

**UNIVERSITE DE LUBUMBASHI**  
**ECOLE SUPERIEURE DES INGENIEURS INDUSTRIELS**  
**Département de Génie Electrique**

---



---

**MINI PROJET DE TELECOMMUNICATION**  
**«Sujet : le faisceau optique atmosphérique»**

---



Présenté par : **ILUNGA KASHAMA Oné**

Promotion : Master I Télécom

---

**SEPTEMBRE 2018**



**UNIVERSITE DE LUBUMBASHI**  
**ECOLE SUPERIEURE DES INGENIEURS INDUSTRIELS**  
**Département de Génie Electrique**

---



---

**MINI PROJET DE TELECOMMUNICATION**  
**«Sujet : le faisceau optique atmosphérique»**

---

Présenté par : ILUNGA KASHAMA Oné

Dirigé par : Ass Noel LUKOMBA

Promotion : Master I Télécom

**ANNEE ACADEMIQUE 2017-2018**

---

## **RESUME**

Dans ce travail, il est question de faire une étude du faisceau optique atmosphérique ou de la liaison optique atmosphérique (LOA) qui est la dénomination française de « *Free Space Optic (F.S.O)* ». Après avoir défini les liaisons optiques en espace libre, nous avons fait une comparaison entre le faisceau optique atmosphérique et la fibre optique et puis une autre entre le FSO et la technologie Radio. Dans la suite de ce travail, nous avons eu à décrire les dispositifs de cette technique de transmission optique en espace libre (fonctionnement, caractéristiques techniques et équipements). Les formats de modulation les plus utilisés dans cette technologie ont été rappelés avant de chuter par les challenges des FSO.

## TABLE DES MATIERES

RESUME.....	.....
TABLE DES MATIERES .....	i
LISTE DES FIGURES.....	ii
INTRODUCTION.....	1
I. LE FAISCEAU OPTIQUE ATMOSPHERIQUE .....	2
I.1 Définition .....	2
I.2 Caractéristique du faisceau optique atmosphérique .....	2
I.3 Technologie Faisceau optique atmosphérique contre Fibre optique.....	3
I.4 Technologie FSO contre Technologie radio .....	4
I.5 Principe de fonctionnement des Faisceaux optiques atmosphériques.....	4
I.6 Principaux équipements du système FSO et leurs caractéristiques.....	5
I.6.1 L'émetteur .....	5
I.6.1.1 Diode Electroluminescente : DEL .....	6
I.6.1.2 Diode LASER .....	6
I.6.2 Canal de propagation .....	6
I.6.3 Le récepteur .....	6
I.6.4 Caractéristiques des équipements FSO.....	7
I.7 La modulation du signal lumineux.....	7
I.7.1 La Modulation OOK « On-Off Keying » .....	8
I.7.2 La modulation PPM “Pulse Position Modulation” .....	8
I.7.3 La modulation MPPM “Multi-pulse Pulse Position Modulation”.....	9
I.8 Les challenges des systèmes FSO .....	9
CONCLUSION .....	10
Reference bibliographique .....	11
ANNEXE .....	12

## LISTE DES FIGURES

Figure 1- faisceau optique atmosphérique [2].....	2
Figure 2- Comparaison de prix du service d'accès fourni par les systèmes FSO (Lightpoint) et celui du service assuré par des fibres optiques dans une région urbaine [1].....	3
Figure 3-Diagramme de communication des systèmes optiques en espace libre [4].....	5
Figure 4- visibilité directe entre l'émetteur et le récepteur du FSO [2]. ....	5
Figure 5- Synoptique du bloc émetteur FSO [5]. ....	6
Figure 6- Synoptique du bloc de réception FSO [5]. ....	7
Figure 7- Principe de base d'une transmission à modulation directe [5]. ....	8
Figure 8- La modulation OOK du message 10011010[5].....	8
Figure 9- La modulation 8-PPM du message 101 [5]. ....	9
Tableau 1- Répartition de bande de fréquence optique en espace libre [5] .....	12
Figure 10- Perte du trajet en fonction de la longueur d'onde [5]. ....	12

## INTRODUCTION

La transmission optique en espace libre ou liaisons optiques atmosphériques (LOA) dénomination française de « *Free Space Optic (F.S.O)* » existe depuis environ une trentaine d'années à l'état de prototypes dans un premier temps pour des applications militaires (programme Star War, département de la défense des Etats Unis (DoD)) et des essais de communication entre la terre et des satellites voire inter-satellitaire. Durant la dernière décennie, nombre de ces systèmes furent utilisés pour différentes applications dans le domaine spatial (liaisons terre-satellite, inter satellitaire, etc.). Il existe deux types de communications optiques sans fils : en espace libre (" outdoor") et en espace confiné (" indoor "). Les applications longues portées en espace libre sont très variées. On peut citer les communications entre bâtiments (sur quelques km), les liaisons terre-satellite et les liaisons entre satellites [5].

Dans ce travail, après avoir défini les liaisons optiques en espace libre, Nous ferons une comparaison entre le faisceau optique atmosphérique et la fibre optique et aussi une autre comparaison entre le FSO et la technologie Radio. Dans la suite, nous allons décrire les dispositifs de cette technique de transmission optique en espace libre (fonctionnement, caractéristiques techniques et composants). Les formats de modulation les plus utilisés dans ce contexte seront rappelés avant de chuter par les challenges des FSO.

## I. LE FAISCEAU OPTIQUE ATMOSPHERIQUE

### I.1 Définition

Le Faisceau optique atmosphérique (liaisons optiques atmosphériques) (LOA) à savoir l'utilisation de la lumière en espace libre dans les télécommunications, n'est pas récent. En 1880, quatre ans après l'invention du téléphone, Graham Bell utilisa la transmission d'un faisceau émis à partir du rayonnement solaire sur environ une distance de 213 m pour transmettre de la voix au moyen d'un appareil appelé "**photophone**". Bien que ce soit le téléphone filaire que l'histoire a conservé pour la postérité, Bell a toujours considéré le photophone comme sa plus grande invention : "The greatest invention I have ever made ; greater than the telephone" [1].

Le faisceau optique atmosphérique est une technologie optique qui permet la transmission de tous types de données avec un débit égal à celui de la fibre optique tout en ayant la souplesse et les avantages du sans-fil. La figure 1- nous montre l'image d'un LOA.

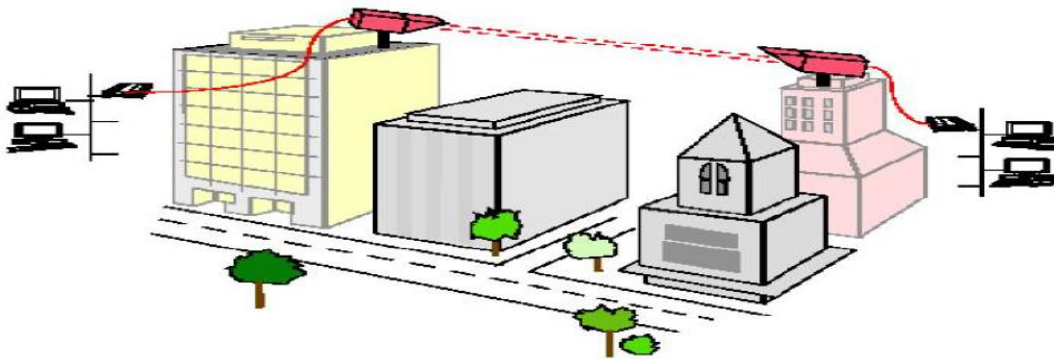


Figure 1- faisceau optique atmosphérique [2]

### I.2 Caractéristique du faisceau optique atmosphérique

Les caractéristiques de base de la technologie FSO sont [8] :

- **Énorme bande passante de modulation** : L'utilisation d'un support optique (fibre ou sans fil) dont la fréquence varie de  $10^{12}$ Hz à  $10^{16}$  Hz pourrait permettre la transmission de jusqu'à 200 THz de données ;
- **Faisceau de taille étroite** : Le rayonnement optique est connu par son faisceau très étroit, un faisceau laser typique possède un angle de divergence entre 0,01 et 0,1 mrad;
- **Un spectre ne nécessitant pas de licence contrairement aux transmissions hertziennes** ;
- **Rapide à déployer et redéployer** ;
- **Performance liée aux conditions climatologiques** ;
- **Faible taux d'erreur** : en effet la taille réduite du faisceau laser rend la détection, l'interception ou le brouillage très difficile ;
- **Sécurité intrinsèque des dispositifs, plus élevée que celle des liaisons radioélectriques** :

- ✓ Immunité aux interférences électromagnétiques
- ✓ Protocole de communication transparent (transmission sans codage).

L'absence de licences et de réglementation se traduit dans la facilité, la rapidité et le faible coût de déploiement. Et puisque les émetteurs-récepteurs FSO peuvent transmettre et recevoir à travers les fenêtres, il est possible de monter les équipements FSO à l'intérieur des bâtiments, ce qui réduit la nécessité d'allouer des espaces sur les toits, simplifie le câblage, et permettant aux équipements FSO de fonctionner dans un environnement très favorable.

### I.3 Technologie Faisceau optique atmosphérique contre Fibre optique

Les systèmes de communication optiques sans fil et les fibres optiques ont presque une même bande de transmission, d'ici vient l'importance de les comparer. Un des points les plus importants de la comparaison entre les deux systèmes est la manière dont ils transmettent la lumière. La lumière peut être transmise soit à travers l'espace libre ou à travers un milieu confiné. Le concept des liaisons FSO est similaire à la transmission optique à l'aide de fibres optiques, la seule différence est le support. La lumière se déplace plus vite dans l'air (environ 300.000 km/s) qu'à travers le verre (environ 200.000 km/s), ce qui fait que les communications à travers les liaisons FSO peuvent être considérées comme des communications à la vitesse de la lumière.

Un autre aspect important à prendre en compte est les avantages environnementaux de l'optique atmosphérique. L'installation des fibres nécessite le creusement de tranchées, qui peut causer la pollution, l'abattage des arbres et la destruction des monuments historiques, ce n'est pas le cas pour FSO, par conséquent les systèmes FSO sont respectueux de l'environnement [3]. La figure 2- nous montre le prix du service d'accès fourni par les systèmes FSO (Lightpoint) et celui du service assuré par des fibres optiques dans une région urbaine [3].

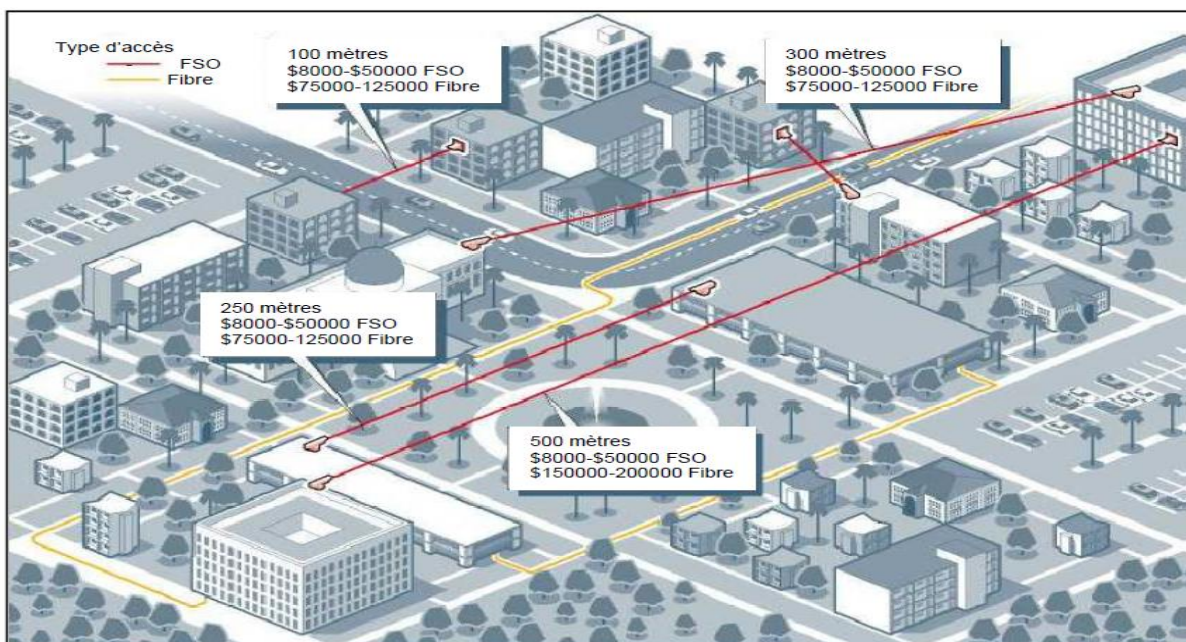


Figure 2- Comparaison de prix du service d'accès fourni par les systèmes FSO (Lightpoint) et celui du service assuré par des fibres optiques dans une région urbaine [1].



#### **I.4 Technologie FSO contre Technologie radio**

La demande de disposer des réseaux d'accès locaux sans fil, des réseaux multimédias et des transmissions vidéo à des débits élevés est sans cesse croissante. La technologie FSO devient de plus en plus populaire chaque jour, elle est préférée (en raison de ses avantages intrinsèques) sur les communications radio pour un certain nombre d'applications. D'un point de vue gestion du spectre, l'infrarouge offre une large bande potentiellement énorme qui est actuellement non réglementée dans le monde entier. D'autre part, la partie radio du spectre devient de plus en plus congestionnée chaque année, et l'attribution des fréquences radio est de plus en plus difficile et coûteux.

Un autre avantage de la transmission optique sans fil sur la technologie radio est son immunité aux interférences électromagnétiques. Cela rend cette technologie privilégiée dans des environnements où les interférences doivent être minimisées ou éliminées. FSO présente également des avantages sur la radio en termes de sécurité. Avec l'optique sans fil, des débits jusqu'à 10 Gigabits sont atteints à travers courtes et moyennes distances (de 100 m à 2 km), en full duplex. Par contre, le débit d'un réseau radio est limité et la couverture est bien plus importante, jusqu'à 15 km [3].

Malgré les avantages présentés par la technologie optique sans fil, elle n'est pas sans inconvénients. Les liaisons optiques sans fil sont sensibles au blocage par des objets, ce qui peut entraîner des perturbations de la liaison.

#### **I.5 Principe de fonctionnement des Faisceaux optiques atmosphériques**

Conceptuellement, une liaison optique atmosphérique est simple ; un émetteur dirige un faisceau laser vers un récepteur. Le faisceau laser, de taille finie, concentre l'intensité dans la direction du récepteur et rend toute tentative de son interception par une tierce personne très difficile. Une liaison FSO nécessite un émetteur, un canal de propagation et un récepteur. **Les LOA exigent une visibilité directe entre l'émetteur et le récepteur (line-of-sight)**. Ce pourquoi, le faisceau doit être dirigé avec précision dans la direction du récepteur. Les systèmes de communication laser en atmosphère libre peuvent inclure des dispositifs d'alignement actifs dans lesquels, la rétroaction du récepteur est utilisée afin de diriger automatiquement le faisceau vers le récepteur. Ces systèmes d'alignement actifs permettent une installation rapide et facile ainsi qu'une stabilisation optimale de la transmission (entre les toits des grands immeubles par exemple) lors de tremblement de terre, de mouvements reliés au vent ou consécutivement à toutes autres instabilités mécaniques du système [4].

A la réception, le système doit fortement exclure la lumière ambiante (lumière du soleil entre autre) qui peut perturber le signal reçu. En pratique, le détecteur à la réception possède un champ de vue optique assez petit et le dispositif de réception comporte des filtres qui permettent de ne laisser passer que les longueurs d'onde souhaitées. La figure 3- illustre le fonctionnement de faisceau optique atmosphérique et la figure 4- nous montre une visibilité directe entre l'émetteur et le récepteur du FSO [4].

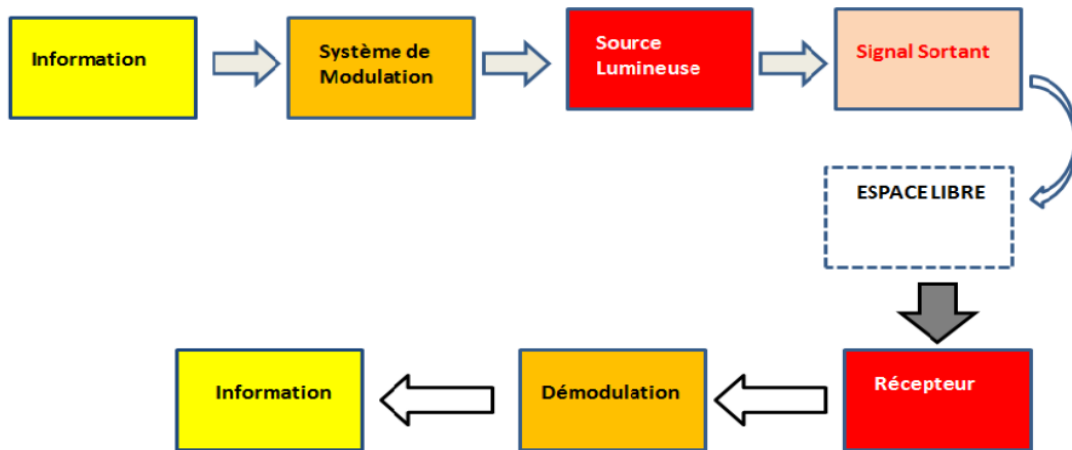


Figure 3-Diagramme de communication des systèmes optiques en espace libre [4].

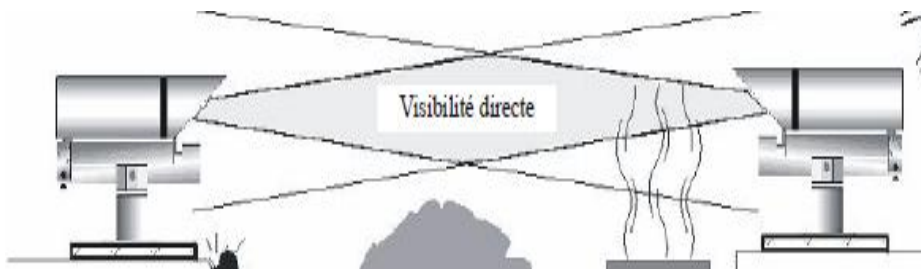


Figure 4- visibilité directe entre l'émetteur et le récepteur du FSO [2].

## I.6 Principaux équipements du système FSO et leurs caractéristiques

Les équipements LOA utilisent la modulation d'un faisceau laser pour échanger des informations binaires dans les deux sens (Full-Duplex) par l'intermédiaire d'un couple Emetteur/Récepteur (diode laser, APD, LED/diode PIN) à chaque extrémité. En général, c'est une liaison point à point, cependant, il existe des équipements LOA considérés comme des liaisons point à multipoint.

### I.6.1 L'émetteur

Le bloc émetteur assure la modulation de la source des données sur la porteuse optique. Il convertit le signal électrique modulé en un signal optique. Le signal se propage ensuite à travers l'atmosphère vers le récepteur. Le récepteur détecte l'onde modulée et récupère les données émises. La majorité des systèmes FSO sont conçus pour fonctionner dans les fenêtres de 780-850 et 1520-1600 nm ce qui correspond à des fréquences de transmission des données autour de 200 THz. Une représentation d'un schéma bloc émetteur de transmission optique en espace libre est donnée par la Figure 5- [5].

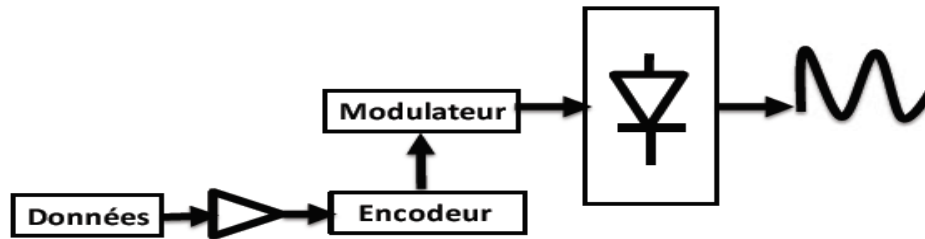


Figure 5- Synoptique du bloc émetteur FSO [5].

On distingue en particulier les émetteurs se basant sur les semi-conducteurs qui diffèrent principalement par la longueur d'onde et la puissance du faisceau émis et la rapidité de leur modulation.

### I.6.1.1 Diode Electroluminescente : DEL

La diode DEL est un composant optoélectronique capable d'émettre de la lumière lorsqu'il est parcouru par un courant électrique. En raison de leur puissance d'émission relativement faible, les DEL sont généralement utilisées pour des applications courtes distances et des bandes passantes de l'ordre de 155 Mbps. Elles sont utilisées dans les liaisons optiques sans fil à l'intérieur des bâtiments (Indoor Wireless Optical Communications " IWOC "). L'avantage majeur des sources DEL est leur faible coût d'acquisition [6].

### I.6.1.2 Diode LASER

La diode laser présente des avantages significatifs pour les applications longue distance comparée à la diode DEL. L'industrie des systèmes optique sans fil commercial est centrée sur l'utilisation de semi-conducteurs lasers, en raison de leur taille relativement petite, haute puissance, et de la rentabilité. La plupart de ces lasers sont également utilisés dans la fibre optique, par conséquent, la disponibilité n'est pas un problème. Dans la plupart des cas, les lasers à semi-conducteurs sont le choix préféré pour les entreprises qui ont besoin d'une source de lumière de puissance élevée et cohérente dans leur conception du système [7].

## I.6.2 Canal de propagation

Le canal de propagation constitue le milieu atmosphérique. C'est un milieu très complexe et dynamique pouvant affecter les caractéristiques du faisceau laser émis. Les systèmes FSO sont soumis à un certain nombre de défis liés pour la plupart aux facteurs environnementaux et plus particulièrement aux effets de l'atmosphère sur la propagation du faisceau émis [5].

### I.6.3 Le récepteur

Ce bloc fonctionnel permet essentiellement de récupérer et d'extraire les données transmises du champ optique incident. L'unité réceptrice se compose d'une série de lentilles qui concentrent le signal lumineux reçu sur un détecteur de lumière « **photodiode** ». A la réception, le système doit fortement exclure la lumière ambiante (lumière du soleil entre autre) qui peut perturber le signal reçu. En pratique, le détecteur possède un champ de vue optique assez petit et le dispositif

de réception comporte des filtres qui permettent de ne laisser passer que les longueurs d'onde souhaitées [9]. Une représentation d'un schéma bloc récepteur de transmission optique en espace libre est donnée par la Figure 6-.

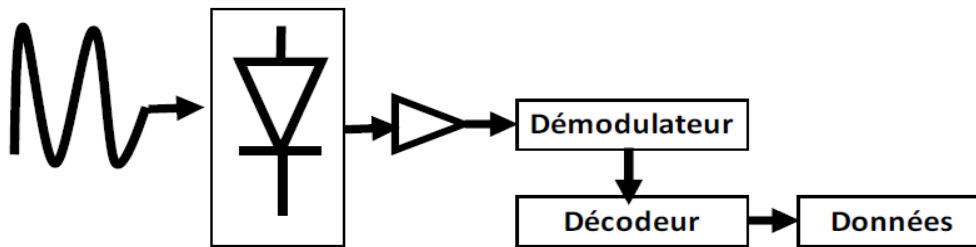


Figure 6- Synoptique du bloc de réception FSO [5].

En plus des sources de transmission optique, les détecteurs optiques sont aussi d'une grande importance dans la réalisation et le design d'un système optique sans fil. **Les photodiodes semi-conducteurs** sont petites, rapides, sensibles et peuvent fonctionner dans des gammes de longueurs d'onde différentes, ce qui font d'elles, les photo-détecteurs les plus utilisés dans les systèmes de communications optiques sans fil commercialisés.

#### I.6.4 Caractéristiques des équipements FSO

Les paramètres principaux dont nous devons tenir compte pour la définition des liaisons optiques en espace libre sont [7] :

- **La portée ;**
- **La sécurité.**

Un certain nombre de paramètres secondaires est également à prendre en compte pour le choix des systèmes FSO. Parmi ceux-ci nous pouvons citer :

- **La longueur d'onde de la transmission** qui influence la marge brute du système et par conséquent la qualité de service ;
- **Le type et le nombre d'émetteurs optiques** qui peuvent aussi influencer la marge brute du système ;
- **Le coût du système.**

#### I.7 La modulation du signal lumineux

Les systèmes actuels de transmission FSO s'appuient sur les technologies de détecteurs et démodulateurs développées pour les communications optiques. Dans la plupart des cas, le système FSO utilise la modulation d'intensité et la détection directe (IM/DD). La limite de cette méthode provient de l'élargissement spectral de la diode laser. Cela restreint les possibilités de sélection spectrale fine. En effet, un élargissement spectral de la diode nécessite un filtre assez large pour ne pas supprimer une partie du flux lumineux utile [5]. L'élargissement de ce filtre augmente la lumière parasite qui pénètre. En réception, le signal lumineux est focalisé sur un détecteur photodiode de type PIN. La puissance optique reçue est convertie en un courant

électrique. Ainsi, il ne contient aucune information sur la fréquence et sur la phase. Un schéma illustrant une modulation directe est représenté à la Figure 7-.

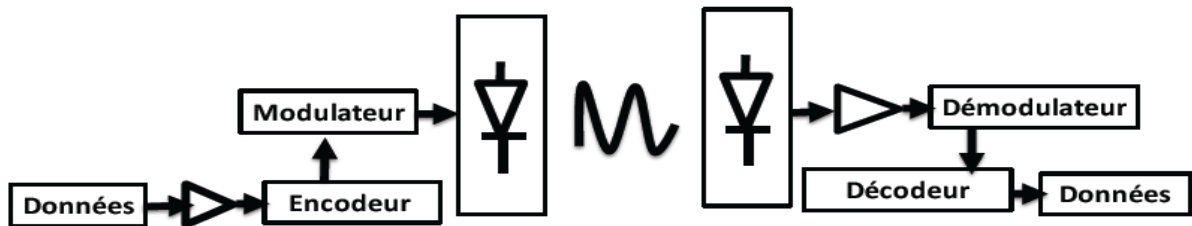


Figure 7- Principe de base d'une transmission à modulation directe [5].

Il existe 3 méthodes de modulation, la première est la modulation OOK « On Off Keying », la 2<sup>e</sup> est la modulation d'impulsion PPM « *Pulse Position Modulation* » et enfin le MPPM « *Multi-pulse Pulse Position Modulation* ». Ces 3 méthodes de modulation sont analysées et comparées entre elles en termes d'efficacité spectrale, d'efficacité en puissance et de débit de transmission pour différents paramètres de conception.

### I.7.1 La Modulation OOK « On-Off Keying »

OOK (*On-Off Keying*) est la modulation la plus simple et la plus utilisée dans les systèmes de communication optique sans fil commercialisés en raison de la facilité de la mise en œuvre, la simplicité de conception du récepteur et le meilleur rapport coût efficacité. Avec la modulation OOK les données binaires sont représentées par présence ou absence d'une impulsion lumineuse dans chaque intervalle de durée  $T_s$  secondes « slot » [5]. La séquence d'informations binaires peut être directement encodée en une suite d'impulsion lumineuse et envoyée à travers le canal. Selon la règle, si le bit d'information est '1' une impulsion laser sera transmise, et si le bit d'information est '0' aucune impulsion ne sera transmise (figure 8-).



Figure 8- La modulation OOK du message 10011010[5].

Le débit atteint par cette méthode de modulation est noté  $D=1/T_b$ , où  $T_b$  est la durée du bit. Le débit de donnée est directement lié à la vitesse à laquelle la source peut être allumée et éteinte.

### I.7.2 La modulation PPM «Pulse Position Modulation»

La technique de modulation PPM est une autre technique de modulation compatible, avec les systèmes de modulation « IM/DD », elle présente l'avantage de l'efficacité en puissance par rapport à OOK, mais au détriment d'un besoin en bande passante accrue et une plus grande complexité à cause du haut niveau de précision requis dans la synchronisation des symboles. En PPM, chaque séquence de bits de données  $\{0,1\}$  de longueur  $b$  est encodée à un de  $M$  symboles possible, chaque symbole de durée  $T$  est divisé en une série de  $M$  sous intervalles ou slots de durée  $T_s$ . L'information est transmise par une impulsion dans un slot unique, tandis que

dans les autres  $(M-1)$  slots aucune impulsion ne sera émise. La position de l'impulsion correspond à la valeur décimale de  $b$  ( $b = \log_2 M$ ) qui varie entre 1 et  $M$ , dans ce cas l'information est présentée par la position de l'impulsion, et cela se répète à chaque  $T$  seconds [5].



Figure 9- La modulation 8-PPM du message 101 [5].

La PPM est bien adaptée aux transmissions sur longues distances où le signal à transmettre doit être bref et intense, la seule contrainte est la nécessité de restituer la base de temps.

### I.7.3 La modulation MPPM “Multi-pulse Pulse Position Modulation”

La modulation MPPM, proposée par *Sugiyama* et *Nosu*, appelée aussi (*Combinatorial PPM*) est une généralisation de la méthode PPM, elle permet d'atteindre un débit d'informations nettement amélioré, ainsi qu'une meilleure efficacité spectrale. MPPM est une modulation qui a été proposée pour améliorer l'efficacité d'utilisation de la bande passante de PPM, cette méthode réduit l'exigence en bande passante jusqu'à moitié, avec la même efficacité de transmission [5].

### I.8 Les challenges des systèmes FSO

L'atténuation d'un signal optique transmis par fibre peut être prévisible. D'autre part, l'atténuation d'un signal optique transmis dans l'espace libre n'est pas prévisible (*les conditions climatologiques changent dans le temps et dans l'espace*), en raison de cette imprévisibilité, il est plus difficile de contrôler la transmission des rayons optique en espace libre. Cette imprévisibilité affecte la disponibilité du système et les capacités de conception. Les principaux facteurs qui influencent les liaisons optiques sans fil sont [8] :

- **La présence des différents types d'obstructions** (végétation, passage d'oiseaux,...) ;
- **Le rayonnement solaire** (l'orientation de la liaison joue un rôle important) ;
- **L'alignement du faisceau** ;
- **L'atténuation par les fenêtres si le système est déployé derrière les vitres** ;
- **La distance de la liaison** ;
- **L'atténuation due à la divergence du faisceau** ;
- **L'atténuation atmosphérique liée à la composition de l'atmosphère, aux effets des scintillations ainsi qu'à la présence des aérosols** (brouillard, polluants,) et des hydrométéores ;
- **Absorption** ;
- **Diffusion atmosphérique.**

Chacun de ces facteurs provoque une atténuation du signal et perturbe ainsi les performances de la liaison [1].

## CONCLUSION

Les transmissions laser en espace libre offrent aujourd'hui l'opportunité des communications à haut débit dans des secteurs encombrés. Le besoin en largeur de bande se développe plus rapidement que l'infrastructure des réseaux créant de ce fait, un étranglement entre les réseaux à haut débit (demandé par le consommateur) et le backbone des réseaux de télécommunications. Les fibres optiques peuvent surmonter ce problème. Cependant, l'extension de leurs réseaux à chaque utilisateur a un coût très élevé et nécessite un temps d'installation important. La nécessité d'avoir une meilleure sécurisation des réseaux pour des applications gouvernementales stimulent actuellement une plus large adoption des liaisons optiques sans fil.

Peu onéreux, simples à installer et à exploiter, non soumis à des réglementations contraignantes, les équipements de transmission laser se prêtent à presque toutes les configurations de réseaux et couvrent un grand nombre d'applications. Ils permettent de fournir une connectivité optique rapide et fiable et haut débit comparable aux débits de la fibre optique, tout ayant la souplesse du sans fil. Les fournisseurs de services peuvent déployer des solutions FSO où et quand nécessaire, comme ils l'entendent, dans n'importe quelle topologie, à une fraction du coût. Cette souplesse rend la solution FSO extrêmement attrayant. Cependant, les FSO sont soumises à un certain nombre de défis reliés pour la plupart aux facteurs environnementaux et plus particulièrement aux effets de l'atmosphère terrestre sur la propagation du rayonnement.

La technologie FSO va probablement continuer d'être favorisée pour les communications haut débit à courtes distances, à faible coût, et où l'immunité aux interférences est nécessaire. D'autre part, la technologie de communication radio et fibre optique, vont continuer à être utilisées pour la transmission sur longues distances, ou pour les systèmes de communications fonctionnant dans des environnements où les conditions atmosphériques sont d'un impact considérable

Nous nous estimons heureux d'avoir pu travailler sur ce sujet car il nous a apporté de nouvelles connaissances ; des connaissances qui nous aidera dans notre vie académique tout comme active.

## REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] **M. Naboulsi**, « Contribution à l'étude des liaisons optiques atmosphériques : propagation, disponibilité et fiabilité » Décembre 2005.
- [2] **Rapport UIT-R F.2106**, « Applications du service fixe utilisant des liaisons optiques en espace libre » 2007.
- [3] **R. Mehdi**, « Etude et Modélisation d'une Liaison Optique Sans Fil » 2013.
- [4] **B. Ahmed** et **B. Kanoun**, « Analyse des performances d'une communication optique en espace libre » 2015
- [5] **O. Ringar**, « Utilisation des techniques avancées d'Emission/Réception multi-antennes pour une transmission optique large bande » Octobre 2015.
- [6] **A. Bdeoui**, « Etude des éléments d'une liaison optique en microonde : modèle de laser avec transposition du bruit 1/F autour de la fréquence de modulation-nouvelle configuration de photodétecteur à cavité étendue microphotonique » avril 2006.
- [7]. **S. FORGET**, « Les Lasers et leurs applications –II » 2013
- [8] **B. Sorrente**, « vers des avions connectés par liaison optique » décembre 2017.
- [9]. **C. Schwob** et **L. Julien**, « Le laser : principe de fonctionnement » décembre 2010.



## ANNEXE

### ANNEXE 1 : Répartition de bande de fréquence optique en espace libre

La bande de fréquence attribuée à la communication optique est répartie en cinq fréquences telles que présentées dans le Tableau 1- [5].

Tableau 1- Répartition de bande de fréquence optique en espace libre [5]

Bande de fréquence	Longueur d'onde attribuée
<b>Bande C</b>	1528-1561nm
<b>Bande L</b>	1561-1660 nm
<b>Bande O</b>	1260-1360 nm
<b>Bande E</b>	1360-1460 nm
<b>Bande S</b>	1460-1528 nm

### ANNEXE 2 : Perte du trajet en fonction de la longueur d'onde

La Figure 10- montre la variation de la perte en espace libre pour trois longueurs d'ondes différentes en fonction de la distance. Bien que la perte augmente avec la distance, nous constatons sur la Figure 10- que la longueur d'onde 1550 nm sera mieux adaptée car, quelle que soit la distance de propagation, les pertes sont toujours inférieures de 5 dB par rapport à celles à 1300 et 850 nm.

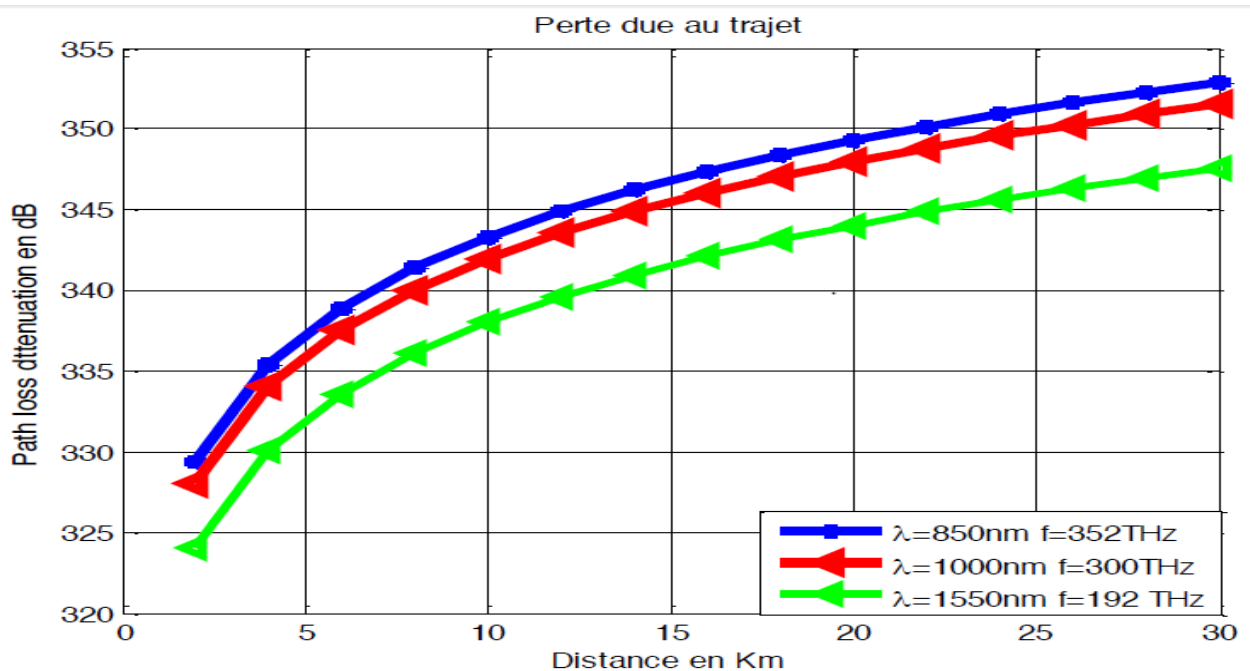


Figure 10- Perte du trajet en fonction de la longueur d'onde [5].