunications (2002), "*Colt Telecom and Airfiber help music fans tune in to the MTV Europe Music Awards 2002*"

- Commission Européenne (décembre 2000), "*Sixth report on the implementation of the telecommunications regulatory package, Annexe 7*"
- Commission Européenne (décembre 2001), "*Commission response to concerns expressed by pan-European operators and users' groups on the provision of leased lines*"
- Commission Européenne (décembre 2002), "*Explanatory Memorandum: leased lines: commission closes the leased line sector inquiry and two ex-officio cases in Belgium an Italy*"
- Communication By Light (janvier 2003), "*LaserLinks for GSM/UMTS*", application note
- Deissner J., Fettweis Gerhard P. (1999), "*A study on hierarchical cellular structures with Inter-Layer Reuse in an Enhanced GSM Radio Network*"
- Dhillon, Diminico, Woodfin (mai 2002), "*Optical Fiber and 10 Gigabit Ethernet*"
- Dominion Lasercom (2001), "*Mass Market Free Space Optical Connectivity for the Telecommunications Marketplace*", White Paper
- Draganov V., James D. (2001), "*Compact Telescope for Free Space Communications*"
- DSL Forum (2001), *"VDSL tutorial, Fiber-Copper access to the information highway"*
- ELVA-1 (2004), "The hybrid FSO concept"
- Eurofiber, "*Building a DSL access network with Dark Fiber*", white paper
- FCC (octobre 2003), "*United States Frequency Allocations – The radio spectrum*"
- Federal Communications Commission (décembre 1996), "*Report and recommendations of the millimeter communications working group to the FCC*"
- Federal Communications Commission (juillet 1997), "*Millimeter Wave Propagation: Spectrum Management Implications*"
- Federal Office For Communications (décembre 2000), "*UMTS factsheet*"
- Flament M. (1999), "*Propagation and interference issues in a 60 GHz Mobile Network*"
- Freespaceoptics.com (2002), "*Free Space Optics History*", http://www.freespaceoptics.com/Free_Space_Optics_History.html
- Fsona (2002), "*Disaster Recovery*", application brief
- Fsona (2002), "*DSL Backhaul*", application brief
- Fsona (2002), "*Gigabit and Fast Ethernet networks*", application brief
- Fsona (2002), "*Link margin and free space optics*", application brief
- Fsona (2002), "*Mobile networks backhaul*", application brief
- Fsona (2002), "*Remote RF antenna extension*", application brief
- Fsona (2002), "*Security*", application brief
- Fsona (2002), "*SONAbeam and WiFI network integration*", application brief
- Fsona (février 2001), "*Wavelength selection for optical wireless communications systems*", white paper
- FSOnews.com (2004), "*ADC and Lightpointe team up to service wireless carriers with digivance and Flight Free Space Optics*"

- FSOnews.com (2004), "*ADC's Radio Over Fiber and Terabeam's Millimeter Wave Radio work for wireless carriers; Terrabeam's millimetre wavelength equipment pairs with ADC's Digivance*"
- Gallot H. (décembre 2002), "*Maximizing Spectral Efficiency*", Nortel Networks
- Goldstein H., Cass S. (fevrier 2004), *"A world divided by a common internet"*, IEEE Spectrum
- Graves J., Drenker S. , "*Advancing Free Space Optical communications with Adaptive Optics*"
- Groves I., "*Fundamental communications: Cellular Radio Principles*", lecture powerpoint
- Gubbins E. (mars 2003), "*AirFiber CEO calls sector dead*", TelephonyOnline.com
- Huwart J.-Y. (12 mars 2004), *"La quête aux revenus passe par la télévision sur ADSL"*, L'Echo
- IBPT (2003), "Avis de l'IBPT concernant l'offre de référence de Belgacom pour l'access dégroupé à la boucle locale, version BRUO 2003"
- IBPT (2004), *"Décision du conseil concernant l'offre de référence de Belgacom pour l'accès dégroupé à la bouche locale, version BRUO 2004"*
- IBPT (décembre 2000), *"Projet d'Arrêté royal fixant le cahier des charges et la procédure relative à l'octroi d'autorisations pour les systèmes de télécommunications mobiles de troisième génération"*
- IBPT (septembre 1999), *"Synthèse des resultants de la consultation publique relative à l'évolution du marché de la téléphonie mobile vers la troisième génération en Belgique"*
- Ikanos Communications (2003), *"A business case for universal ADSL/VDSL Interface"*
- Intel (2003), "*IEEE 802.16 and Wi-max*", white paper
- Intel, Cisco Systems (2002), "*Gigabit Ethernet over fiber and copper*"
- International Engineering Consortium, "*Local Multipoint Distributions System*"
- International Engineering Consortium, "*Remote DSLAM Solutions*" http://www.iec.org/online/tutorials/adsl_dlc/topic04.html
- International Telecom Union (2004), "*Africa: the world's fastest growing mobile market*", Press Release
- Internet Service Provider Association Belgium (2003), "*ISPA quarterly figures – Q3 2003*"
- Internet Service Provider Association Belgium (2004), "*19ième étude de marché*"
- Internet Service Provider Association Belgium (2004), "*ISPA figures 2003*"
- Inventors.about.com, "*Alexander Graham Bell's photophone*", http://inventors.about.com/library/inventors/bltelephone3.htm
- Ispreview.co.uk (mars 2004), "*Avg EU 512Kbps Price = 75Euros PM*"
- Iversen B., Glenstrup J (2000), "*Resource allocation in cellular wireless systems*"
- Johnson D. (janvier 2002), "*Media converters bridge fiber gap*", nwfusion.com
- Kivisaari E. (Avril 2003), "*60GHz MMW applications*"
- Kube E. (juin 1969), "*Nachrichtenübertragung mit lichtstrahlen in der Atmosphäre*"
- Kuhl C. (septembre 2000), *"VDSL begins carving a niche"*, Broadband Week

- Landmobile.co.uk, "*Planning ideas for 3G networks*"
- Lange A., "*Histoire de la télévision*", www.histv.free.fr
- L'Echo (2 juillet 2004), "*Tests pour la TV numérique interactive*"
- L'Echo (4 mars 2004), *"300 millions d'euros pour Broadway d'ici 3 ans"*
- L'Echo, X.D. (6 mars 2004), *"BELG' ne sera pas l'action la plus sexy"*
- Lescuyer P. (juin 2002), "*UMTS – les origines, l'architecture, la norme*", Dunod
- LightPointe Communications (2001), "*Free space optics carrier class features*"
- LightPointe Communications (2002), "*Connectivity with free space optics*", white paper
- LightPointe Communications (2002), "*Free Space Optics and fiber: Complementary technologies for today's networks*"
- LightPointe Communications (2002), "*Free space optics application: Healthcare campus network*", application note
- LightPointe Communications (2002), "*Free space optics application: Network restoration*", application note
- LightPointe Communications (2002), "*Free space optics application: Financial Institution*", application note
- LightPointe Communications (2002), "*Free space optics application: Lan-to-Lan building connectivity*", application note
- LightPointe Communications (2002), "*Free space optics application: Bridging Wireless local area network*", application note
- LightPointe Communications (2002), "*Free space optics application: Law Firm*", application note
- LightPointe Communications (2002), "*Free space optics application: SONET ring closure*", application note
- LightPointe Communications (2002), "*Free space optics application: DS3 Services*", application note
- LightPointe Communications (2002), "*Free space optics application: Education Campus Network*", application note
- LightPointe Communications (2002), "*Free space optics: A viable last mile alternative*"
- LightPointe Communications (2002), "*Free space optics: laser safety*", white paper
- LightPointe Communications (2002), "*Free Space Optics: protection of fiber via SONET ring closure*", white paper
- LightPointe Communications (2002), "*Free space optics: transmission security*"
- LightPointe Communications (2002), "*Improving service velocity*", white paper
- LightPointe Communications (2002), "*LMDS versus free space optical networks*", white paper
- LightPointe Communications (2002), "*Mobile wireless infrastructure deployment via Free-Space Optics*", white paper
- LightPointe Communications (2002), "*Understanding free space optics*", white paper
- Mackie K. (février 2003), "*Light Goes Out for Airfiber*", shorecliffcommunications.com

- Marconi (2004), "*Sqeezing costs, boosting profits – Next generation backhaul solutions for tomorrow's mobile networks*", application note
- Mdatetechnology.net (octobre 2003), "*Ultrahigh speed multi-gigabit wireless laser communication system with fully integrated high-speed microwave radio backup*"
- Messer C. (juillet 2002), "*Comparison of outdoor and indoor deployment of Free Space Optics systems*", Aoptics
- Mitchell T. (avril 2000), "*Avoiding the pitfalls of Oversubscription in DSL Networks*", xchangemag.com
- Mooney E. V. (août 2002), *"Hybrid fiber radio replaces traditional cable solutions"*, RCR wireless news
- Motsey E. (juillet 2004), *"YDI Wireless pays $3M for Ricochet"*, RCR wireless news
- Newman S. (avril 2002), "*Broadband access platforms*", McKinsey and Company
- Newsday.com (octobre 2003), "*FCC adopts rules for wireless technology*"
- Nortel Networks, "*Nortel UMTS Internet Base Station (iBTS) Indoor*", specification sheet
- Nortel Networks, "*Nortel UMTS Internet Base Station (iBTS) Mono*", specification sheet
- Nortel Networks, "*Nortel UMTS Internet Base Station (iBTS) Outdoor*", specification sheet
- Optics.org (juin 2002), "*Free Space data links: time for a reality check*"
- Opticsreport.com, (juin 2002), "*Free-space optics: telecom without the fiber*"
- Pappalardo D. (mai 2000), "*DSL oversubscription*", nwfusion.com
- Pennwell.com (décembre 2003), "*Laserbit unveils Gigapico, first member of an ultra high bandwidth FSO product series*"
- Pennwell.com (décembre 2003), "*Terabeam adds distributor for millimeter wave and free space optics systems*"
- Pennwell.com (novembre 2003), "*Canon unveils low cost, 4th-generation FSO system*"
- Pleasant W. (mars 2002), "*Gigabit MM Wave Com*", Telaxis
- Prnewswire.com (mars 2004), "*Lightpoite appoints Lawrence B. Prior III as chief operating officer*"
- Quantum-Web (mars 2004), "*European Broadband Benchmarks*"
- Raynovich R.S. (avril 2004), "*Terabeam goes for peanuts*", unstrung.com
- Rcrnews.com (novembre 2003), "*Wireless to top fixed-line services in Iraq*"
- RCRnewws.com (février 2004), "*Huawei invests in free-space optics firm*"
- Reardon M. (juillet 2002), "*The new reality of FSO*", lightreading.com
- Reardon M. (juillet 2003), "*New life for FSO?*", lightreading.com
- Red Herring (janvier 2004), "*Wi-max explained*"
- Rockwell D. (2001), "*Optical Gain and Lasers*", Fsona
- Roy Mark (novembre 2002), "*WCA: commercialise upper spectrum*", silconvalley.internet.com
- Rysavy Research (novembre 2002), "*Data capabilities for GSM Evolution to UMTS*"

- Samsung Digital (2003), "*SBSC-400 – Samsung base station controller*", Specification sheet
- Schuster J. (2002), "*Free space optics technology overview*", Terabeam
- Sidorovich Vladimir G. (2002), "*Solar background effects in wireless optical communications*"
- Siemens AG (2000), *"UMTS, giving the world a new mobility"*
- Smulders P. (2003), "*60 GHz radio: prospects and future directions*"
- SPIE's International Technical Group Newsletter (octobre 2001), "*Optics in Information Systems*"
- Stern C. (novembre 2003), "*Wireless Networks Gain Spectrum*", Washington Post
- Teong Ong J. (novembre 2002) "*Trial based study of Free Space Optics Systems in Singapore*", Nanyang Technological University
- Thetsector.com (mai 2004), "*E-band communications Licenses 71-86GHz MMIC chipset technology*"
- UMTS forum (novembre 2003), *"3G offered traffic characteristics, final report"*
- UMTSworld.com, "*Prerequisite for a 3G network design*", http://www.umtsworld.com/technology/Prerequisite.htm
- Viinikainen A. (octobre 2003), "*The cellulal concept – System design fundamentals*"
- Villemoes P. (septembre 2000), "*Nordic research networks*"
- Walsh J. (juillet 2004), "fSona announces new scalable 2.5 Gbps Free Space Optical Wireless Systems"
- Warwick M. (mars 2004), "*Report reveals European broadband still expensive*", telecomtv.com
- Young M. F. (février 2004), "*Planning a Microwave Radio Link*", YDI

Personnes et sociétés contactées

Nom	Société	Type société
Anonyme	IRM	Institut Royal Météorologique
Anonyme	Cebeo	Distributeur de matériel électrionique
An Desterbeck	Base	Opérateur mobile
Annick Bombeeck	Proximus	Opérateur mobile
Bart Pen	Multicap	Distributeur d'équipement sans fil
David Erzeel	IBPT	Institut Belge des Services Postaux et des télécommunications
Dominique Bayart	Alcatel	Equipementier réseau
Eric Hauwaert	Dolmen	Implémentation de réseaux
Eric Mannie	Intairlink	Opérateur réseau de réseau sans fil à Bruxelles
Erwin Jansens	Mulder & Hardenberg	Distributeur d'équipement sans fil
Fernando Formigal	Actipole	Constructeur de dispositifs optiques sans fil
Frédéric Gochel	Dinh Telecom	Etude et conception d'équipements de haute technologie
José Dumoulin	Belgacam	Opérateur adsl et de téléphonie fixe
Luc Mathys	Dolmen	Implémentation de réseaux
Nele Debroyer	Coditel	Opérateur réseau câblé
Nicolas parmentier	Belgacom	Opérateur adsl et de téléphonie fixe
Olivier Furdelle	Proximus	Opérateur mobile
Rik Reynaers	ISPA	Association des fournisseurs Internet belges
Tanguy Popeler	Proximus	Opérateur mobile
Thierry Bouckaert	Mobistar	Opérateur mobile
Vincent Bultot	Proximus	Opérateur mobile
Yves Renard	Belgacom	Opérateur adsl et de téléphonie fixe

Annexe n°1: Specifications des dispositifs optiques et hertziens (source : distributeurs OSF et hertziens, sites de vente en ligne, dépliants)

DISPOSITIFS OPTIQUES

Fsona

Modèle	Bande passante	Portée sur dépliant	Prix	Consommation électrique
8-E	8 Mbps	4950 m	€14 348	20 Watts
52-E	52 Mbps	3850 m	€15 913	20 Watts
155-E	155 Mbps	2600 m	€17 739	20 Watts
155-S	155 Mbps	3850 m	€18 000	35 Watts
622-S	622 Mbps	3300 m	€31 303	35 Watts
1250-S	1250 Mbps	3200 m	€52 000	35 Watts
52-M	52 Mbps	6700 m	€28 000	50 Watts
155-M	155 Mbps	5700 m	€30 000	50 Watts
622-M	622 Mbps	4500 m	€46 956	50 Watts
1250-M	1250 Mbps	3300 m	€73 043	50 Watts

Lightpointe

Modèle	Bande passante	Portée sur dépliant	Prix	Garantie annuelle
FL10	10 Mbps	550 m	€4 678	€900
FL52E	52 Mbps	2000 m	€12 178	€900
FL52EW	52 Mbps	1300 m	€12 178	€900
FL155	155 Mbps	800 m	€7 865	€900
FL155E	155 Mbps	1500 m	€13 115	€900
FLG	1250 Mbps	800 m	€18 740	€1100
FS-52	52 Mbps	1000 m	€19 678	€2800
FS-52E	52 Mbps	1000 m	€22 490	€2800
FS-52EW	52 Mbps	1300 m	€22 490	€2800
FS-155	155 Mbps	2000 m	€23 428	€2800
FS-155E	155 Mbps	4000 m	€28 115	€2800
FS-622	622 Mbps	1310 m	€43 115	€2800
FSG	1250 Mbps	850 m	€43 115	€2800
FSA-52	52 Mbps	2000 m	€22 303	€2800
FSA-52E	52 Mbps	4000 m	€25 303	€2800
FSA-52EW	52 Mbps	4000 m	€25 303	€2800
FSA-155	155 Mbps	2000 m	€25 115	€2800
FSA-155E	155 Mbps	4000 m	€29 990	€2800
FSA-155EW	155 Mbps	4000 m	€29 990	€2800
FSA-622	622 Mbps	1600 m	€44 990	€2800
FSAG	1250 Mbps	1100 m	€45 928	€2800
FSX	2500 Mbps	1000 m	€98 432	€12000

DISPOSITIFS HERTZIENS A MICRO-ONDES (Proxim)

Modèle	Bande Passante	Portée su dépliant	Prix	Fréquence (GHz)	MTBF	Consommation électrique	Latence
Lynx HD	6 à 15 Mbps	70 Km	€8500	2,4 / 5,8	5 ans	45 watts	500 µs
Lynx GX	6 à 24 Mpbs	50 Km	€10000	5,8	5 ans	70 watts	325 µs
Lynx DS3	45 Mbps	25 Km	€11000	5,3 / 5,8	5 ans	45 watts	250 µs
Lynx OC-3	155 Mbps	11 Km	€18000	5,3 / 5,8	5 ans	100 watts	?
Tsunami Quickbridge 11	11 Mbps	?	€1500	2,4	7 ans		
Tsunami Quickbridge 20	18 Mbps	10 Km	€3000	5,8	7 ans	?	2500 à 5000 µs
Tsunami Quickbridge 60	54 Mbps	5 Km	€4000	5,8	7 ans		2500 à 5000 µs
Tsunami 100BaseT/F	100 Mbps	8 Km	€12000	plein	7 ans	45 watts	500 µs
Tsunami 1000BaseSX	420 Mbps	11Km	€38000	5,3 / 5,8	7 ans		500 µs

DISPOSITIFS HERTZIENS MILLIMETRIQUES

Terabeam (Modèles à 60 GHz)

Modèle	Bande passante	Portée dépliants	Prix	Garantie annuelle
Gigalink 6221	100 Mpbs	Short Range	$14 875	$1 700
Gigalink 6232	155 Mbps	Short Range	$15 750	$1 800
Gigalink 6421	100 Mpbs	Medium Range	$19 250	$2 200
Gigalink 6432	155 Mpbs	Medium Range	$21 437	$2 240
Gigalink 6442	622 Mpbs	Medium Range	$33 250	$3 800
Gigalink 6451	1250 Mpbs	Medium Range	$45 541	$4 200

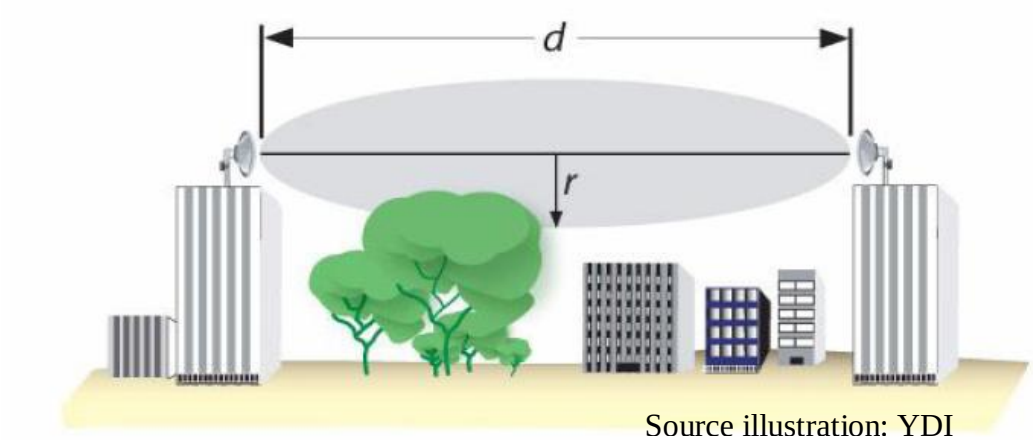
Fiberleap (Modèles à 60 GHz)

Modèle	Bande passante	Prix	Consommation électrique	Portée dépliants
OC-12	622 Mbps	$43 989	50 Watts	1000 m
Gigabit ethernet	1250 Mbps	$54 106	50 Watts	800 m

ANTENNES (SAF)

Diamètre	Prix par unité
20 Pouces	380 €
40 Pouces	765 €
60 Pouces	1755 €

Annexe n°2. Diamètre (m) de la zone de Fresnel en fonction de la distance du lien et de la fréquence.



Source illustration: YDI

	Fréquence (GHz)						
	11,03	2	5	10	23	40	60
Distance (m)							
100	3,9	2,5	1,7	1,2	0,9	0,7	
200	5,5	3,5	2,5	1,6	1,2	1,0	
300	6,8	4,3	3,0	2,0	1,5	1,2	
400	7,8	4,9	3,5	2,3	1,7	1,4	
500	8,7	5,5	3,9	2,6	2,0	1,6	
600	9,6	6,0	4,3	2,8	2,1	1,7	
700	10,3	6,5	4,6	3,0	2,3	1,9	
800	11,0	7,0	4,9	3,3	2,5	2,0	
900	11,7	7,4	5,2	3,5	2,6	2,1	
1000	12,3	7,8	5,5	3,6	2,8	2,3	
1100	12,9	8,2	5,8	3,8	2,9	2,4	
1200	13,5	8,5	6,0	4,0	3,0	2,5	
1300	14,1	8,9	6,3	4,1	3,1	2,6	
1400	14,6	9,2	6,5	4,3	3,3	2,7	
1500	15,1	9,6	6,8	4,5	3,4	2,8	
1600	15,6	9,9	7,0	4,6	3,5	2,8	
1700	16,1	10,2	7,2	4,7	3,6	2,9	
1800	16,5	10,5	7,4	4,9	3,7	3,0	
1900	17,0	10,8	7,6	5,0	3,8	3,1	
2000	17,4	11,0	7,8	5,1	3,9	3,2	
2100	17,9	11,3	8,0	5,3	4,0	3,3	
2200	18,3	11,6	8,2	5,4	4,1	3,3	
2300	18,7	11,8	8,4	5,5	4,2	3,4	
2400	19,1	12,1	8,5	5,6	4,3	3,5	
2500	19,5	12,3	8,7	5,8	4,4	3,6	
2600	19,9	12,6	8,9	5,9	4,4	3,6	
2700	20,3	12,8	9,1	6,0	4,5	3,7	
2800	20,6	13,1	9,2	6,1	4,6	3,8	
2900	21,0	13,3	9,4	6,2	4,7	3,8	
3000	21,4	13,5	9,6	6,3	4,8	3,9	
3100	21,7	13,7	9,7	6,4	4,9	4,0	
3200	22,1	14,0	9,9	6,5	4,9	4,0	
3300	22,4	14,2	10,0	6,6	5,0	4,1	
3400	22,7	14,4	10,2	6,7	5,1	4,2	
3500	23,1	14,6	10,3	6,8	5,2	4,2	
3600	23,4	14,8	10,5	6,9	5,2	4,3	
3700	23,7	15,0	10,6	7,0	5,3	4,3	
3800	24,0	15,2	10,8	7,1	5,4	4,4	
3900	24,4	15,4	10,9	7,2	5,4	4,4	

Annexe n°3. Monographe de Sidorovich et son mode d'emploi.

Nomograph for estimation of time and duration of link unavailability due to solar radiation periods for a free-space optical communication link

Legend
The readings along the horizontal axis of the nomograph mean the true local time for the location of the FSO communication terminal (i.e. the time corresponding to the Sun crossing the local meridian at noon); the readings along the vertical axis are days of the year. At the same time, along the horizontal and vertical axes readings are shown correspondingly for the azimuth and elevation angles of the communication link direction (seen from the terminal). The angular scale factor is the same for both axes.

The sine wave line shows the Sun motion across the sky, with the zero point corresponding to East (90° azimuth), and the maximum position at the South (180° azimuth). The sine wave amplitude is 90°-S, where S is the site latitude in degrees. The sine wave amplitude in the presented Nomograph is 44.5°, corresponding to the latitude of Boston, Massachusetts (USA); for any other latitude a sine wave may be drawn on a transparency with the corresponding scale factor, and laid over the presented nomograph, with the zero points at the same places as in the presented drawing.

Knowing the communication link direction (azimuth and elevation values), the user measures (with a ruler) the elevation in the nomograph scale and, along the corresponding azimuth vertical line, adds the result to the given day coordinate (up from the corresponding day line for a positive elevation). The distance between the resulting point and the sine wave line shows what is possible: direct Sun illumination of the photodetector (if the distance is less than 1° in
the nomograph scale), or scattered illumination capable to affect the communications (up to 15°). Corresponding circles may be also drawn on a transparency. The time during which the resulting point is within such a distance from the curve (in the horizontal scale) is the time and duration of a corresponding dangerous period at the given day.

Moving the ruler along the corresponding azimuth line, the user can see the days of year when dangerous periods are possible at all.

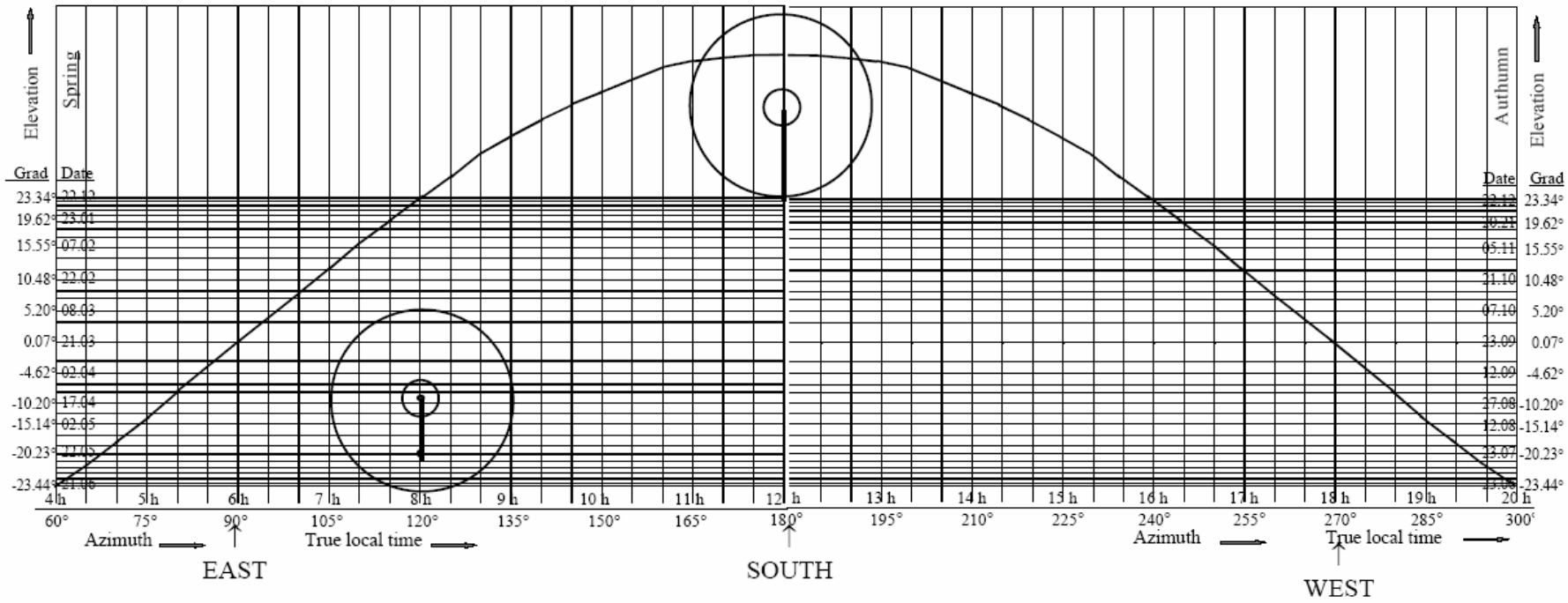
It can be seen from the nomograph that in some zones of the link direction the terminal–s operation cannot be affected by solar radiation at all.

For a transition from true local time to the time actually accepted in the region, it is necessary to add to the first one an amount depending on the site longitude, which can be easily calculated for any time zone. Besides this, a small amount of time should be added for difference between the true local time and the mean solar time; the difference depends on the day of year is taken from astronomical tables. It may be tabulated with a sufficient accuracy for any year.

To make this easy, the total time correction value for any particular day may be simply calculated with help of a local calendar providing times of sunrise and sunset: for the selected day, take the sum of sunrise and sunset times in hours and minutes, divide it by 2 and subtract 12 h 00 m from the result. The obtained value should be added to the true local time shown at the nomograph horizontal axis to get the time on your watch.

It is also possible to present the nomograph as a computer program for a PC of any type.

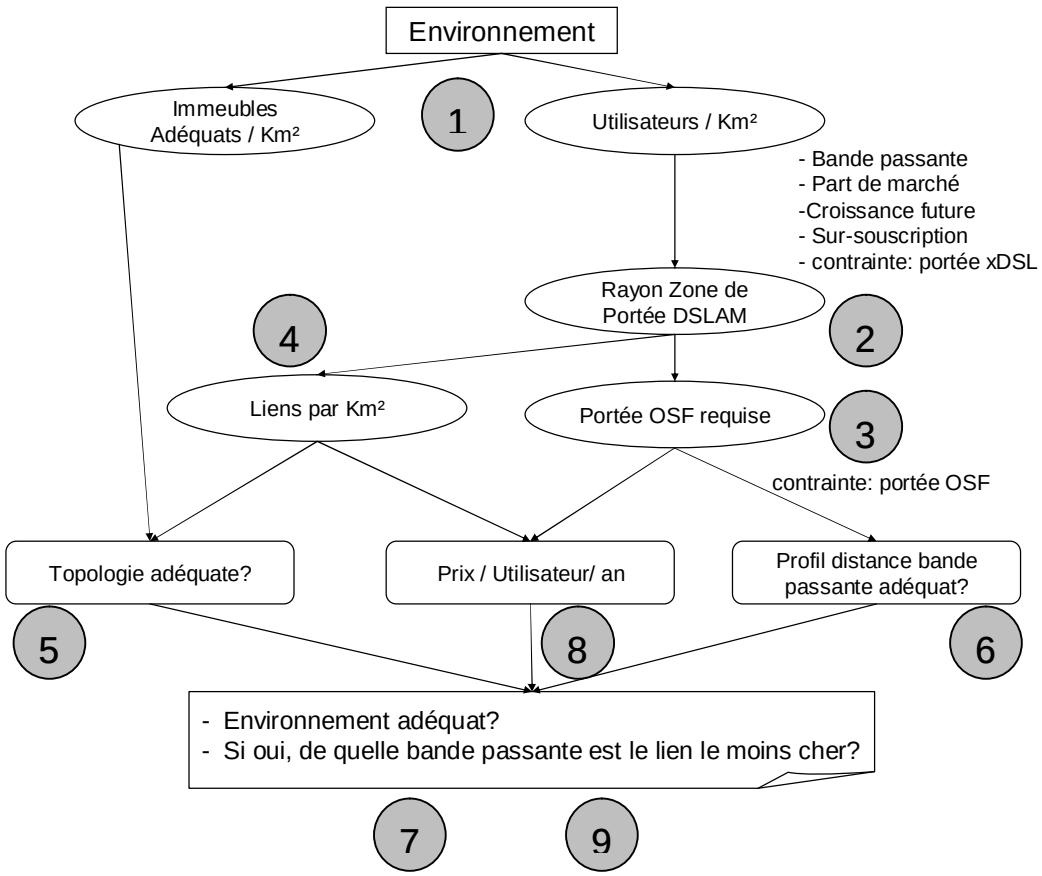
Nomograph for estimation of time and duration of link unavailability due to solar radiation periods for a free-space optical communication link



July 28: azimuth 120°, elevation 10°

December 22: azimuth 180° (South), elevation 15°

Annexe n°4. Fonctionnement détaillé du modèle xDSL



1. Variables fournies au modèle

Trois variables sont fournies au modèle:

- La densité d'utilisateurs de connexions à large bande par km² (D). Celle-ci a été définie par commune belge à partir de statistiques concernant le nombre de ménages et la superficie et en supposant une pénétration des ménages de 22%.
- Le nombre d'immeubles adéquats par km² (I). Ce nombre a été défini par commune belge comme étant égal à un tiers des immeuble de 6 étages ou plus.
- La bande passante du lien OSF agrégeant le trafic d'un DSLAM (B_p). Nous avons étudié les bandes passantes typiques proposées par les fabricants de dispositifs OSF (10, 50, 155, 622, 1250 et 2500 Mbps). Dans chaque commune analysée, le modèle fournit des résultats pour les différentes bandes passantes étudiées.

Les données fournies au modèle sont disponible dans l'Annexe n°5

2. Calcul du rayon requis de la zone de portée d'un DSLAM

Afin de déterminer le rayon requis de la zone de portée d'un DSLAM, deux contraintes sont étudiées.

A. Bande passante du lien optique sans fil

Il faut que le rayon de la zone de portée du DSLAM soit tel que la bande passante requise par le nombre d'utilisateurs couverts ne soit ni trop grande, ni trop petite par rapport à la bande passante du lien optique sans fil utilisé.

Calcul de la bande passante par utilisateur (B_u*)*

La bande passante à prévoir par utilisateur dans le lien optique dépend des différents facteurs discutés dans notre étude et sur lesquels nous avons posé des hypothèses:

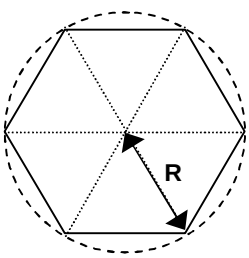
- La bande passante maximale offerte (B_{dsl})
- La fraction de cette bande passante qui est garantie (G)
- La fraction d'utilisateurs connectés simultanément à l'heure de pointe (C_s)
- La part de marché de l'opérateur xDSL (P_m)
- La croissance future du nombre d'abonnés de l'opérateur (Cr)

Une fois que ces facteurs ont été définis, la bande passante à prévoir par utilisateur peut être calculée par la formule suivante:

$$B_u = B_{DSL} \cdot G \cdot C_S \cdot P_m \cdot (1 + Cr)$$

*Calcul du rayon permettant de remplir la capacité du lien optique (*R*)*

Pour calculer ce rayon, il faut déterminer la relation liant celui-ci à la superficie de la zone de portée du DSLAM. Il n'est pas possible d'assimiler cette zone à un cercle, comme cette forme entraînerait obligatoirement la superposition de zones et compliquerait le calcul de la contribution d'un DSLAM à la couverture. Nous supposerons donc une forme hexagonale dont les proportions et la superficie sont relativement faciles à calculer. La superficie d'un hexagone est en effet égale à celle de six triangles équilatéraux de côté R et peut donc être calculée par la formule suivante:

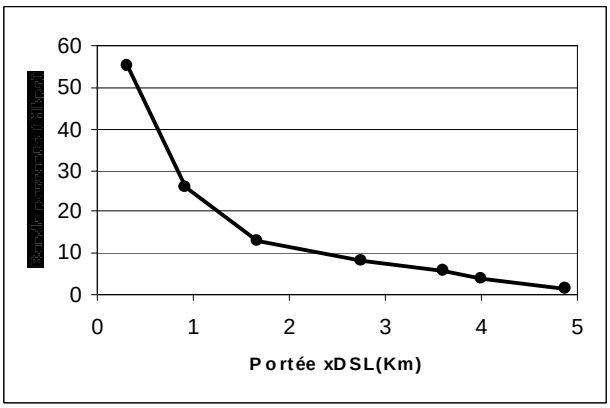


$$Surface = 6 \times \frac{R \times R \cdot \cos(30)}{2} = 3 \cdot R^2 \cdot \cos(30)$$

Connaissant la bande passante requise par utilisateur (B_u), celle du lien OSF (B_p) ainsi que la densité d'utilisateurs (D), nous pouvons alors calculer le rayon (R) permettant de remplir la capacité du lien optique:

$$R = \sqrt{\frac{B_p}{B_u \cdot D \cdot 3 \cdot \cos(30)}}$$

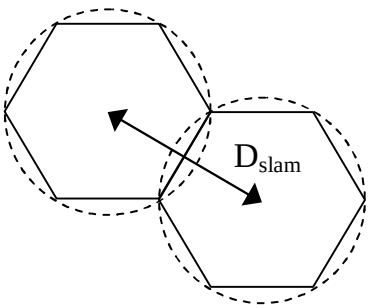
B. Distance maximale entre le DSLAM et l'utilisateur



La distance maximale entre le DSLAM et un utilisateur du service est inversement proportionnelle à la bande passante maximale offerte (B_{dsl}). Le graphique à gauche décrit les hypothèses qui ont été posées quant aux capacités de la technologie xDSL en terme de distance et de bande passante. Les points représentés sont déduits de performances décrites sur dslforum.org et dans d'autres sources. Entre ces points, le modèle calcule les performances par une approximation linéaire représentée par les droites liant les points.

Après avoir calculé le rayon selon ces deux contraintes, le modèle sélectionne la plus petite des deux valeurs comme rayon requis de la zone de portée du DSLAM.

3. Calcul de la distance requise entre deux DSLAM



En connaissance du rayon de la zone de portée d'un DSLAM que nous venons de déterminer, Il est ensuite facile de calculer la distance entre deux DSLAM (D_{slam}) qui devrait être couverte par un lien OSF.

$$D_{SLAM} = 2 \cdot R \cdot \cos(30)$$

4. Calcul du nombre de liens requis par km² couvert

Sachant qu'un lien permet d'alimenter un DSLAM, le nombre de liens requis par km² couvert (D_{liens}) peut être fourni par la formule suivante:

$$D_{liens} = \frac{1}{3 \cdot R^2 \cdot \cos(30)}$$

Remarquons que cette valeur est égale à la densité de DSLAM.

5. Test de topologie adéquate

Pour que la topologie de l'environnement soit adéquate, il faut que la densité d'immeubles adéquats (I), pouvant servir de support à un lien optique sans fil, soit au moins égale à la densité de DSLAM (D_{liens}). La règle de décision suivante est donc utilisée pour déterminer si la topologie de l'environnement est adéquate ou non:

Si $I \geq D_{liens}$: $A_t = 1$ (La topologie de l'environnement est adéquate)
Si $I < D_{liens}$: $A_t = 0$ (La topologie de l'environnement n'est pas adéquate)

6. Test de profil "distance-bande passante" adéquat

En fonction de la bande passante du lien OSF qui lui a été fournie, le modèle a calculé la distance D_{slam} qui devrait être couverte par ce lien. Cette distance est maintenant comparée à la portée compétitive des dispositifs OSF (D_{comp}):

Si $D_{slam} \leq D_{comp}$: $A_{dbp} = 1$ (l'environnement est adéquat pour le profil DBP)
Si $D_{slam} > D_{comp}$: $A_{dbp} = 0$ (l'environnement n'est pas adéquat pour le profil DBP)

7. Test d'environnement adéquat

Nous dirons que l'environnement est adéquat à l'utilisation d'un dispositif OSF d'une bande passante donnée entre le CO et le DSLAM d'un réseau ADSL s'il est adéquat à la fois du point de vue de la topologie et du profil "distance-bande passante" requis. La variable binaire "Environnement adéquat" (A_e) est donc égale au produit des variables binaires "Topologie adéquate" et "Profil distance-bande passante adéquat":

$$A_e = A_t \times A_{dbp}$$

8. Prix par utilisateur et par an

Le coût de revient annuel de la connexion CO - DSLAM par utilisateur et par an est ensuite déterminé dans chaque commune adéquate pour tous les dispositifs de bande passante adéquate. Ce calcul est effectué par le modèle de coûts précédemment réalisé qui détermine le coût annuel équivalent d'un lien OSF en fonction de la distance et de la bande passante requise. Pour obtenir le coût par utilisateur, il suffit ensuite de diviser le coût du lien par le nombre d'utilisateurs qu'il permet de desservir, obtenu en multipliant la densité d'utilisateurs (D) par la surface couverte par un DSLAM ($1/D_{liens}$).

$$C_u = C_l\left(D_{SLAM}, B_p\right).\frac{D_{liens}}{D}$$

9. Sélection du dispositif le moins cher

Le modèle sélectionne ensuite pour chaque commune adéquate le dispositif adéquat le moins cher par utilisateur et élimine les autres dispositifs. Au terme de cette opération, il ne subsiste donc plus qu'un seul dispositif adéquat par commune.

Annexe n°5. Données fournies au modèle xDSL

Source: Institut National des Satistiques

COMMUNE	Ménages / km²	Immeubles > 5 étag. / km²
Aalter	85,5	0,1
Aarschot	190,9	0,1
Aartselaar	514,2	2,3
Affligem	257,8	0
Aiseau-Presles	194,4	0
Alken	146,5	0,1
Alost	430,3	1,3
Alveringem	23,2	0
Amay	193,4	0,1
Amblève	14,9	0
Andenne	113	0,2
Anderlecht	2418,7	10,5
Anderlues	282,6	0,4
Anhée	42,8	0
Ans	514	1
Anthisnes	42	0,1
Antoing	100,3	0
Anvers	1072,9	12,3
Anzegem	125,5	0
Ardooie	103	0
Arendonk	81,9	0
Arlon	91,6	0,2
As	126,4	0
Asse	237,6	0,4
Assenede	62,3	0
Assesse	29	0
Ath	88,1	0,1
Attert	21,4	0
Aubange	135,7	0,2
Aubel	80,9	0
Audenarde	168,1	0,1
Auderghem	1571,2	13,2
Avelgem	170,1	0,1
Awans	123,5	0
Aywaille	55,6	0
Baelen	17,5	0
Baerle-Duc	121,5	0,4
Balen	106,7	0
Bassenge	86,3	0
Bastogne	30,3	0,1
Beaumont	29,1	0
Beauraing	18,8	0

COMMUNE	Ménages / km²	Immeubles > 5 étag. / km²
Beauvechain	60,1	0
Beernem	76,2	0
Beerse	158,7	0,1
Beersel	299,8	0,1
Begijnendijk	201,5	0
Bekkevoort	59,6	0
Beloeil	90	0
Berchem- S. A.	2935,7	20
Beringen	188,3	0,1
Berlaar	163,1	0,1
Berlare	146,2	0
Berloz	74,3	0
Bernissart	106	0
Bertem	113,9	0
Bertogne	11,2	0
Bertrix	23,3	0
Beveren	118,9	0,3
Beyne-Heusay	679,6	0
Bierbeek	82,4	0,1
Bilzen	147,7	0,1
Binche	225,3	0,3
Bièvre	11,1	0
Biévène	38,8	0,1
Blankenberge	499,4	16,2
Blégny	185,8	0
Bocholt	74,9	0,1
Boechout	214,6	0,6
Bonheiden	183,2	0
Boom	927,3	4,1
Boortmeerbeek	238,1	0,1
Bornem	172,8	0,2
Borsbeek	1140,2	5,9
Bouillon	16	0
Bourg-Léopold	252,1	0,2
Boussu	419,5	0,5
Boutersem	89,7	0
Braine-l'Alleud	271,7	0,5
Braine-le-Chât.	157,5	0
Braine-le-Comte	96,9	0,3
Braives	48,8	0
Brakel	96,9	0
Brasschaat	389,4	0,5

COMMUNE	Ménages / km²	Immeubles > 5 étag. / km²
Brecht	105,3	0,1
Bredene	466,5	2,8
Bree	84,4	0,1
Brugelette	48,2	0
Bruges	364,4	1,3
Brunehaut	63,6	0
Bruxelles	2172,2	32,1
Buggenhout	217,5	0
Bullange	13,4	0
Burdinne	33,5	0
Burg-Reuland	13,4	0
Butgenbach	21,5	0
Celles	30,8	0
Cerfontaine	21,8	0
Chapelle-lez-H.	315,6	0,1
Charleroi	917,8	3,7
Chastre	72,6	0
Chaudfontaine	333,9	0,4
Chaumont-Gist.	83,6	0
Chimay	20,2	0
Chiny	17,5	0
Chièvres	52,3	0,1
Châtelet	570,2	0,7
Ciney	40,3	0,1
Clavier	20	0
Colfontaine	619,3	0,1
Comblain-A.P.	95,7	0
Comines-Warn.	115,9	0
Courcelles	274,8	0,1
Court-Saint-Eti.	128,3	0,2
Courtrai	394,4	1,8
Couvin	27,8	0
Crisnée	63,2	0
Dalhem	66,3	0
Damme	45,8	0
Daverdisse	10,2	0
De Haan	123,9	4,3
De Pinte	208,2	0,1
Deerlijk	261,7	0,2
Deinze	147,3	0,5
Denderleeuw	508,7	0,2
Dentergem	113,4	0,1
Dessel	124,8	0,1
Destelbergen	255,7	0,2
Diepenbeek	162,4	0

COMMUNE	Ménages / km²	Immeubles > 5 étag. / km²
Diest	157,8	0,4
Dilbeek	379,3	0,9
Dilsen-Stokkem	105,8	0
Dinant	55,2	0,2
Dison	422,8	0,3
Dixmude	40,9	0
Doische	14	0
Donceel	43,9	0
Dour	211,3	0,1
Drogenbos	808,1	0,4
Duffel	280,7	0,1
Durbuy	26,9	0
Ecaussinnes	115,8	0,1
Edegem	1054,4	4,3
Eeklo	277,9	1,1
Eghezée	49,7	0
Ellezelles	51,1	0
Enghien	113,9	0
Engis	85,2	0
Erezée	14,5	0
Erpe-Mere	221,9	0,1
Erquelinnes	89,7	0
Esneux	170	0,1
Espierres-Helchin	73,9	0
Essen	131,9	0,1
Estaimpuis	119,9	0
Estinnes	41,7	0
Etalle	24,1	0
Etterbeek	7123,8	102,6
Eupen	76,9	0,1
Evere	3064,1	25,7
Evergem	164	0,1
Faimes	44,3	0
Farciennes	421,3	0,7
Fauvillers	9,4	0
Fernelmont	36,4	0
Ferrières	30,6	0
Fexhe-le-H. C.	61,2	0
Fleurus	155,2	0,1
Flobecq	54,7	0
Floreffe	73,1	0
Florennes	31,4	0
Florenville	16,1	0
Flémalle	305,1	0,2
Fléron	488,2	0,9

COMMUNE	Ménages / km²	Immeubles > 5 étag. / km²		COMMUNE	Ménages / km²	Immeubles > 5 étag. / km²
Fontaine-l'Evêq.	257,8	0,2		Hastière	41,9	0
Forest	3629,6	62,7		Havelange	16,9	0
Fosses-la-Ville	56,2	0		Hechtel-Eksel	55,2	0
Fourons	32	0		Heers	50	0
Frameries	347,1	0,1		Heist-op-den-B.	177,5	0,1
Frasnes-lez-A.	38,6	0		Hemiksem	738,5	1,8
Froidchapelle	16,5	0		Hensies	100,9	0
Furnes	47,3	0		Herbeumont	10,8	0
Gammerages	88,9	0		Herck-la-Ville	105,9	0
Gand	693,1	4		Herent	221,1	0,2
Ganshoren	4180,1	64,4		Herentals	218,7	0,2
Gavere	147,7	0		Herenthout	141,1	0
Gedinne	11,7	0		Herne	54,4	0
Geel	125,2	0,2		Herselt	103,9	0
Geer	42	0		Herstal	681,1	0,9
Geetbets	66,1	0		Herstappe	27,3	0
Gembloux	88,6	0,2		Herve	112	0,3
Genappe	59,9	0		Herzele	137	0
Genk	262,2	0,8		Heusden-Zolder	202,9	0,1
Gerpinnes	102,4	0		Heuvelland	33,7	0
Gesves	34	0		Hoegaarden	71,7	0
Gingelom	53,5	0		Hoeilaart	197,2	0
Gistel	103,1	0,1		Hoeselt	118,1	0,1
Glabbeek	72,1	0		Holsbeek	86	0,1
Gooik	83,9	0		Honnelles	46,9	0
Gouvy	11,2	0		Hooglede	94,9	0,1
Grammont	161,2	0,1		Hoogstraten	64,8	0
Grez-Doiceau	80,3	0		Horebeke	63,5	0
Grimbergen	365,4	0,8		Hotton	33,2	0
Grobbendonk	144,4	0		Houffalize	11	0
Grâce-Hollogne	280,1	0,2		Houthalen-Helch.	130,2	0,2
Haacht	168,7	0,1		Houthulst	61,6	0
Haaltert	230,1	0		Houyet	14,3	0
Habay	26,8	0		Hove	498,2	0,3
Hal	322,9	0,4		Huldenberg	87,3	0
Halen	92,5	0,1		Hulshout	209,6	0,1
Ham	113,6	0		Huy	193,9	0,6
Ham-sur-H.N.	114,7	0		Hélécine	73,5	0
Hamme	225,9	0		Héron	42,4	0
Hamoir	54,3	0		Ichtegem	115,6	0
Hamois	31,4	0		Incourt	42,5	0
Hamont-Achel	120,1	0,1		Ingelmunster	258,2	0
Hannut	62,1	0,2		Ittre	65,3	0
Harelbeke	361,6	0,6		Ixelles	7225,3	108,9
Hasselt	290	1,4		Izegem	424,4	0,5

COMMUNE	Ménages / km²	Immeubles > 5 étag. / km²		COMMUNE	Ménages / km²	Immeubles > 5 étag. / km²
Jabbeke	94,1	0		Ledegem	142,8	0
Jalhay	26,9	0		Lendelede	159,5	0
Jemeppe-sur-S.	150,2	0		Lennik	109,5	0
Jette	3881	40,6		Lens	32	0
Jodoigne	63,5	0,1		Les Bons Villers	78,8	0
Juprelle	92,2	0		Lessines	99,1	0,1
Jurbise	63,9	0		Leuze-en-Hain.	73,2	0,1
Kalmthout	108,8	0,1		Libin	12,4	0
Kampenhout	123,1	0,1		Libramont-Chev.	20,3	0
Kapelle-O-D-Bos	226,3	0,1		Lichtervelde	123,9	0
Kapellen	276,9	0,6		Liedekerke	476,8	0
Kaprijke	69,7	0		Lierde	96,6	0
Kasterlee	91,3	0,1		Lierneux	13,8	0
Keerbergen	251,6	0,1		Lierre	280,5	0,7
Kinrooi	78,2	0		Lille	95,4	0,1
Kluisbergen	78,8	0		Limbourg	91,7	0
Knesselare	85,3	0		Lincent	75,3	0
Knokke-Heist	281,1	21,4		Linkebeek	466,3	1
Koekelare	83,1	0		Lint	512,1	1,4
Koekelberg	6854,8	122,8		Linter	75,2	0,1
Koksijde	215,5	10,1		Liège	1390	12,9
Kontich	324,8	0,8		Lo-Reninge	18,9	0
Kortemark	83,9	0,1		Lobbes	68,6	0
Kortenaken	59,4	0		Lochristi	119,6	0
Kortenberg	205,3	0,1		Lokeren	217,5	0,2
Kortessem	87,6	0		Lommel	115,8	0
Kraainem	852,8	1,9		Londerzeel	188,5	0
Kruibeke	175,9	0,2		Lontzen	67,9	0
Kruishoutem	64,2	0		Looz	77,2	0
Kuurne	498,1	0,5		Louvain	773,3	5,5
La Bruyère	54,1	0		Lovendegem	187,1	0,1
La Calamine	247,8	0,1		Lubbeek	108,9	0
La Hulpe	189,3	0,4		Lummen	96,8	0,1
La Louvière	511,5	0,9		Léau	67	0,2
La Panne	199,2	6,9		Léglise	8,2	0
La Roche-en-Ar.	12,3	0		Maarkedal	50,1	0
Laakdal	136,1	0		Maaseik	117,8	0,1
Laarne	143,5	0,1		Maasmechelen	175,9	0,2
Lanaken	162,3	0,3		Machelen	430,2	0,8
Landen	110	0,1		Maldegem	93,2	0
Langemark-PK	55,3	0		Malines	501,6	2,2
Lasne	108,2	0		Malle	99,8	0
Le Roeulx	73,3	0		Malmedy	48,3	0,1
Lebbeke	264,3	0,1		Manage	453,4	0,2
Lede	231,2	0		Manhay	9,8	0

COMMUNE	Ménages / km²	Immeubles > 5 étag. / km²		COMMUNE	Ménages / km²	Immeubles > 5 étag. / km²
Marche-en-F.	53,6	0,1		Ninove	197,4	0,4
Marchin	66,4	0		Nivelles	177,8	0,6
Martelange	20,8	0		Ohey	28	0
Meerhout	98,9	0,1		Olen	183,7	0
Meeuwen-Gruit.	48,4	0		Olne	90,1	0
Meise	200,3	0,1		Onhaye	18,2	0
Meix-devant-Virt.	20,2	0		Oosterzele	115,2	0
Melle	271,9	0,3		Oostkamp	104,7	0
Menin	406,1	0,8		Oostrozebeke	169,4	0,1
Merbes-le-Chât.	53,5	0		Opglabbeek	134,8	0
Merchtem	157	0,1		Opwijk	234,7	0,1
Merelbeke	234,6	0,2		Oreye	74,7	0
Merksplas	62,4	0		Orp-Jauche	58,4	0
Messancy	51,4	0		Ostende	905,7	26,2
Messines	110,4	0		Ottignies-LLN	367,9	1,7
Mettet	37,9	0		Oud-Heverlee	122,2	0,1
Meulebeke	144,7	0,1		Oud-Turnhout	119,7	0,1
Middelkerke	105,9	6,5		Oudenburg	97,8	0
Modave	37,8	0		Ouffet	24,3	0
Moerbeke	61,3	0		Oupeye	271,1	0,3
Mol	113	0,1		Overijse	206,1	0
Molenbeek-SJ	5690,8	63,8		Overpelt	121,1	0,1
Momignies	24,5	0		Paliseul	17,2	0
Mons	291,7	0,7		Pecq	64,1	0
Mont-Saint-Guib.	134,1	0,4		Peer	64,1	0,1
Mont-de-l'Enclus	48,3	0		Pepingen	41,5	0
Montaigu-Zich.	180,7	0,1		Pepinster	151,7	0
Montigny-le-Till.	291	0,5		Perwez	53,4	0
Moorslede	116,8	0,1		Philippeville	22,3	0
Morlanwelz	368,8	0,5		Pittem	70,9	0,1
Mortsel	1346,4	7,6		Plombières	70,2	0
Mouscron	550	1,2		Pont-à-Celles	113,7	0
Musson	44,8	0		Poperinge	63,5	0
Namur	265,3	1,4		Profondeville	84,3	0
Nandrin	55,3	0		Putte	176,9	0,1
Nassogne	17,1	0		Puurs	187	0,1
Nazareth	115,7	0		Péruwelz	111,6	0
Neerpelt	139,2	0,3		Quaregnon	708,9	0,4
Neufchâteau	21,5	0		Quiévrain	130,2	0
Neupré	123,5	0		Quévy	46,7	0
Nevele	81,1	0		Raeren	55	0,1
Niel	693,6	1,5		Ramillies	42,6	0
Nieuport	153,7	6,7		Ranst	151	0,3
Nieuwerkerken	110,3	0		Ravels	53	0
Nijlen	206,2	0,2		Rebecq	98,3	0,1

COMMUNE	Ménages / km²	Immeubles > 5 étag. / km²
Remicourt	86,4	0
Renaix	290	0,3
Rendeux	13,2	0
Retie	78,6	0
Rhode-Saint-G.	289	0,1
Riemst	105,8	0
Rijkevorsel	84,2	0
Rixensart	483,6	0,5
Rochefort	29,4	0
Roosdaal	185,8	0
Rotselaar	152,2	0,2
Roulers	380,2	1,4
Rouvroy	27,1	0
Ruiselede	64,1	0
Rumes	83,3	0
Rumst	286	0,2
Saint-Georg.-SM	124,7	0
Saint-Ghislain	133,5	0,1
Saint-Gilles	8878,9	123,6
Saint-Hubert	20,4	0
Saint-Josse-TN	8971,4	65,7
Saint-Léger	33,7	0
Saint-Nicolas(F)	343,1	0,9
Saint-Nicolas(W)	1465,8	2,3
Saint-Trond	147	0,3
Saint-Vith	23,5	0
Sainte-Ode	8,7	0
Sambreville	330,8	0,3
Schaerbeek	6163,3	68,8
Schelle	397,2	0,6
Schilde	206,5	0,2
Schoten	456,3	1,7
Seneffe	67,8	0
Seraing	797,3	1,7
Silly	42,8	0
Sint-Amands	186,2	0
Sint-Gillis-Waas	120,5	0
Sint-Katelijne-W.	205,4	0,2
Sint-Laureins	35,6	0
Sint-Lievens-H.	136,8	0,1
Sint-Martens-La.	229,9	0,1
Sint-Pieters-L.	301,1	0,3
Sivry-Rance	26	0
Soignies	89,3	0,1
Sombreffe	80,9	0

COMMUNE	Ménages / km²	Immeubles > 5 étag. / km²
Somme-Leuze	18,3	0
Soumagne	215,4	0
Spa	119,1	0,5
Sprimont	64,5	0
Stabroek	319,3	0,7
Staden	87,9	0,1
Stavelot	31,7	0
Steenokkerzeel	172,8	0
Stekene	145,5	0
Stoumont	10,8	0
Tamise	259,9	0,4
Tellin	15,8	0
Tenneville	10,3	0
Termonde	324,1	0,8
Ternat	230,7	0,1
Tervuren	239,8	0,1
Tessenderlo	125,5	0,3
Theux	53,1	0
Thimister-Clerm.	62,5	0
Thuin	79,1	0
Tielt	111,2	0,1
Tielt-Winge	87,6	0
Tinlot	22,3	0
Tintigny	16,9	0
Tirlemont	200,2	0,4
Tongres	138,9	0,4
Torhout	167	0,1
Tournai	136,8	0,3
Tremelo	240,2	0
Trois-Ponts	14,7	0
Trooz	131,6	0
Tubize	261,6	0,5
Turnhout	310,3	0,9
Uccle	1566	20,6
Vaux-sur-Sûre	11,3	0
Verlaine	53,6	0
Verviers	722,7	2,8
Vielsalm	21,3	0
Villers-Le-Bouillet	67	0
Villers-la-Ville	73,3	0
Vilvorde	702,2	1
Viroinval	21,2	0
Virton	48,4	0
Visé	246,1	0,4
Vleteren	34,9	0

COMMUNE	Ménages / km²	Immeubles > 5 étag. / km²
Vorselaar	101,6	0
Vosselaar	315,9	0
Vresse-sur-Sem.	12,8	0
Waarschoot	142,9	0,1
Waasmunster	124,6	0
Wachtebeke	76,5	0
Waimes	26,2	0
Walcourt	54,8	0
Walhain	57,3	0
Wanze	114,1	0,1
Waregem	314,7	0,4
Waremme	187,7	2
Wasseiges	37,7	0
Waterloo	528,7	1
Watermael-B.	922,4	3,7
Wavre	308,6	1
Welkenraedt	144,6	0,1
Wellen	97,7	0
Wellin	15,9	0
Wemmel	693,1	1
Wervik	161,1	0,1
Westerlo	157,5	0,2
Wetteren	265,8	0,2
Wevelgem	311,8	0,2
Wezembeek-Op.	742,1	1
Wichelen	194,6	0
Wielsbeke	153,8	0
Wijnegem	448,9	0,6
Willebroek	344,4	0,4
Wingene	72,5	0,1
Woluwe-Saint-L.	3354,4	46,1
Woluwe-Saint-P.	1981,5	22,1
Wommelgem	355,7	0,8
Wortegem-Pet.	52,2	0
Wuustwezel	73,4	0
Ypres	107,4	0,3
Yvoir	54,6	0
Zandhoven	111,5	0
Zaventem	421,8	1
Zedelgem	137,5	0
Zele	232	0,1
Zelzate	385,5	1
Zemst	187,5	0,1
Zingem	109,3	0
Zoersel	189,4	0,2
Zomergem	82,2	0
Zonhoven	185,6	0,1
Zonnebeke	64,7	0
Zottegem	177,8	0,1
Zuienkerke	21,6	0
Zulte	172,8	0
Zutendaal	79,7	0,1
Zwalm	87,2	0
Zwevegem	144	0,1
Zwijndrecht	416,2	0,8

Annexe n°6. Résultats du modèle ADSL

Ci-dessous sont affichés les résultats du modèle xDSL avec les paramètres ADSL. Pour chaque commune, un "1" est affiché dans la colonne correspondant à un dispositif lorsque celui-ci est sélectionné (c'est-à-dire lorsqu'il est adéquat et qu'il revient le moins cher par utilisateur et par an). Dans la dernière colonne est affiché le coût par utilisateur et par an du dispositif sélectionné.

COMMUNE	10 Mbps	50 Mbps	155 Mbps	622 Mbps	1250 Mpbs	2500 Mbps	Prix/ Utili./ An
Aalter	0	0	0	0	0	0	0
Aarschot	0	0	0	0	0	0	0
Aartselaar	0	1	0	0	0	0	67,6
Affligem	0	0	0	0	0	0	0
Aiseau-Presles	0	0	0	0	0	0	0
Alken	0	0	0	0	0	0	0
Alost	0	1	0	0	0	0	67,6
Alveringem	0	0	0	0	0	0	0
Amay	0	0	0	0	0	0	0
Amblève	0	0	0	0	0	0	0
Andenne	0	0	0	0	0	0	0
Anderlecht	0	0	1	0	0	0	25,2
Anderlues	0	0	0	0	0	0	0
Anhée	0	0	0	0	0	0	0
Ans	0	1	0	0	0	0	67,6
Anthisnes	0	0	0	0	0	0	0
Antoing	0	0	0	0	0	0	0
Anvers	0	1	0	0	0	0	41,2
Anzegem	0	0	0	0	0	0	0
Ardooie	0	0	0	0	0	0	0
Arendonk	0	0	0	0	0	0	0
Arlon	0	0	0	0	0	0	0
As	0	0	0	0	0	0	0
Asse	0	0	0	0	0	0	0
Assenede	0	0	0	0	0	0	0
Assesse	0	0	0	0	0	0	0
Ath	0	0	0	0	0	0	0
Attert	0	0	0	0	0	0	0
Aubange	0	0	0	0	0	0	0
Aubel	0	0	0	0	0	0	0
Audenarde	0	0	0	0	0	0	0
Auderghem	0	1	0	0	0	0	41,2
Avelgem	0	0	0	0	0	0	0
Awans	0	0	0	0	0	0	0
Aywaille	0	0	0	0	0	0	0
Baelen	0	0	0	0	0	0	0
Baerle-Duc	0	0	0	0	0	0	0
Balen	0	0	0	0	0	0	0
Bassenge	0	0	0	0	0	0	0
Bastogne	0	0	0	0	0	0	0
Beaumont	0	0	0	0	0	0	0
Beauraing	0	0	0	0	0	0	0
Beauvechain	0	0	0	0	0	0	0
Beernem	0	0	0	0	0	0	0
Beerse	0	0	0	0	0	0	0
Beersel	0	0	0	0	0	0	0
Begijnendijk	0	0	0	0	0	0	0
Bekkevoort	0	0	0	0	0	0	0
Beloeil	0	0	0	0	0	0	0
Berchem-SA	0	0	1	0	0	0	25,2
Beringen	0	0	0	0	0	0	0

COMMUNE	10 Mbps	50 Mbps	155 Mbps	622 Mbps	1250 Mbps	2500 Mbps	Prix/ Utili./ An
Berlaar	0	0	0	0	0	0	0
Berlare	0	0	0	0	0	0	0
Berloz	0	0	0	0	0	0	0
Bernissart	0	0	0	0	0	0	0
Bertem	0	0	0	0	0	0	0
Bertogne	0	0	0	0	0	0	0
Bertrix	0	0	0	0	0	0	0
Beveren	0	0	0	0	0	0	0
Beyne-Heusay	0	0	0	0	0	0	0
Bierbeek	0	0	0	0	0	0	0
Bilzen	0	0	0	0	0	0	0
Binche	0	0	0	0	0	0	0
Bièvre	0	0	0	0	0	0	0
Biévène	0	0	0	0	0	0	0
Blankenberge	0	1	0	0	0	0	67,6
Blégny	0	0	0	0	0	0	0
Bocholt	0	0	0	0	0	0	0
Boechout	0	0	0	0	0	0	0
Bonheiden	0	0	0	0	0	0	0
Boom	0	1	0	0	0	0	67,6
Boortmeerbeek	0	0	0	0	0	0	0
Bornem	0	0	0	0	0	0	0
Borsbeek	0	1	0	0	0	0	41,2
Bouillon	0	0	0	0	0	0	0
Bourg-Léopold	0	0	0	0	0	0	0
Boussu	0	0	0	0	0	0	0
Boutersem	0	0	0	0	0	0	0
Braine-l'Alleud	0	0	0	0	0	0	0
Braine-le-Château	0	0	0	0	0	0	0
Braine-le-Comte	0	0	0	0	0	0	0
Braives	0	0	0	0	0	0	0
Brakel	0	0	0	0	0	0	0
Brasschaat	0	0	0	0	0	0	0
Brecht	0	0	0	0	0	0	0
Bredene	0	1	0	0	0	0	67,6
Bree	0	0	0	0	0	0	0
Brugelette	0	0	0	0	0	0	0
Bruges	0	0	0	0	0	0	0
Brunehaut	0	0	0	0	0	0	0
Bruxelles	0	1	0	0	0	0	41,2
Buggenhout	0	0	0	0	0	0	0
Bullange	0	0	0	0	0	0	0
Burdinne	0	0	0	0	0	0	0
Burg-Reuland	0	0	0	0	0	0	0
Butgenbach	0	0	0	0	0	0	0
Celles	0	0	0	0	0	0	0
Cerfontaine	0	0	0	0	0	0	0
Chapelle-lez-H	0	0	0	0	0	0	0
Charleroi	0	1	0	0	0	0	67,6
Chastre	0	0	0	0	0	0	0
Chaudfontaine	0	0	0	0	0	0	0

COMMUNE	10 Mbps	50 Mbps	155 Mbps	622 Mbps	1250 Mpbs	2500 Mbps	Prix/ Utili./ An
Chaumont-Gist.	0	0	0	0	0	0	0
Chimay	0	0	0	0	0	0	0
Chiny	0	0	0	0	0	0	0
Chièvres	0	0	0	0	0	0	0
Châtelet	0	0	0	0	0	0	0
Ciney	0	0	0	0	0	0	0
Clavier	0	0	0	0	0	0	0
Colfontaine	0	0	0	0	0	0	0
Comblain-au-P.	0	0	0	0	0	0	0
Comines-Warn.	0	0	0	0	0	0	0
Courcelles	0	0	0	0	0	0	0
Court-Saint-E	0	0	0	0	0	0	0
Courtrai	0	1	0	0	0	0	67,6
Couvin	0	0	0	0	0	0	0
Crisnée	0	0	0	0	0	0	0
Dalhem	0	0	0	0	0	0	0
Damme	0	0	0	0	0	0	0
Daverdisse	0	0	0	0	0	0	0
De Haan	1	0	0	0	0	0	286,6
De Pinte	0	0	0	0	0	0	0
Deerlijk	0	0	0	0	0	0	0
Deinze	0	0	0	0	0	0	0
Denderleeuw	0	0	0	0	0	0	0
Dentergem	0	0	0	0	0	0	0
Dessel	0	0	0	0	0	0	0
Destelbergen	0	0	0	0	0	0	0
Diepenbeek	0	0	0	0	0	0	0
Diest	0	0	0	0	0	0	0
Dilbeek	0	1	0	0	0	0	67,6
Dilsen-Stokkem	0	0	0	0	0	0	0
Dinant	0	0	0	0	0	0	0
Dison	0	0	0	0	0	0	0
Dixmude	0	0	0	0	0	0	0
Doische	0	0	0	0	0	0	0
Donceel	0	0	0	0	0	0	0
Dour	0	0	0	0	0	0	0
Drogenbos	0	0	0	0	0	0	0
Duffel	0	0	0	0	0	0	0
Durbuy	0	0	0	0	0	0	0
Ecaussinnes	0	0	0	0	0	0	0
Edegem	0	1	0	0	0	0	67,6
Eeklo	0	0	0	0	0	0	0
Eghezée	0	0	0	0	0	0	0
Ellezelles	0	0	0	0	0	0	0
Enghien	0	0	0	0	0	0	0
Engis	0	0	0	0	0	0	0
Erezée	0	0	0	0	0	0	0
Erpe-Mere	0	0	0	0	0	0	0
Erquelinnes	0	0	0	0	0	0	0
Esneux	0	0	0	0	0	0	0
Espierres-Helch.	0	0	0	0	0	0	0
Essen	0	0	0	0	0	0	0
Estaimpuis	0	0	0	0	0	0	0
Estinnes	0	0	0	0	0	0	0
Etalle	0	0	0	0	0	0	0
Etterbeek	0	0	1	0	0	0	15
Eupen	0	0	0	0	0	0	0
Evere	0	0	1	0	0	0	25,2
Evergem	0	0	0	0	0	0	0
Faimes	0	0	0	0	0	0	0
Farciennes	0	0	0	0	0	0	0
Fauvillers	0	0	0	0	0	0	0

COMMUNE	10 Mbps	50 Mbps	155 Mbps	622 Mbps	1250 Mbps	2500 Mbps	Prix/ Utili./ An
Fernelmont	0	0	0	0	0	0	0
Ferrières	0	0	0	0	0	0	0
Fexhe-le-Haut-Cl.	0	0	0	0	0	0	0
Fleurus	0	0	0	0	0	0	0
Flobecq	0	0	0	0	0	0	0
Floreffe	0	0	0	0	0	0	0
Florennes	0	0	0	0	0	0	0
Florenville	0	0	0	0	0	0	0
Flémalle	0	0	0	0	0	0	0
Fléron	0	1	0	0	0	0	67,6
Fontaine-l'Evêque	0	0	0	0	0	0	0
Forest	0	0	1	0	0	0	25,2
Fosses-la-Ville	0	0	0	0	0	0	0
Fourons	0	0	0	0	0	0	0
Frameries	0	0	0	0	0	0	0
Frasnes-lez-Anv.	0	0	0	0	0	0	0
Froidchapelle	0	0	0	0	0	0	0
Furnes	0	0	0	0	0	0	0
Gammerages	0	0	0	0	0	0	0
Gand	0	1	0	0	0	0	67,6
Ganshoren	0	0	1	0	0	0	25,2
Gavere	0	0	0	0	0	0	0
Gedinne	0	0	0	0	0	0	0
Geel	0	0	0	0	0	0	0
Geer	0	0	0	0	0	0	0
Geetbets	0	0	0	0	0	0	0
Gembloux	0	0	0	0	0	0	0
Genappe	0	0	0	0	0	0	0
Genk	0	0	0	0	0	0	0
Gerpinnes	0	0	0	0	0	0	0
Gesves	0	0	0	0	0	0	0
Gingelom	0	0	0	0	0	0	0
Gistel	0	0	0	0	0	0	0
Glabbeek	0	0	0	0	0	0	0
Gooik	0	0	0	0	0	0	0
Gouvy	0	0	0	0	0	0	0
Grammont	0	0	0	0	0	0	0
Grez-Doiceau	0	0	0	0	0	0	0
Grimbergen	0	0	0	0	0	0	0
Grobbendonk	0	0	0	0	0	0	0
Grâce-Hollogne	0	0	0	0	0	0	0
Haacht	0	0	0	0	0	0	0
Haaltert	0	0	0	0	0	0	0
Habay	0	0	0	0	0	0	0
Hal	0	0	0	0	0	0	0
Halen	0	0	0	0	0	0	0
Ham	0	0	0	0	0	0	0
Ham-sur-Heure-N.	0	0	0	0	0	0	0
Hamme	0	0	0	0	0	0	0
Hamoir	0	0	0	0	0	0	0
Hamois	0	0	0	0	0	0	0
Hamont-Achel	0	0	0	0	0	0	0
Hannut	0	0	0	0	0	0	0
Harelbeke	0	0	0	0	0	0	0
Hasselt	0	0	0	0	0	0	0
Hastière	0	0	0	0	0	0	0
Havelange	0	0	0	0	0	0	0
Hechtel-Eksel	0	0	0	0	0	0	0
Heers	0	0	0	0	0	0	0
Heist-op-den-Berg	0	0	0	0	0	0	0
Hemiksem	0	1	0	0	0	0	67,6
Hensies	0	0	0	0	0	0	0

COMMUNE	10 Mbps	50 Mbps	155 Mbps	622 Mbps	1250 Mpbs	2500 Mbps	Prix/ Utili./ An
Herbeumont	0	0	0	0	0	0	0
Herck-la-Ville	0	0	0	0	0	0	0
Herent	0	0	0	0	0	0	0
Herentals	0	0	0	0	0	0	0
Herenthout	0	0	0	0	0	0	0
Herne	0	0	0	0	0	0	0
Herselt	0	0	0	0	0	0	0
Herstal	0	0	0	0	0	0	0
Herstappe	0	0	0	0	0	0	0
Herve	0	0	0	0	0	0	0
Herzele	0	0	0	0	0	0	0
Heusden-Zolder	0	0	0	0	0	0	0
Heuvelland	0	0	0	0	0	0	0
Hoegaarden	0	0	0	0	0	0	0
Hoeilaart	0	0	0	0	0	0	0
Hoeselt	0	0	0	0	0	0	0
Holsbeek	0	0	0	0	0	0	0
Honnelles	0	0	0	0	0	0	0
Hooglede	0	0	0	0	0	0	0
Hoogstraten	0	0	0	0	0	0	0
Horebeke	0	0	0	0	0	0	0
Hotton	0	0	0	0	0	0	0
Houffalize	0	0	0	0	0	0	0
Houthalen-Helc.	0	0	0	0	0	0	0
Houthulst	0	0	0	0	0	0	0
Houyet	0	0	0	0	0	0	0
Hove	0	0	0	0	0	0	0
Huldenberg	0	0	0	0	0	0	0
Hulshout	0	0	0	0	0	0	0
Huy	0	0	0	0	0	0	0
Hélécine	0	0	0	0	0	0	0
Héron	0	0	0	0	0	0	0
Ichtegem	0	0	0	0	0	0	0
Incourt	0	0	0	0	0	0	0
Ingelmunster	0	0	0	0	0	0	0
Ittre	0	0	0	0	0	0	0
Ixelles	0	0	1	0	0	0	15
Izegem	0	0	0	0	0	0	0
Jabbeke	0	0	0	0	0	0	0
Jalhay	0	0	0	0	0	0	0
Jemeppe-sur-S.	0	0	0	0	0	0	0
Jette	0	0	1	0	0	0	25,2
Jodoigne	0	0	0	0	0	0	0
Juprelle	0	0	0	0	0	0	0
Jurbise	0	0	0	0	0	0	0
Kalmthout	0	0	0	0	0	0	0
Kampenhout	0	0	0	0	0	0	0
Kapelle-op-DB	0	0	0	0	0	0	0
Kapellen	0	0	0	0	0	0	0
Kaprijke	0	0	0	0	0	0	0
Kasterlee	0	0	0	0	0	0	0
Keerbergen	0	0	0	0	0	0	0
Kinrooi	0	0	0	0	0	0	0
Kluisbergen	0	0	0	0	0	0	0
Knesselare	0	0	0	0	0	0	0
Knokke-Heist	1	0	0	0	0	0	180,3
Koekelare	0	0	0	0	0	0	0
Koekelberg	0	0	1	0	0	0	15
Koksijde	1	0	0	0	0	0	180,3
Kontich	0	0	0	0	0	0	0
Kortemark	0	0	0	0	0	0	0
Kortenaken	0	0	0	0	0	0	0

COMMUNE	10 Mbps	50 Mbps	155 Mbps	622 Mbps	1250 Mbps	2500 Mbps	Prix/ Utili./ An
Kortenberg	0	0	0	0	0	0	0
Kortessem	0	0	0	0	0	0	0
Kraainem	0	1	0	0	0	0	67,6
Kruibeke	0	0	0	0	0	0	0
Kruishoutem	0	0	0	0	0	0	0
Kuurne	0	0	0	0	0	0	0
La Bruyère	0	0	0	0	0	0	0
La Calamine	0	0	0	0	0	0	0
La Hulpe	0	0	0	0	0	0	0
La Louvière	0	0	0	0	0	0	0
La Panne	1	0	0	0	0	0	180,3
La Roche-en-Ard.	0	0	0	0	0	0	0
Laakdal	0	0	0	0	0	0	0
Laarne	0	0	0	0	0	0	0
Lanaken	0	0	0	0	0	0	0
Landen	0	0	0	0	0	0	0
Langemark-Poelk.	0	0	0	0	0	0	0
Lasne	0	0	0	0	0	0	0
Le Roeulx	0	0	0	0	0	0	0
Lebbeke	0	0	0	0	0	0	0
Lede	0	0	0	0	0	0	0
Ledegem	0	0	0	0	0	0	0
Lendelede	0	0	0	0	0	0	0
Lennik	0	0	0	0	0	0	0
Lens	0	0	0	0	0	0	0
Les Bons Villers	0	0	0	0	0	0	0
Lessines	0	0	0	0	0	0	0
Leuze-en-Hainaut	0	0	0	0	0	0	0
Libin	0	0	0	0	0	0	0
Libramont-Chev.	0	0	0	0	0	0	0
Lichtervelde	0	0	0	0	0	0	0
Liedekerke	0	0	0	0	0	0	0
Lierde	0	0	0	0	0	0	0
Lierneux	0	0	0	0	0	0	0
Lierre	0	0	0	0	0	0	0
Lille	0	0	0	0	0	0	0
Limbourg	0	0	0	0	0	0	0
Lincent	0	0	0	0	0	0	0
Linkebeek	0	1	0	0	0	0	67,6
Lint	0	1	0	0	0	0	67,6
Linter	0	0	0	0	0	0	0
Liège	0	1	0	0	0	0	41,2
Lo-Reninge	0	0	0	0	0	0	0
Lobbes	0	0	0	0	0	0	0
Lochristi	0	0	0	0	0	0	0
Lokeren	0	0	0	0	0	0	0
Lommel	0	0	0	0	0	0	0
Londerzeel	0	0	0	0	0	0	0
Lontzen	0	0	0	0	0	0	0
Looz	0	0	0	0	0	0	0
Louvain	0	1	0	0	0	0	67,6
Lovendegem	0	0	0	0	0	0	0
Lubbeek	0	0	0	0	0	0	0
Lummen	0	0	0	0	0	0	0
Léau	0	0	0	0	0	0	0
Léglise	0	0	0	0	0	0	0
Maarkedal	0	0	0	0	0	0	0
Maaseik	0	0	0	0	0	0	0
Maasmechelen	0	0	0	0	0	0	0
Machelen	0	1	0	0	0	0	67,6
Maldegem	0	0	0	0	0	0	0
Malines	0	1	0	0	0	0	67,6

COMMUNE	10 Mbps	50 Mbps	155 Mbps	622 Mbps	1250 Mpbs	2500 Mbps	Prix/ Utili./ An
Malle	0	0	0	0	0	0	0
Malmedy	0	0	0	0	0	0	0
Manage	0	0	0	0	0	0	0
Manhay	0	0	0	0	0	0	0
Marche-en-Fam.	0	0	0	0	0	0	0
Marchin	0	0	0	0	0	0	0
Martelange	0	0	0	0	0	0	0
Meerhout	0	0	0	0	0	0	0
Meeuwen-Gruit.	0	0	0	0	0	0	0
Meise	0	0	0	0	0	0	0
Meix-devant-Vir.	0	0	0	0	0	0	0
Melle	0	0	0	0	0	0	0
Menin	0	1	0	0	0	0	67,6
Merbes-le-Châ.	0	0	0	0	0	0	0
Merchtem	0	0	0	0	0	0	0
Merelbeke	0	0	0	0	0	0	0
Merksplas	0	0	0	0	0	0	0
Messancy	0	0	0	0	0	0	0
Messines	0	0	0	0	0	0	0
Mettet	0	0	0	0	0	0	0
Meulebeke	0	0	0	0	0	0	0
Middelkerke	1	0	0	0	0	0	286,6
Modave	0	0	0	0	0	0	0
Moerbeke	0	0	0	0	0	0	0
Mol	0	0	0	0	0	0	0
Molenbeek-SJ	0	0	1	0	0	0	15
Momignies	0	0	0	0	0	0	0
Mons	0	0	0	0	0	0	0
Mont-Saint-Guib.	0	0	0	0	0	0	0
Mont-de-l'Enclus	0	0	0	0	0	0	0
Montaigu-Zich.	0	0	0	0	0	0	0
Montigny-le-T.	0	0	0	0	0	0	0
Moorslede	0	0	0	0	0	0	0
Morlanwelz	0	0	0	0	0	0	0
Mortsel	0	1	0	0	0	0	41,2
Mouscron	0	1	0	0	0	0	67,6
Musson	0	0	0	0	0	0	0
Namur	0	0	0	0	0	0	0
Nandrin	0	0	0	0	0	0	0
Nassogne	0	0	0	0	0	0	0
Nazareth	0	0	0	0	0	0	0
Neerpelt	0	0	0	0	0	0	0
Neufchâteau	0	0	0	0	0	0	0
Neupré	0	0	0	0	0	0	0
Nevele	0	0	0	0	0	0	0
Niel	0	1	0	0	0	0	67,6
Nieuport	1	0	0	0	0	0	286,6
Nieuwerkerken	0	0	0	0	0	0	0
Nijlen	0	0	0	0	0	0	0
Ninove	0	0	0	0	0	0	0
Nivelles	0	0	0	0	0	0	0
Ohey	0	0	0	0	0	0	0
Olen	0	0	0	0	0	0	0
Olne	0	0	0	0	0	0	0
Onhaye	0	0	0	0	0	0	0
Oosterzele	0	0	0	0	0	0	0
Oostkamp	0	0	0	0	0	0	0
Oostrozebeke	0	0	0	0	0	0	0
Opglabbeek	0	0	0	0	0	0	0
Opwijk	0	0	0	0	0	0	0
Oreye	0	0	0	0	0	0	0
Orp-Jauche	0	0	0	0	0	0	0

COMMUNE	10 Mbps	50 Mbps	155 Mbps	622 Mbps	1250 Mbps	2500 Mbps	Prix/ Utili./ An
Ostende	0	1	0	0	0	0	67,6
Ottignies-LLN	0	0	0	0	0	0	0
Oud-Heverlee	0	0	0	0	0	0	0
Oud-Turnhout	0	0	0	0	0	0	0
Oudenburg	0	0	0	0	0	0	0
Ouffet	0	0	0	0	0	0	0
Oupeye	0	0	0	0	0	0	0
Overijse	0	0	0	0	0	0	0
Overpelt	0	0	0	0	0	0	0
Paliseul	0	0	0	0	0	0	0
Pecq	0	0	0	0	0	0	0
Peer	0	0	0	0	0	0	0
Pepingen	0	0	0	0	0	0	0
Pepinster	0	0	0	0	0	0	0
Perwez	0	0	0	0	0	0	0
Philippeville	0	0	0	0	0	0	0
Pittem	0	0	0	0	0	0	0
Plombières	0	0	0	0	0	0	0
Pont-à-Celles	0	0	0	0	0	0	0
Poperinge	0	0	0	0	0	0	0
Profondeville	0	0	0	0	0	0	0
Putte	0	0	0	0	0	0	0
Puurs	0	0	0	0	0	0	0
Péruwelz	0	0	0	0	0	0	0
Quaregnon	0	0	0	0	0	0	0
Quiévrain	0	0	0	0	0	0	0
Quévy	0	0	0	0	0	0	0
Raeren	0	0	0	0	0	0	0
Ramillies	0	0	0	0	0	0	0
Ranst	0	0	0	0	0	0	0
Ravels	0	0	0	0	0	0	0
Rebecq	0	0	0	0	0	0	0
Remicourt	0	0	0	0	0	0	0
Renaix	0	0	0	0	0	0	0
Rendeux	0	0	0	0	0	0	0
Retie	0	0	0	0	0	0	0
Rhode-Saint-G	0	0	0	0	0	0	0
Riemst	0	0	0	0	0	0	0
Rijkevorsel	0	0	0	0	0	0	0
Rixensart	0	0	0	0	0	0	0
Rochefort	0	0	0	0	0	0	0
Roosdaal	0	0	0	0	0	0	0
Rotselaar	0	0	0	0	0	0	0
Roulers	0	1	0	0	0	0	67,6
Rouvroy	0	0	0	0	0	0	0
Ruiselede	0	0	0	0	0	0	0
Rumes	0	0	0	0	0	0	0
Rumst	0	0	0	0	0	0	0
Saint-Georg.-SM	0	0	0	0	0	0	0
Saint-Ghislain	0	0	0	0	0	0	0
Saint-Gilles	0	0	0	1	0	0	9
Saint-Hubert	0	0	0	0	0	0	0
Saint-Josse-TN	0	0	0	1	0	0	9
Saint-Léger	0	0	0	0	0	0	0
Saint-Nicolas (F)	0	0	0	0	0	0	0
Saint-Nicolas (W)	0	0	0	0	0	0	0
Saint-Trond	0	0	0	0	0	0	0
Saint-Vith	0	0	0	0	0	0	0
Sainte-Ode	0	0	0	0	0	0	0
Sambreville	0	0	0	0	0	0	0
Schaerbeek	0	0	1	0	0	0	15
Schelle	0	0	0	0	0	0	0

COMMUNE	10 Mbps	50 Mbps	155 Mbps	622 Mbps	1250 Mpbs	2500 Mbps	Prix/ Utili./ An
Schilde	0	0	0	0	0	0	0
Schoten	0	1	0	0	0	0	67,6
Seneffe	0	0	0	0	0	0	0
Seraing	0	1	0	0	0	0	67,6
Silly	0	0	0	0	0	0	0
Sint-Amands	0	0	0	0	0	0	0
Sint-Gillis-Waas	0	0	0	0	0	0	0
Sint-Katelijne-W.	0	0	0	0	0	0	0
Sint-Laureins	0	0	0	0	0	0	0
Sint-Lievens-H.	0	0	0	0	0	0	0
Sint-Martens-L.	0	0	0	0	0	0	0
Sint-Pieters-L.	0	0	0	0	0	0	0
Sivry-Rance	0	0	0	0	0	0	0
Soignies	0	0	0	0	0	0	0
Sombreffe	0	0	0	0	0	0	0
Somme-Leuze	0	0	0	0	0	0	0
Soumagne	0	0	0	0	0	0	0
Spa	0	0	0	0	0	0	0
Sprimont	0	0	0	0	0	0	0
Stabroek	0	0	0	0	0	0	0
Staden	0	0	0	0	0	0	0
Stavelot	0	0	0	0	0	0	0
Steenokkerzeel	0	0	0	0	0	0	0
Stekene	0	0	0	0	0	0	0
Stoumont	0	0	0	0	0	0	0
Tamise	0	0	0	0	0	0	0
Tellin	0	0	0	0	0	0	0
Tenneville	0	0	0	0	0	0	0
Termonde	0	0	0	0	0	0	0
Ternat	0	0	0	0	0	0	0
Tervuren	0	0	0	0	0	0	0
Tessenderlo	0	0	0	0	0	0	0
Theux	0	0	0	0	0	0	0
Thimister-Cler.	0	0	0	0	0	0	0
Thuin	0	0	0	0	0	0	0
Tielt	0	0	0	0	0	0	0
Tielt-Winge	0	0	0	0	0	0	0
Tinlot	0	0	0	0	0	0	0
Tintigny	0	0	0	0	0	0	0
Tirlemont	0	0	0	0	0	0	0
Tongres	0	0	0	0	0	0	0
Torhout	0	0	0	0	0	0	0
Tournai	0	0	0	0	0	0	0
Tremelo	0	0	0	0	0	0	0
Trois-Ponts	0	0	0	0	0	0	0
Trooz	0	0	0	0	0	0	0
Tubize	0	0	0	0	0	0	0
Turnhout	0	0	0	0	0	0	0
Uccle	0	1	0	0	0	0	41,2
Vaux-sur-Sûre	0	0	0	0	0	0	0
Verlaine	0	0	0	0	0	0	0
Verviers	0	1	0	0	0	0	67,6
Vielsalm	0	0	0	0	0	0	0
Villers-Le-Bouil.	0	0	0	0	0	0	0
Villers-la-Ville	0	0	0	0	0	0	0
Vilvorde	0	0	0	0	0	0	0
Viroinval	0	0	0	0	0	0	0
Virton	0	0	0	0	0	0	0
Visé	0	0	0	0	0	0	0
Vleteren	0	0	0	0	0	0	0
Vorselaar	0	0	0	0	0	0	0
Vosselaar	0	0	0	0	0	0	0

COMMUNE	10 Mbps	50 Mbps	155 Mbps	622 Mbps	1250 Mbps	2500 Mbps	Prix/ Utili./ An
Vresse-sur-Semois	0	0	0	0	0	0	0
Waarschoot	0	0	0	0	0	0	0
Waasmunster	0	0	0	0	0	0	0
Wachtebeke	0	0	0	0	0	0	0
Waimes	0	0	0	0	0	0	0
Walcourt	0	0	0	0	0	0	0
Walhain	0	0	0	0	0	0	0
Wanze	0	0	0	0	0	0	0
Waregem	0	0	0	0	0	0	0
Waremme	1	0	0	0	0	0	180,3
Wasseiges	0	0	0	0	0	0	0
Waterloo	0	1	0	0	0	0	67,6
Watermael-B.	0	1	0	0	0	0	67,6
Wavre	0	0	0	0	0	0	0
Welkenraedt	0	0	0	0	0	0	0
Wellen	0	0	0	0	0	0	0
Wellin	0	0	0	0	0	0	0
Wemmel	0	0	0	0	0	0	0
Wervik	0	0	0	0	0	0	0
Westerlo	0	0	0	0	0	0	0
Wetteren	0	0	0	0	0	0	0
Wevelgem	0	0	0	0	0	0	0
Wezembeek-Op.	0	0	0	0	0	0	0
Wichelen	0	0	0	0	0	0	0
Wielsbeke	0	0	0	0	0	0	0
Wijnegem	0	0	0	0	0	0	0
Willebroek	0	0	0	0	0	0	0
Wingene	0	0	0	0	0	0	0
Woluwe-Saint-L.	0	0	1	0	0	0	25,2
Woluwe-Saint-P.	0	1	0	0	0	0	41,2
Wommelgem	0	0	0	0	0	0	0
Wortegem-P.	0	0	0	0	0	0	0
Wuustwezel	0	0	0	0	0	0	0
Ypres	0	0	0	0	0	0	0
Yvoir	0	0	0	0	0	0	0
Zandhoven	0	0	0	0	0	0	0
Zaventem	0	1	0	0	0	0	67,6
Zedelgem	0	0	0	0	0	0	0
Zele	0	0	0	0	0	0	0
Zelzate	0	1	0	0	0	0	67,6
Zemst	0	0	0	0	0	0	0
Zingem	0	0	0	0	0	0	0
Zoersel	0	0	0	0	0	0	0
Zomergem	0	0	0	0	0	0	0
Zonhoven	0	0	0	0	0	0	0
Zonnebeke	0	0	0	0	0	0	0
Zottegem	0	0	0	0	0	0	0
Zuienkerke	0	0	0	0	0	0	0
Zulte	0	0	0	0	0	0	0
Zutendaal	0	0	0	0	0	0	0
Zwalm	0	0	0	0	0	0	0
Zwevegem	0	0	0	0	0	0	0
Zwijndrecht	0	1	0	0	0	0	67,6

Annexe n°7. Résultats du modèle VDSL

COMMUNE	10 Mbps	50 Mbps	155 Mbps	622 Mbps	1250 Mpbs	2500 Mbps	Prix/ Utili./ An
Aalter	0	0	0	0	0	0	0,0
Aarschot	0	0	0	0	0	0	0,0
Aartselaar	0	1	0	0	0	0	1.313,1
Affligem	0	0	0	0	0	0	0,0
Aiseau-Presles	0	0	0	0	0	0	0,0
Alken	0	0	0	0	0	0	0,0
Alost	0	0	0	1	0	0	1.847,1
Alveringem	0	0	0	0	0	0	0,0
Amay	0	0	0	0	0	0	0,0
Amblève	0	0	0	0	0	0	0,0
Andenne	0	0	0	0	0	0	0,0
Anderlecht	0	0	0	1	0	0	328,6
Anderlues	0	0	0	0	0	0	0,0
Anhée	0	0	0	0	0	0	0,0
Ans	0	0	0	0	0	0	0,0
Anthisnes	0	0	0	0	0	0	0,0
Antoing	0	0	0	0	0	0	0,0
Anvers	0	0	0	1	0	0	740,8
Anzegem	0	0	0	0	0	0	0,0
Ardooie	0	0	0	0	0	0	0,0
Arendonk	0	0	0	0	0	0	0,0
Arlon	0	0	0	0	0	0	0,0
As	0	0	0	0	0	0	0,0
Asse	0	0	0	0	0	0	0,0
Assenede	0	0	0	0	0	0	0,0
Assesse	0	0	0	0	0	0	0,0
Ath	0	0	0	0	0	0	0,0
Attert	0	0	0	0	0	0	0,0
Aubange	0	0	0	0	0	0	0,0
Aubel	0	0	0	0	0	0	0,0
Audenarde	0	0	0	0	0	0	0,0
Auderghem	0	0	1	0	0	0	488,3
Avelgem	0	0	0	0	0	0	0,0
Awans	0	0	0	0	0	0	0,0
Aywaille	0	0	0	0	0	0	0,0
Baelen	0	0	0	0	0	0	0,0
Baerle-Duc	0	0	0	0	0	0	0,0
Balen	0	0	0	0	0	0	0,0
Bassenge	0	0	0	0	0	0	0,0
Bastogne	0	0	0	0	0	0	0,0
Beaumont	0	0	0	0	0	0	0,0
Beauraing	0	0	0	0	0	0	0,0
Beauvechain	0	0	0	0	0	0	0,0
Beernem	0	0	0	0	0	0	0,0
Beerse	0	0	0	0	0	0	0,0
Beersel	0	0	0	0	0	0	0,0
Begijnendijk	0	0	0	0	0	0	0,0
Bekkevoort	0	0	0	0	0	0	0,0
Beloeil	0	0	0	0	0	0	0,0
Berchem-SA	0	0	0	1	0	0	270,7
Beringen	0	0	0	0	0	0	0,0
Berlaar	0	0	0	0	0	0	0,0
Berlare	0	0	0	0	0	0	0,0
Berloz	0	0	0	0	0	0	0,0
Bernissart	0	0	0	0	0	0	0,0
Bertem	0	0	0	0	0	0	0,0
Bertogne	0	0	0	0	0	0	0,0
Bertrix	0	0	0	0	0	0	0,0
Beveren	0	0	0	0	0	0	0,0
Beyne-Heusay	0	0	0	0	0	0	0,0
Bierbeek	0	0	0	0	0	0	0,0
Bilzen	0	0	0	0	0	0	0,0

COMMUNE	10 Mbps	50 Mbps	155 Mbps	622 Mbps	1250 Mbps	2500 Mbps	Prix/ Utili./ An
Binche	0	0	0	0	0	0	0,0
Bièvre	0	0	0	0	0	0	0,0
Biévène	0	0	0	0	0	0	0,0
Blankenberge	0	1	0	0	0	0	1.313,1
Blégny	0	0	0	0	0	0	0,0
Bocholt	0	0	0	0	0	0	0,0
Boechout	0	0	0	0	0	0	0,0
Bonheiden	0	0	0	0	0	0	0,0
Boom	0	1	0	0	0	0	800,4
Boortmeerbeek	0	0	0	0	0	0	0,0
Bornem	0	0	0	0	0	0	0,0
Borsbeek	0	0	0	1	0	0	697,0
Bouillon	0	0	0	0	0	0	0,0
Bourg-Léopold	0	0	0	0	0	0	0,0
Boussu	0	0	0	0	0	0	0,0
Boutersem	0	0	0	0	0	0	0,0
Braine-l'Alleud	0	0	0	0	0	0	0,0
Braine-le-Château	0	0	0	0	0	0	0,0
Braine-le-Comte	0	0	0	0	0	0	0,0
Braives	0	0	0	0	0	0	0,0
Brakel	0	0	0	0	0	0	0,0
Brasschaat	0	0	0	0	0	0	0,0
Brecht	0	0	0	0	0	0	0,0
Bredene	0	1	0	0	0	0	1.313,1
Bree	0	0	0	0	0	0	0,0
Brugelette	0	0	0	0	0	0	0,0
Bruges	0	1	0	0	0	0	1.318,1
Brunehaut	0	0	0	0	0	0	0,0
Bruxelles	0	0	0	1	0	0	365,9
Buggenhout	0	0	0	0	0	0	0,0
Bullange	0	0	0	0	0	0	0,0
Burdinne	0	0	0	0	0	0	0,0
Burg-Reuland	0	0	0	0	0	0	0,0
Butgenbach	0	0	0	0	0	0	0,0
Celles	0	0	0	0	0	0	0,0
Cerfontaine	0	0	0	0	0	0	0,0
Chapelle-lez-H.	0	0	0	0	0	0	0,0
Charleroi	0	1	0	0	0	0	800,4
Chastre	0	0	0	0	0	0	0,0
Chaudfontaine	0	0	0	0	0	0	0,0
Chaumont-Gist.	0	0	0	0	0	0	0,0
Chimay	0	0	0	0	0	0	0,0
Chiny	0	0	0	0	0	0	0,0
Chièvres	0	0	0	0	0	0	0,0
Châtelet	0	0	0	0	0	0	0,0
Ciney	0	0	0	0	0	0	0,0
Clavier	0	0	0	0	0	0	0,0
Colfontaine	0	0	0	0	0	0	0,0
Comblain-au-Pont	0	0	0	0	0	0	0,0
Comines-Warn.	0	0	0	0	0	0	0,0
Courcelles	0	0	0	0	0	0	0,0
Court-Saint-Eti.	0	0	0	0	0	0	0,0
Courtrai	0	1	0	0	0	0	1.313,1
Couvin	0	0	0	0	0	0	0,0
Crisnée	0	0	0	0	0	0	0,0
Dalhem	0	0	0	0	0	0	0,0
Damme	0	0	0	0	0	0	0,0
Daverdisse	0	0	0	0	0	0	0,0
De Haan	0	0	0	0	0	0	0,0
De Pinte	0	0	0	0	0	0	0,0
Deerlijk	0	0	0	0	0	0	0,0
Deinze	0	0	0	0	0	0	0,0

COMMUNE	10 Mbps	50 Mbps	155 Mbps	622 Mbps	1250 Mpbs	2500 Mbps	Prix/ Utili./ An
Denderleeuw	0	0	0	0	0	0	0,0
Dentergem	0	0	0	0	0	0	0,0
Dessel	0	0	0	0	0	0	0,0
Destelbergen	0	0	0	0	0	0	0,0
Diepenbeek	0	0	0	0	0	0	0,0
Diest	0	0	0	0	0	0	0,0
Dilbeek	0	0	0	0	0	0	0,0
Dilsen-Stokkem	0	0	0	0	0	0	0,0
Dinant	0	0	0	0	0	0	0,0
Dison	0	0	0	0	0	0	0,0
Dixmude	0	0	0	0	0	0	0,0
Doische	0	0	0	0	0	0	0,0
Donceel	0	0	0	0	0	0	0,0
Dour	0	0	0	0	0	0	0,0
Drogenbos	0	0	0	0	0	0	0,0
Duffel	0	0	0	0	0	0	0,0
Durbuy	0	0	0	0	0	0	0,0
Ecaussinnes	0	0	0	0	0	0	0,0
Edegem	0	0	0	1	0	0	753,8
Eeklo	0	0	0	0	0	0	0,0
Eghezée	0	0	0	0	0	0	0,0
Ellezelles	0	0	0	0	0	0	0,0
Enghien	0	0	0	0	0	0	0,0
Engis	0	0	0	0	0	0	0,0
Erezée	0	0	0	0	0	0	0,0
Erpe-Mere	0	0	0	0	0	0	0,0
Erquelinnes	0	0	0	0	0	0	0,0
Esneux	0	0	0	0	0	0	0,0
Espierres-Helch.	0	0	0	0	0	0	0,0
Essen	0	0	0	0	0	0	0,0
Estaimpuis	0	0	0	0	0	0	0,0
Estinnes	0	0	0	0	0	0	0,0
Etalle	0	0	0	0	0	0	0,0
Etterbeek	0	0	0	1	0	0	174,6
Eupen	0	0	0	0	0	0	0,0
Evere	0	0	0	1	0	0	259,4
Evergem	0	0	0	0	0	0	0,0
Faimes	0	0	0	0	0	0	0,0
Farciennes	0	0	0	0	0	0	0,0
Fauvillers	0	0	0	0	0	0	0,0
Fernelmont	0	0	0	0	0	0	0,0
Ferrières	0	0	0	0	0	0	0,0
Fexhe-le-HC	0	0	0	0	0	0	0,0
Fleurus	0	0	0	0	0	0	0,0
Flobecq	0	0	0	0	0	0	0,0
Floreffe	0	0	0	0	0	0	0,0
Florennes	0	0	0	0	0	0	0,0
Florenville	0	0	0	0	0	0	0,0
Flémalle	0	0	0	0	0	0	0,0
Fléron	0	0	0	0	0	0	0,0
Fontaine-l'Ev.	0	0	0	0	0	0	0,0
Forest	0	0	0	1	0	0	219,0
Fosses-la-Ville	0	0	0	0	0	0	0,0
Fourons	0	0	0	0	0	0	0,0
Frameries	0	0	0	0	0	0	0,0
Frasnes-lez-Anv.	0	0	0	0	0	0	0,0
Froidchapelle	0	0	0	0	0	0	0,0
Furnes	0	0	0	0	0	0	0,0
Gammerages	0	0	0	0	0	0	0,0
Gand	0	1	0	0	0	0	800,4
Ganshoren	0	0	0	1	0	0	190,1
Gavere	0	0	0	0	0	0	0,0

COMMUNE	10 Mbps	50 Mbps	155 Mbps	622 Mbps	1250 Mbps	2500 Mbps	Prix/ Utili./ An
Gedinne	0	0	0	0	0	0	0,0
Geel	0	0	0	0	0	0	0,0
Geer	0	0	0	0	0	0	0,0
Geetbets	0	0	0	0	0	0	0,0
Gembloux	0	0	0	0	0	0	0,0
Genappe	0	0	0	0	0	0	0,0
Genk	0	0	0	0	0	0	0,0
Gerpinnes	0	0	0	0	0	0	0,0
Gesves	0	0	0	0	0	0	0,0
Gingelom	0	0	0	0	0	0	0,0
Gistel	0	0	0	0	0	0	0,0
Glabbeek	0	0	0	0	0	0	0,0
Gooik	0	0	0	0	0	0	0,0
Gouvy	0	0	0	0	0	0	0,0
Grammont	0	0	0	0	0	0	0,0
Grez-Doiceau	0	0	0	0	0	0	0,0
Grimbergen	0	0	0	0	0	0	0,0
Grobbendonk	0	0	0	0	0	0	0,0
Grâce-Hollogne	0	0	0	0	0	0	0,0
Haacht	0	0	0	0	0	0	0,0
Haaltert	0	0	0	0	0	0	0,0
Habay	0	0	0	0	0	0	0,0
Hal	0	0	0	0	0	0	0,0
Halen	0	0	0	0	0	0	0,0
Ham	0	0	0	0	0	0	0,0
Ham-sur-Heure-N.	0	0	0	0	0	0	0,0
Hamme	0	0	0	0	0	0	0,0
Hamoir	0	0	0	0	0	0	0,0
Hamois	0	0	0	0	0	0	0,0
Hamont-Achel	0	0	0	0	0	0	0,0
Hannut	0	0	0	0	0	0	0,0
Harelbeke	0	0	0	0	0	0	0,0
Hasselt	0	1	0	0	0	0	1.656,5
Hastière	0	0	0	0	0	0	0,0
Havelange	0	0	0	0	0	0	0,0
Hechtel-Eksel	0	0	0	0	0	0	0,0
Heers	0	0	0	0	0	0	0,0
Heist-op-den-Berg	0	0	0	0	0	0	0,0
Hemiksem	0	0	0	1	0	0	1.076,2
Hensies	0	0	0	0	0	0	0,0
Herbeumont	0	0	0	0	0	0	0,0
Herck-la-Ville	0	0	0	0	0	0	0,0
Herent	0	0	0	0	0	0	0,0
Herentals	0	0	0	0	0	0	0,0
Herenthout	0	0	0	0	0	0	0,0
Herne	0	0	0	0	0	0	0,0
Herselt	0	0	0	0	0	0	0,0
Herstal	0	0	0	0	0	0	0,0
Herstappe	0	0	0	0	0	0	0,0
Herve	0	0	0	0	0	0	0,0
Herzele	0	0	0	0	0	0	0,0
Heusden-Zolder	0	0	0	0	0	0	0,0
Heuvelland	0	0	0	0	0	0	0,0
Hoegaarden	0	0	0	0	0	0	0,0
Hoeilaart	0	0	0	0	0	0	0,0
Hoeselt	0	0	0	0	0	0	0,0
Holsbeek	0	0	0	0	0	0	0,0
Honnelles	0	0	0	0	0	0	0,0
Hooglede	0	0	0	0	0	0	0,0
Hoogstraten	0	0	0	0	0	0	0,0
Horebeke	0	0	0	0	0	0	0,0
Hotton	0	0	0	0	0	0	0,0

COMMUNE	10 Mbps	50 Mbps	155 Mbps	622 Mbps	1250 Mpbs	2500 Mbps	Prix/ Utili./ An
Houffalize	0	0	0	0	0	0	0,0
Houthalen-Hel.	0	0	0	0	0	0	0,0
Houthulst	0	0	0	0	0	0	0,0
Houyet	0	0	0	0	0	0	0,0
Hove	0	0	0	0	0	0	0,0
Huldenberg	0	0	0	0	0	0	0,0
Hulshout	0	0	0	0	0	0	0,0
Huy	0	0	0	0	0	0	0,0
Hélécine	0	0	0	0	0	0	0,0
Héron	0	0	0	0	0	0	0,0
Ichtegem	0	0	0	0	0	0	0,0
Incourt	0	0	0	0	0	0	0,0
Ingelmunster	0	0	0	0	0	0	0,0
Ittre	0	0	0	0	0	0	0,0
Ixelles	0	0	0	1	0	0	174,6
Izegem	0	0	0	0	0	0	0,0
Jabbeke	0	0	0	0	0	0	0,0
Jalhay	0	0	0	0	0	0	0,0
Jemeppe-sur-S.	0	0	0	0	0	0	0,0
Jette	0	0	0	1	0	0	204,8
Jodoigne	0	0	0	0	0	0	0,0
Juprelle	0	0	0	0	0	0	0,0
Jurbise	0	0	0	0	0	0	0,0
Kalmthout	0	0	0	0	0	0	0,0
Kampenhout	0	0	0	0	0	0	0,0
Kapelle-op-DB	0	0	0	0	0	0	0,0
Kapellen	0	0	0	0	0	0	0,0
Kaprijke	0	0	0	0	0	0	0,0
Kasterlee	0	0	0	0	0	0	0,0
Keerbergen	0	0	0	0	0	0	0,0
Kinrooi	0	0	0	0	0	0	0,0
Kluisbergen	0	0	0	0	0	0	0,0
Knesselare	0	0	0	0	0	0	0,0
Knokke-Heist	0	1	0	0	0	0	1.708,9
Koekelare	0	0	0	0	0	0	0,0
Koekelberg	0	0	0	1	0	0	174,6
Koksijde	0	1	0	0	0	0	2.228,6
Kontich	0	0	0	0	0	0	0,0
Kortemark	0	0	0	0	0	0	0,0
Kortenaken	0	0	0	0	0	0	0,0
Kortenberg	0	0	0	0	0	0	0,0
Kortessem	0	0	0	0	0	0	0,0
Kraainem	0	0	0	1	0	0	932,0
Kruibeke	0	0	0	0	0	0	0,0
Kruishoutem	0	0	0	0	0	0	0,0
Kuurne	0	0	0	0	0	0	0,0
La Bruyère	0	0	0	0	0	0	0,0
La Calamine	0	0	0	0	0	0	0,0
La Hulpe	0	0	0	0	0	0	0,0
La Louvière	0	0	0	0	0	0	0,0
La Panne	0	1	0	0	0	0	2.411,5
La Roche-en-A.	0	0	0	0	0	0	0,0
Laakdal	0	0	0	0	0	0	0,0
Laarne	0	0	0	0	0	0	0,0
Lanaken	0	0	0	0	0	0	0,0
Landen	0	0	0	0	0	0	0,0
Langemark-Poe.	0	0	0	0	0	0	0,0
Lasne	0	0	0	0	0	0	0,0
Le Roeulx	0	0	0	0	0	0	0,0
Lebbeke	0	0	0	0	0	0	0,0
Lede	0	0	0	0	0	0	0,0
Ledegem	0	0	0	0	0	0	0,0

COMMUNE	10 Mbps	50 Mbps	155 Mbps	622 Mbps	1250 Mbps	2500 Mbps	Prix/ Utili./ An
Lendelede	0	0	0	0	0	0	0,0
Lennik	0	0	0	0	0	0	0,0
Lens	0	0	0	0	0	0	0,0
Les Bons Villers	0	0	0	0	0	0	0,0
Lessines	0	0	0	0	0	0	0,0
Leuze-en-Hainaut	0	0	0	0	0	0	0,0
Libin	0	0	0	0	0	0	0,0
Libramont-Chev.	0	0	0	0	0	0	0,0
Lichtervelde	0	0	0	0	0	0	0,0
Liedekerke	0	0	0	0	0	0	0,0
Lierde	0	0	0	0	0	0	0,0
Lierneux	0	0	0	0	0	0	0,0
Lierre	0	0	0	0	0	0	0,0
Lille	0	0	0	0	0	0	0,0
Limbourg	0	0	0	0	0	0	0,0
Lincent	0	0	0	0	0	0	0,0
Linkebeek	0	0	0	0	0	0	0,0
Lint	0	0	0	1	0	0	1.551,9
Linter	0	0	0	0	0	0	0,0
Liège	0	0	1	0	0	0	488,3
Lo-Reninge	0	0	0	0	0	0	0,0
Lobbes	0	0	0	0	0	0	0,0
Lochristi	0	0	0	0	0	0	0,0
Lokeren	0	0	0	0	0	0	0,0
Lommel	0	0	0	0	0	0	0,0
Londerzeel	0	0	0	0	0	0	0,0
Lontzen	0	0	0	0	0	0	0,0
Looz	0	0	0	0	0	0	0,0
Louvain	0	1	0	0	0	0	800,4
Lovendegem	0	0	0	0	0	0	0,0
Lubbeek	0	0	0	0	0	0	0,0
Lummen	0	0	0	0	0	0	0,0
Léau	0	0	0	0	0	0	0,0
Léglise	0	0	0	0	0	0	0,0
Maarkedal	0	0	0	0	0	0	0,0
Maaseik	0	0	0	0	0	0	0,0
Maasmechelen	0	0	0	0	0	0	0,0
Machelen	0	0	0	0	0	0	0,0
Maldegem	0	0	0	0	0	0	0,0
Malines	0	1	0	0	0	0	1.313,1
Malle	0	0	0	0	0	0	0,0
Malmedy	0	0	0	0	0	0	0,0
Manage	0	0	0	0	0	0	0,0
Manhay	0	0	0	0	0	0	0,0
Marche-en-Fam.	0	0	0	0	0	0	0,0
Marchin	0	0	0	0	0	0	0,0
Martelange	0	0	0	0	0	0	0,0
Meerhout	0	0	0	0	0	0	0,0
Meeuwen-Gruitr.	0	0	0	0	0	0	0,0
Meise	0	0	0	0	0	0	0,0
Meix-devant-V.	0	0	0	0	0	0	0,0
Melle	0	0	0	0	0	0	0,0
Menin	0	0	0	0	0	0	0,0
Merbes-le-Chât.	0	0	0	0	0	0	0,0
Merchtem	0	0	0	0	0	0	0,0
Merelbeke	0	0	0	0	0	0	0,0
Merksplas	0	0	0	0	0	0	0,0
Messancy	0	0	0	0	0	0	0,0
Messines	0	0	0	0	0	0	0,0
Mettet	0	0	0	0	0	0	0,0
Meulebeke	0	0	0	0	0	0	0,0
Middelkerke	0	0	0	0	0	0	0,0

COMMUNE	10 Mbps	50 Mbps	155 Mbps	622 Mbps	1250 Mpbs	2500 Mbps	Prix/ Utili./ An
Modave	0	0	0	0	0	0	0,0
Moerbeke	0	0	0	0	0	0	0,0
Mol	0	0	0	0	0	0	0,0
Molenbeek-SJ	0	0	0	1	0	0	174,6
Momignies	0	0	0	0	0	0	0,0
Mons	0	0	0	0	0	0	0,0
Mont-Saint-G.	0	0	0	0	0	0	0,0
Mont-de-l'Enclus	0	0	0	0	0	0	0,0
Montaigu-Zich.	0	0	0	0	0	0	0,0
Montigny-le-T.	0	0	0	0	0	0	0,0
Moorslede	0	0	0	0	0	0	0,0
Morlanwelz	0	0	0	0	0	0	0,0
Mortsel	0	0	1	0	0	0	488,3
Mouscron	0	0	0	0	0	0	0,0
Musson	0	0	0	0	0	0	0,0
Namur	0	1	0	0	0	0	1.810,3
Nandrin	0	0	0	0	0	0	0,0
Nassogne	0	0	0	0	0	0	0,0
Nazareth	0	0	0	0	0	0	0,0
Neerpelt	0	0	0	0	0	0	0,0
Neufchâteau	0	0	0	0	0	0	0,0
Neupré	0	0	0	0	0	0	0,0
Nevele	0	0	0	0	0	0	0,0
Niel	0	0	0	1	0	0	1.145,8
Nieuport	0	1	0	0	0	0	3.125,4
Nieuwerkerken	0	0	0	0	0	0	0,0
Nijlen	0	0	0	0	0	0	0,0
Ninove	0	0	0	0	0	0	0,0
Nivelles	0	0	0	0	0	0	0,0
Ohey	0	0	0	0	0	0	0,0
Olen	0	0	0	0	0	0	0,0
Olne	0	0	0	0	0	0	0,0
Onhaye	0	0	0	0	0	0	0,0
Oosterzele	0	0	0	0	0	0	0,0
Oostkamp	0	0	0	0	0	0	0,0
Oostrozebeke	0	0	0	0	0	0	0,0
Opglabbeek	0	0	0	0	0	0	0,0
Opwijk	0	0	0	0	0	0	0,0
Oreye	0	0	0	0	0	0	0,0
Orp-Jauche	0	0	0	0	0	0	0,0
Ostende	0	1	0	0	0	0	800,4
Ottignies-LLN	0	1	0	0	0	0	1.313,1
Oud-Heverlee	0	0	0	0	0	0	0,0
Oud-Turnhout	0	0	0	0	0	0	0,0
Oudenburg	0	0	0	0	0	0	0,0
Ouffet	0	0	0	0	0	0	0,0
Oupeye	0	0	0	0	0	0	0,0
Overijse	0	0	0	0	0	0	0,0
Overpelt	0	0	0	0	0	0	0,0
Paliseul	0	0	0	0	0	0	0,0
Pecq	0	0	0	0	0	0	0,0
Peer	0	0	0	0	0	0	0,0
Pepingen	0	0	0	0	0	0	0,0
Pepinster	0	0	0	0	0	0	0,0
Perwez	0	0	0	0	0	0	0,0
Philippeville	0	0	0	0	0	0	0,0
Pittem	0	0	0	0	0	0	0,0
Plombières	0	0	0	0	0	0	0,0
Pont-à-Celles	0	0	0	0	0	0	0,0
Poperinge	0	0	0	0	0	0	0,0
Profondeville	0	0	0	0	0	0	0,0
Putte	0	0	0	0	0	0	0,0

COMMUNE	10 Mbps	50 Mbps	155 Mbps	622 Mbps	1250 Mbps	2500 Mbps	Prix/ Utili./ An
Puurs	0	0	0	0	0	0	0,0
Péruwelz	0	0	0	0	0	0	0,0
Quaregnon	0	0	0	0	0	0	0,0
Quiévrain	0	0	0	0	0	0	0,0
Quévy	0	0	0	0	0	0	0,0
Raeren	0	0	0	0	0	0	0,0
Ramillies	0	0	0	0	0	0	0,0
Ranst	0	0	0	0	0	0	0,0
Ravels	0	0	0	0	0	0	0,0
Rebecq	0	0	0	0	0	0	0,0
Remicourt	0	0	0	0	0	0	0,0
Renaix	0	0	0	0	0	0	0,0
Rendeux	0	0	0	0	0	0	0,0
Retie	0	0	0	0	0	0	0,0
Rhode-Saint-G.	0	0	0	0	0	0	0,0
Riemst	0	0	0	0	0	0	0,0
Rijkevorsel	0	0	0	0	0	0	0,0
Rixensart	0	0	0	0	0	0	0,0
Rochefort	0	0	0	0	0	0	0,0
Roosdaal	0	0	0	0	0	0	0,0
Rotselaar	0	0	0	0	0	0	0,0
Roulers	0	1	0	0	0	0	1.313,1
Rouvroy	0	0	0	0	0	0	0,0
Ruiselede	0	0	0	0	0	0	0,0
Rumes	0	0	0	0	0	0	0,0
Rumst	0	0	0	0	0	0	0,0
Saint-Georg.-SM	0	0	0	0	0	0	0,0
Saint-Ghislain	0	0	0	0	0	0	0,0
Saint-Gilles	0	0	0	1	0	0	147,5
Saint-Hubert	0	0	0	0	0	0	0,0
Saint-Josse-TN	0	0	0	1	0	0	147,5
Saint-Léger	0	0	0	0	0	0	0,0
Saint-Nicolas (F)	0	0	0	0	0	0	0,0
Saint-Nicolas (W)	0	0	1	0	0	0	488,3
Saint-Trond	0	0	0	0	0	0	0,0
Saint-Vith	0	0	0	0	0	0	0,0
Sainte-Ode	0	0	0	0	0	0	0,0
Sambreville	0	0	0	0	0	0	0,0
Schaerbeek	0	0	0	1	0	0	174,6
Schelle	0	0	0	0	0	0	0,0
Schilde	0	0	0	0	0	0	0,0
Schoten	0	1	0	0	0	0	1.313,1
Seneffe	0	0	0	0	0	0	0,0
Seraing	0	0	0	1	0	0	996,9
Silly	0	0	0	0	0	0	0,0
Sint-Amands	0	0	0	0	0	0	0,0
Sint-Gillis-Waas	0	0	0	0	0	0	0,0
Sint-Katelijne-W.	0	0	0	0	0	0	0,0
Sint-Laureins	0	0	0	0	0	0	0,0
Sint-Lievens-H.	0	0	0	0	0	0	0,0
Sint-Martens-L.	0	0	0	0	0	0	0,0
Sint-Pieters-L.	0	0	0	0	0	0	0,0
Sivry-Rance	0	0	0	0	0	0	0,0
Soignies	0	0	0	0	0	0	0,0
Sombreffe	0	0	0	0	0	0	0,0
Somme-Leuze	0	0	0	0	0	0	0,0
Soumagne	0	0	0	0	0	0	0,0
Spa	0	0	0	0	0	0	0,0
Sprimont	0	0	0	0	0	0	0,0
Stabroek	0	0	0	0	0	0	0,0
Staden	0	0	0	0	0	0	0,0
Stavelot	0	0	0	0	0	0	0,0

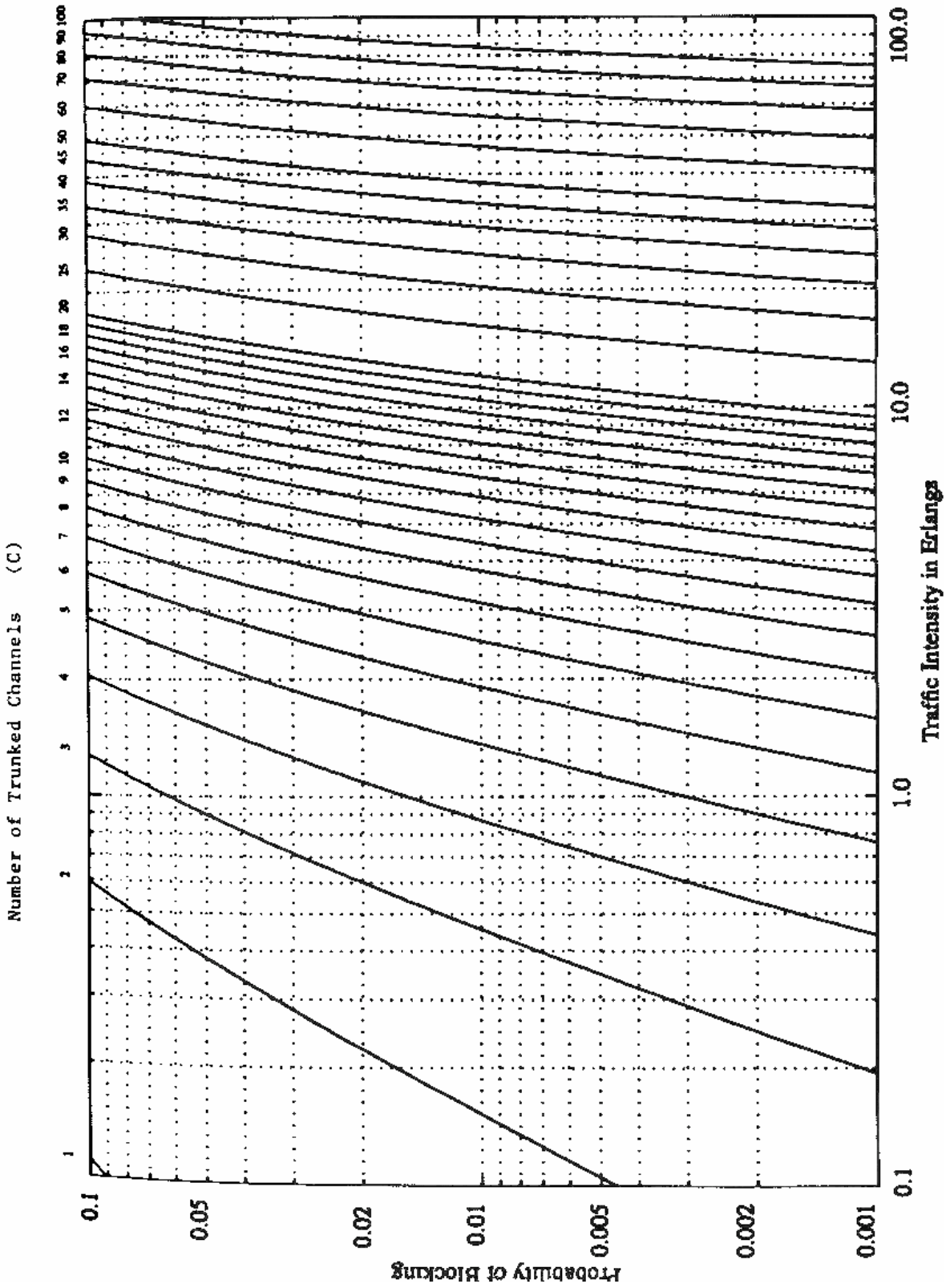
COMMUNE	10 Mbps	50 Mbps	155 Mbps	622 Mbps	1250 Mpbs	2500 Mbps	Prix/ Utili./ An
Steenokkerzeel	0	0	0	0	0	0	0,0
Stekene	0	0	0	0	0	0	0,0
Stoumont	0	0	0	0	0	0	0,0
Tamise	0	0	0	0	0	0	0,0
Tellin	0	0	0	0	0	0	0,0
Tenneville	0	0	0	0	0	0	0,0
Termonde	0	0	0	0	0	0	0,0
Ternat	0	0	0	0	0	0	0,0
Tervuren	0	0	0	0	0	0	0,0
Tessenderlo	0	0	0	0	0	0	0,0
Theux	0	0	0	0	0	0	0,0
Thimister-Cl.	0	0	0	0	0	0	0,0
Thuin	0	0	0	0	0	0	0,0
Tielt	0	0	0	0	0	0	0,0
Tielt-Winge	0	0	0	0	0	0	0,0
Tinlot	0	0	0	0	0	0	0,0
Tintigny	0	0	0	0	0	0	0,0
Tirlemont	0	0	0	0	0	0	0,0
Tongres	0	0	0	0	0	0	0,0
Torhout	0	0	0	0	0	0	0,0
Tournai	0	0	0	0	0	0	0,0
Tremelo	0	0	0	0	0	0	0,0
Trois-Ponts	0	0	0	0	0	0	0,0
Trooz	0	0	0	0	0	0	0,0
Tubize	0	0	0	0	0	0	0,0
Turnhout	0	0	0	0	0	0	0,0
Uccle	0	0	1	0	0	0	488,3
Vaux-sur-Sûre	0	0	0	0	0	0	0,0
Verlaine	0	0	0	0	0	0	0,0
Verviers	0	1	0	0	0	0	800,4
Vielsalm	0	0	0	0	0	0	0,0
Villers-Le-B.	0	0	0	0	0	0	0,0
Villers-la-Ville	0	0	0	0	0	0	0,0
Vilvorde	0	0	0	0	0	0	0,0
Viroinval	0	0	0	0	0	0	0,0
Virton	0	0	0	0	0	0	0,0
Visé	0	0	0	0	0	0	0,0
Vleteren	0	0	0	0	0	0	0,0
Vorselaar	0	0	0	0	0	0	0,0
Vosselaar	0	0	0	0	0	0	0,0
Vresse-sur-S.	0	0	0	0	0	0	0,0
Waarschoot	0	0	0	0	0	0	0,0
Waasmunster	0	0	0	0	0	0	0,0
Wachtebeke	0	0	0	0	0	0	0,0
Waimes	0	0	0	0	0	0	0,0
Walcourt	0	0	0	0	0	0	0,0
Walhain	0	0	0	0	0	0	0,0
Wanze	0	0	0	0	0	0	0,0
Waregem	0	0	0	0	0	0	0,0
Waremme	0	1	0	0	0	0	2.559,0
Wasseiges	0	0	0	0	0	0	0,0
Waterloo	0	0	0	0	0	0	0,0
Watermael-B.	0	1	0	0	0	0	800,4
Wavre	0	0	0	0	0	0	0,0
Welkenraedt	0	0	0	0	0	0	0,0
Wellen	0	0	0	0	0	0	0,0
Wellin	0	0	0	0	0	0	0,0
Wemmel	0	0	0	0	0	0	0,0
Wervik	0	0	0	0	0	0	0,0
Westerlo	0	0	0	0	0	0	0,0
Wetteren	0	0	0	0	0	0	0,0
Wevelgem	0	0	0	0	0	0	0,0

COMMUNE	10 Mbps	50 Mbps	155 Mbps	622 Mbps	1250 Mbps	2500 Mbps	Prix/ Utili./ An
Wezembeek-O.	0	0	0	0	0	0	0,0
Wichelen	0	0	0	0	0	0	0,0
Wielsbeke	0	0	0	0	0	0	0,0
Wijnegem	0	0	0	0	0	0	0,0
Willebroek	0	0	0	0	0	0	0,0
Wingene	0	0	0	0	0	0	0,0
Woluwe-SL	0	0	0	1	0	0	236,9
Woluwe-SP	0	0	0	1	0	0	401,1
Wommelgem	0	0	0	0	0	0	0,0
Wortegem-P.	0	0	0	0	0	0	0,0
Wuustwezel	0	0	0	0	0	0	0,0
Ypres	0	0	0	0	0	0	0,0
Yvoir	0	0	0	0	0	0	0,0
Zandhoven	0	0	0	0	0	0	0,0
Zaventem	0	0	0	0	0	0	0,0
Zedelgem	0	0	0	0	0	0	0,0
Zele	0	0	0	0	0	0	0,0
Zelzate	0	0	0	0	0	0	0,0
Zemst	0	0	0	0	0	0	0,0
Zingem	0	0	0	0	0	0	0,0
Zoersel	0	0	0	0	0	0	0,0
Zomergem	0	0	0	0	0	0	0,0
Zonhoven	0	0	0	0	0	0	0,0
Zonnebeke	0	0	0	0	0	0	0,0
Zottegem	0	0	0	0	0	0	0,0
Zuienkerke	0	0	0	0	0	0	0,0
Zulte	0	0	0	0	0	0	0,0
Zutendaal	0	0	0	0	0	0	0,0
Zwalm	0	0	0	0	0	0	0,0
Zwevegem	0	0	0	0	0	0	0,0
Zwijndrecht	0	0	0	0	0	0	0,0

Annexe n°8. Comparatif des prix ADSL résidentiels selon le site www.adsl.be (TVA incluse).

fournisseur d'accès	produit	prix/mois	pc's	vitesse down/upload
Brutélé	Brutelecom@home	€ 34,00	3	-/- Kbps
Coditel	Coditel.net	€ 42,00	1	4096/128 Kbps
	Coditel.net Pro	€ 57,85	1	4096/256* Kbps
Cybernet	CyberDSL Go	€ 35,00	1	3300/128 Kbps
	CyberDSL Plus	€ 45,00	4	3300/192 Kbps
EDPnet	Neutrino 3000	€ 34,00	unlimited	3328/384 Kbps
	Lepton 3000	€ 39,49	unlimited	3328/384 Kbps
	Meson 4000	€ 54,00	unlimited	4096/512 Kbps
Net4All	Go4All	-	1	750/128 Kbps
	Plus4All	-	4	1024/128 Kbps
Scarlet	ADSL	€ 40,49	1	3328/384 Kbps
OpenWeb	WebGo	€ 54,45	1	3328/384 Kbps
	WebPlus	€ 78,65	4	4096/512 Kbps
Perceval	Fastlink ADSL Go	-	1	3072/128 Kbps
	Fastlink ADSL Plus	-	4	3072/192 Kbps
Skynet Belgacom	ADSL Skynet Go	€ 40,54	1	3072/128 Kbps
	ADSL Skynet Plus	€ 55,41	4	3072/192 Kbps
Télédis	SurfOnTV	€ 44,00	1	768/128 Kbps
	Economy	€ 17,00	1	768/128 Kbps
	Family	€ 34,00	2	4096/128 Kbps
	Power	€ 54,00	5	4096/128 Kbps
Telenet	Mono	€ 41,95	1	4096/128 Kbps
	Duo	€ 45,00	2	4096/128 Kbps
	Quattro	€ 50,00	4	4096/128 Kbps
	Gaming Pack	€ 51,95	2	4096/192 Kbps
Tiscali	ADSL Advantage	€ 35,00*	1	3072/128 Kbps
UPC	Chello Classic	€ 49,86	1	1024/128 Kbps
	Chello Plus	€ 58,95	1	1536/128 Kbps
	Chello Professional	€ 58,95	5	1536/128 Kbps
Versatel	Free ADSL	€ 0,00*	1	512/256 Kbps
	Always ADSL	€ 19,90*	1	512/256 Kbps
XS4All	ADSL Go	€ 38,60	1	3072/128 Kbps
	ADSL Plus	€ 56,75	4	3072/192 Kbps
	ADSL Performer	€ 38,60	1	4096/256 Kbps
	ADSL Rocket	€ 41,02	1	8192/256 Kbps
	ADSL Rocket 4	€ 50,70	4	8192/256 Kbps

Annexe n°9. Comparatif des Tarifs GSM Belges selon le site www.speed.be.

Abonnement	même réseau pleines	même réseau creuses	Proximus pleines	Proximus creuses	Mobistar pleines	Mobistar creuses	Base pleines	Base creuses
United-Telecom Fix	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
United-Telecom Classic	0,20	0,20	0,20	0,10	0,20	0,10	0,20	0,10
United-Telecom Active	0,22	0,11	0,36	0,24	0,42	0,30	0,36	0,24
Mondial Télécom Family	0,18	0,18	0,30	0,30	0,30	0,30	0,19	0,19
Sun Télécom SUN	0,16	0,16	0,30	0,30	0,30	0,30	0,19	0,19
Phone-Plus	0,11	0,23	0,19	0,23	0,19	0,23	0,19	0,23
Happy HOME	0,07	0,09	0,20	0,14	0,20	0,14	0,20	0,14
Scarlet Phone	0,18	0,13	0,35	0,25	0,35	0,25	0,35	0,25
Sun Télécom FRIENDS	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Sun Télécom STAR	0,15	0,27	0,29	0,34	0,35	0,39	0,15	0,27
Toledo	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,18	0,18
Mondial Télécom Business	0,25	0,14	0,24	0,30	0,24	0,30	0,15	0,27
Primus Lcr Club	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Primus Lcr Télécom Multi	0,15	0,15	0,29	0,34	0,35	0,39	0,15	0,27
Mobistar Optimum For Me 240'	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Mobistar Optimum	0,15	0,15	0,38	0,15	0,15	0,15	0,38	0,15
Mobistar Optimum For Me 120'	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Mobistar Optimum professionnal 5	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
Mobistar Optimum For Me 360'	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Mobistar Optimum For Me 480'	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Mobistar Optimum professionnal 3	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
Mobistar Optimum professionnal 15	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
Mobistar Optimum professionnal 9	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
Mobistar Optimum professionnal 7	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Mobistar Optimum professionnal 20	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
Proximus PoxiFUN	0,15	0,10	0,15	0,10	0,50	0,25	0,50	0,25
Proximus PoxiFUN + AnyTime 60'	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
Proximus PoxiFUN + AnyTime 30'	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
Proximus PoxiFun + option ProxiFriends	0,13	0,08	0,13	0,08	0,50	0,25	0,50	0,25
Happy BIZ	0,08	0,08	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Mobistar Family	0,15	0,15	0,38	0,15	0,15	0,15	0,38	0,15
Transatel Travel	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
Proximus Proxi PRO + option AnyTime 180'	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
Proximus Proxi PRO	0,15	0,10	0,15	0,10	0,37	0,25	0,37	0,25
Proximus Proxi PRO + option AnyTime 300'	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
Proximus Proxi PRO + option AnyTime 120'	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
Proximus Proxi PRO + option AnyTime 240'	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
Proximus Proxi PRO + option AnyTime 60'	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
Proximus Proxi PRO + option ProxiFriends	0,13	0,08	0,13	0,08	0,37	0,25	0,37	0,25
Transatel Travel Plus	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19

Annexe n°10. La loi d'Erlang