

## Projet de fondation d'un M2

### Réseaux optiques et systèmes photoniques, Transport et traitement de l'information

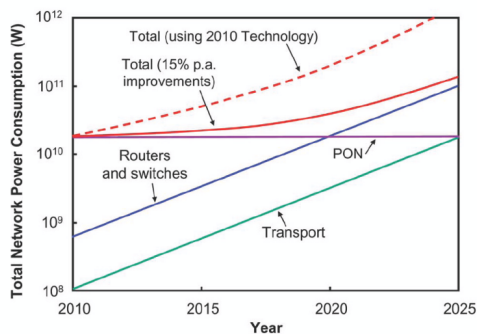
#### 1. Contexte

Les technologies des communications optiques sont devenues aujourd'hui incontournables et ont un impact direct sur la société. Les récents progrès des domaines de l'électronique et de l'optoélectronique ont permis un développement spectaculaire des systèmes de transmission sur fibre optique qui s'est accompagné d'un accroissement des débits transportés, tout en assurant une constante réduction des coûts. Proche du public, on peut citer le déploiement massif de la Fibre Optique pour les liaisons domestiques, (70% de couverture prévue en 2020) correspondant à un investissement en France de 21 milliards d'euros destiné à basculer dans le très haut débit. Plus caché sont les réseaux métropolitains et cœur qui utilisent exclusivement la fibre optique depuis plus d'une décennie. Cette croissance a été rendue possible par l'avènement de nouvelles technologies optiques, comme l'augmentation du nombre de canaux de transmission qu'il est possible de multiplexer en longueur d'onde dans une seule fibre optique monomode (liaisons WDM pour « Wavelength Division Multiplexing »). Les capacités des systèmes de transmission sur fibres optiques atteignent de nos jours plus de 15 Tbit/s sur 7000 km (capacité transportée par une seule fibre optique monomode !).

Les futurs acteurs dans ce domaine technologique en pleine expansion devront faire face à des enjeux majeurs que sont (entre autres) : les réponses à la demande croissante en bande passante, la diminution de l'impact énergétique des systèmes de communication, les technologies liées aux interconnexions optiques et en particulier à la réalisation de fonctionnalités optiques sur des circuits intégrés.

Les performances des systèmes de transmission sur fibre optique actuellement en cours de développement atteignent les limites de performance fixées par la théorie. Certaines études prévoient que les technologies actuelles ne permettront d'absorber l'augmentation continue du trafic de données et ce dès 2025 [Ref?? A vérifier]. De nouvelles approches sont actuellement abordées. Citons l'utilisation de fibres optiques multimodes qui ouvre de nouvelles perspectives en terme de capacité, mais qui nécessite encore de gros efforts en recherche et développement.

Outre son impact sociétal, il est dorénavant admis que le développement des technologies de l'information doit également être analysé au vue de son impact environnemental. Des études scientifiques récentes montrent que la part de l'énergie électrique consommée par le fonctionnement des réseaux au niveau mondial est actuellement de l'ordre de 1% de la consommation électrique mondiale [Baliga:2009,Tucker:2009] et devrait grimper en 2025 à près de 7% de la consommation électrique mondiale de 2010 (soit 2 TW !!) [Tucker:2011]<sup>1</sup>. Un modèle d'évolution de la puissance électrique consommée pour le fonctionnement des réseaux à l'échelle mondiale est représenté sur la figure ci-dessous extraite de [Tucker:2011].



Projection de l'évolution de la puissance électrique totale consommée par les réseaux sur la période 2010-2025, ainsi que les contributions dues à la couche transport, aux routeurs et commutateurs et aux réseaux d'accès (PON, pour Passive Optical Networks). Le modèle tient compte d'une amélioration d'efficacité des équipements de 15% par an, une augmentation de 50% par an du débit sur les réseaux d'accès et 10% d'augmentation par an du nombre d'utilisateurs (à l'exception de la courbe en pointillés qui suppose une amélioration nulle des performances énergétiques des équipements).  
Figure extraite de [Tucker:2011].

<sup>1</sup> Le modèle fait l'hypothèse d'une amélioration de 15% de l'efficacité énergétique des équipements du réseau. Sans amélioration de l'efficacité énergétique des équipements, la part de la consommation électrique mondiale consommée par les réseaux grimperait à 75% !! [Tucker:2011].

Au delà des valeurs de puissance, ce graphe illustre un point crucial au sujet de l'impact énergétique des réseaux du futur. Il montre en effet qu'à partir de 2020, la consommation énergétique sera dominée par le fonctionnement des routeurs et des commutateurs. Ces dispositifs assurent une des fonctions de base d'un réseau d'information, à savoir l'acheminement de données d'un utilisateur à un autre et l'interconnexion entre les réseaux. On voit qu'il est primordial à l'avenir de développer des nouvelles solutions capables de répondre aux contraintes technologiques (débits, nombre de canaux, bande passante, granularités des signaux à traiter (??)...) mais aussi environnementale.

Or ces interconnexions diffusent dorénavant au niveau des circuits intégrés. En raison d'une plus faible consommation d'énergie par bit et par unité de distance, les liaisons optiques se substituent désormais aux liaisons électriques dès que le produit bande passante-distance excède 100 Gbit/s-m. Après avoir totalement pénétré les systèmes de transmission longue distance, les liaisons optiques sont dorénavant introduites pour relier des cartes entre elles (distance de l'ordre du mètre, voir de quelques dizaines de cm) et certaines stratégies envisagent d'intégrer des liaisons optiques au niveau des cartes [Krishnamoorthy:2008,Krishnamoorthy:2009].

En plus d'assurer des fonctions de transmissions à faibles pertes, ces liaisons optiques devront également intégrer des fonctions élémentaires de traitements de l'information comme la commutation, le routage ou même des fonctions de mémoire [Krishnamoorthy:2008qy]. Cette nécessité de créer des interconnexions optiques [Barwicz:07,Miller:2000kx] sur une technologie compatible CMOS explique le développement des thématiques de recherche liées à la « Photonique du Silicium » [Jalali:2004,Jalali:2006]. La filière technologique « Silicium sur Isolant » (SOI) constitue une plateforme prometteuse pour la réalisation de fonctions de guidage, d'émission et de réception [Lipson2005], mais aussi pour la réalisation de fonctions de traitement de l'information utilisant les fortes nonlinéarités optiques du silicium [dinu:2954,Dekker:2007,Lin:2007].

Ces futures évolutions dans le domaine des télécommunications optiques soulignent les formidables défis que les ingénieurs et les chercheurs ont à relever pour accompagner cette demande croissante en bande passante, et pour concevoir des systèmes plus efficaces, moins coûteux et moins gourmands en énergie.

Les futurs acteurs dans ce domaine technologique en pleine expansion devront être formés aux différents aspects tant au niveau scientifique et technologique qu'au niveau économique et sociétal.

Les futures évolutions seront guidées par des choix stratégiques qui devront intégrer la complexité de ces systèmes. Ces technologies font appel à des connaissances acquises en physique fondamentale, en nanotechnologie, en optique, en électronique et en réseaux et plus particulièrement dans le domaine des nanotechnologies et du traitement de l'information et des signaux.

- **des notions de physique fondamentale** : Le fonctionnement des futurs composants et systèmes reposera sur des effets physiques toujours plus évolués et multiples. Par exemple la manipulation de photons jusqu'à leur propriétés quantiques revêt aujourd'hui une importance sans cesse croissante. Aussi le domaine de recherche sur des matériaux présentant des effets optiques spécifiques est très actif en optoélectronique et en optique non linéaire. Il est primordial pour un acteur du domaine des communications de pouvoir se donner les moyens de comprendre, de cerner, l'état des connaissances au niveau de la recherche de pointe.
- **les technologies de fabrication et d'intégration des composants** : la réalisation de composants à forte intégration, bas coût et à faible consommation d'énergie, s'appuiera sur des technologies de fabrication et d'assemblage toujours plus avancées et plus intégrées et pourront s'appuyer sur les progrès réalisés dans le domaine des nanotechnologies.
- **les interfaces optiques/électroniques / Notion de systèmes, de chaîne de traitement de signaux** : En raison de sa capacité en termes de débit, l'information optique pénètre plus avant dans les cartes, voire dans les puces à des fréquences très élevées (jusqu'à 100 GHz). Cette information doit être traitée et transformée faisant appel aux technologies des télécommunications optiques très performantes (DWDM systèmes numériques cohérents). Les choix technologiques nécessitent une vision large des interfaces électroniques et optiques.
- **les systèmes de transmission optiques** : La télécommunication des informations à des débits de l'ordre du Tbit/s sur toute les échelles de distances planétaires nécessite d'agréger un ensemble de composants pour une distance de transmission et une capacité donnée aux moindres coûts et consommations d'énergie. Ceci nécessite une connaissance des interactions entre tous les composants et les phénomènes physiques propres à chacun afin d'assurer sans erreur la fonction de télécommunication globale demandée. A l'avenir les systèmes devront être suffisamment souples pour s'adapter aux variations de demande de capacité dans l'ensemble d'un réseau optique
- **les traitements des signaux et de l'information** : La complexité des effets subis par les signaux lors de leur propagation, la multiplicité des étapes de traitement qui sont opérées pour assurer des fonctions de commutation, de routage, de codage conduisent à des distorsions inévitables du signal. Il est indispensable alors de recourir à des techniques toujours plus évoluées faisant appel à la modélisation mathématique des signaux et de l'information afin d'adapter le signal numérique au canal de transmission dans son ensemble.
- **les réseaux optiques** : La conception des réseaux de communications fixes doit tirer partie de l'optique pour répondre aux défis associés de la consommation énergétique et de l'augmentation en débit. Les composants et

dispositifs photoniques doivent donc s'intégrer dans un schéma plus global, que ce soit dans une architecture de réseaux conventionnelle en couches ou une approche « cross-layer », plus optimisée.

- **des applications au-delà des télécoms** : Les connaissances acquises en physique pour les composants photoniques, en traitement du signal et de l'information peuvent être directement adaptées pour la mise en place physique de systèmes dans le domaine des capteurs et réseaux de capteurs, de la caractérisation optique des matériaux et composants ainsi que dans le domaine de la bio-photonique.

Compléter les références et les reporter dans le paragraphe références Nicolas

A la nécessité de former des acteurs éclairés au niveau scientifique et technologique, il faudra également intégrer systématiquement des outils de réflexion sur l'impact énergétique de ces technologies. Elles doivent prendre en compte l'environnement du composant, l'hétérogénéité du trafic de données, la projection sur le fonctionnement dans une architecture en cascade... Une formation aux métiers qui touchent au développement des futurs systèmes de communication devra aborder les notions de développement durable.

### 1.1 Contexte académique (Didier, Catherine, Zeno, Nicolas, Arnaud)

Contexte Paris-Saclay : réunir des compétences – mutualisation, structuration de la communauté

Contexte Plateau Saclay : réunion de compétences dans le domaine des télécom (Universités, institutions académiques et industrielles, centre R&D...)

Déclinaison par établissement des offres en formation autour des thématiques « télécom » décliné par les différents parcours (5 lignes chacun) :

- P11

- Institut Mines-Telecom/ Telecom PT

- Institut Mines-Telecom/ Telecom SudParis

- Supélec

Composants optoélectronique : lasers à semi-conducteurs (edge et VCSEL), LED et détecteurs –

Liaisons à fibres optiques principes et électronique associée

Systèmes de transmission optiques sans fil (FSO, IRDA, LiFi, fonctions d'éclairage...)

Systèmes optiques courte distance et dans la boucle (Datacom, FOMultimode, FTTH...)

Stages de Formation Continue au catalogue (1 semaine) : Réseaux optiques à très haut débit (MG09),

Les fibres optiques et leurs utilisations (OG11), Optoélectronique - composants et applications (OG10)

- Institut d'Optique

Conclusion : diversité de l'offre de formation , pertinence de regrouper nos forces et nos compétences dans le cadre de la Mention IST de UPSay

### 1.2 Contexte de recherche scientifique

La recherche scientifique pour la photonique, le transport et le traitement de l'information optique date de l'invention du laser et de la fibre optique dans les années 60-70 et ne cesse d'être motivée par les demandes croissantes d'échange d'informations sur toutes les dimensions planétaires avec le souci de fournir, pour chaque type de demande, la solution la plus économique (en tout sens du terme). A l'heure actuelle, un effort de recherche important est mené sur l'intégration des composants et sur le développement de dispositifs bas coût pour les systèmes optiques d'accès pour lesquels l'installation est en cours. Pour cela les filières de composants III-V ainsi que la filière de photonique sur silicium travaillent conjointement pour fournir des interfaces optoélectroniques intégrées. La recherche sur les systèmes de transmission optique prolonge la croissance du produit de la capacité d'information transmise par la distance de transmission tout d'abord en implémentant des nouvelles techniques de modulation sur

toutes les caractéristiques de la lumière, de codages et de traitement du signal pour pousser à la limite la transmission sur fibre monomode. Un développement vers une transmission sur fibre multi-mode est une des seules possibilités envisagées pour combler la demande de capacité à l'horizon 2020. Cette nouvelle voie réalimente également la recherche sur les multiplexeurs / démultiplexeurs, amplificateurs et composants multi-modes. Le traitement du signal est de l'information, après avoir transposé vers le domaine de l'optique, les techniques employées dans le domaine des transmissions radio, s'escrime à traiter des signaux ayant subi des effets non-linéaires lors de leur propagation. Enfin du point de vue des réseaux, l'axe fort de recherche se porte sur la souplesse des réseaux optiques à l'adaptation au trafic, impliquant des émetteurs récepteurs à débit variable, des nœuds de routage transparent et agile et un contrôle logiciel de l'ensemble des liens optiques. Ceci implique également le développement de composants à paramètre variables et d'algorithmes de routage incluant les contraintes des liens physiques. Une recherche de connectivité optique de courte portée et de grande capacité est aussi enclenchée pour permettre des liens rapides pour les data-centers et leurs inter-connexions. Parallèlement une recherche plus amont vise à créer de nouvelles fibres, à appréhender de l'information au niveau de la physique quantique et à développer le traitement parallèle de l'information directement sur la lumière. Enfin les applications des dispositifs et systèmes photoniques se déploient largement au-delà du domaine des télécommunication notamment dans celui des capteurs et réseaux de capteurs, de l'instrumentation optique, de la biophotonique et des techniques d'imagerie biomédicales.

**A compléter par une description du paysage recherche local (Paris Saclay, IdF), incluant des acteurs académiques et industriels**

## 2. Formations existantes ou ayant existé récemment

Des formations « généralistes » sur le fonctionnement des réseaux de communications sont présentes dans les établissements suivants : Télécom ParisTech, Télécom SudParis, Supélec, Univ Paris Sud, Ecole Polytechnique,... . Ces formations se divisent en Mastères spécialisés et Masters recherche (MSc, Master of Science). Les thèmes abordés sont (liste non exhaustive) :

- *Communications systems* (MSc, Télécom ParisTech)
- *Networked computers systems* (MSc, Télécom ParisTech)
- *Signal, Images, Reconnaissance des formes* (Mastère, Télécom ParisTech)
- *Sécurité des systèmes informatiques et des réseaux* (Mastère, Télécom ParisTech)
- *Systèmes de communications à haut-débit* (Mastère, Télécom ParisTech)
- *Master of Science Electrical and Optical Engineering* (MSc/Mastère, Télécom SudParis)
- *Spécialité Réseaux et Télécommunications du Master Information, systèmes et technologie* (Univ Paris Sud, ENS Cachan,...)

Au niveau national, il existe seulement quelques formations « généralistes » clairement orientées télécommunications optiques, destinés à la fois pour la poursuite en thèse ou l'accès direct vers l'industrie. Le *Mastère Photonique* (Télécom Bretagne/ENSSAT/INSA Rennes, ...) propose un enseignement spécifiquement dédié à la photonique avec un parcours *Télécommunications Optiques*. Toutefois, l'aspect Traitement Numérique des signaux y est relativement peu abordé. La plupart des mastères orienté « Télécom » dispensent des modules de formation en photonique (aspects composants/dispositifs et systèmes) dans un cursus beaucoup plus vaste allant des systèmes radiofréquences aux notions de d'architectures de réseaux et de protocoles. Le Mastère *Systèmes Communicants* (UPMC en partenariat avec Télécom ParisTech) forme des étudiants possédant les connaissances liées aux systèmes de communication numériques, aux systèmes embarqués ou à la conception de systèmes fonctionnant à des fréquences radio, micro-ondes et optique. Il existe un certain nombre d'autres mastères au niveau national dont les contenus sont généralement fortement corrélés aux thématiques de recherche des équipes enseignantes (nano-technologies, lasers, instrumentation, domaines d'application autre que les Télécommunications).

Une première analyse de ces offres montre que ces formations abordent pour l'essentiel des notions sur le fonctionnement et la gestion de systèmes et de réseaux d'information. Seules les deux dernières formations citées abordent les technologies optiques de manière plus importantes. Mais ces notions restent cantonnées au domaine des liaisons numériques sur fibre optique et n'abordent que trop peu les notions fondamentales liées au traitement de l'information optique. Il est à souligner que cette notion prend une importance accrue avec le développement des circuits de traitement numériques du signal adaptés aux transmissions à très haut débit.

Plusieurs mastères au niveau européens proposent des formations spécifiquement dédiées aux domaines des télécommunications optiques, alliant technologies photoniques aux aspects réseaux de communications. L'accroissement de la vitesse des circuits électroniques permet de profiter d'un savoir-faire en traitement du signal dédié jusqu'à présent uniquement au secteur des radiocommunications L'introduction des techniques de codage, et

celle plus récente de la détection cohérente révolutionne actuellement la conception des architectures de systèmes et réseaux optiques. Plusieurs universités européennes proposent ce type de formations pluridisciplinaires

- *Optical communications and Photonic technologies* (Politecnico Di Torino)
- *European Msc in Photonics* (Univ. Of Ghent, Univ. St Andrews)
- *Communication Networks and Signal Processing* (Univ. Of Bristol)

Il n'existe pas aujourd'hui au niveau national ce type de formation avec une approche pluridisciplinaire.

### 3. Projet

#### 3.1 Ossature de la formation

OBJECTIFS D'APPRENTISSAGE - COMPETENCES :

\*\* Concevoir des systèmes de communications optiques en fonction des contraintes (débit, distance)/ en fonction d'un cahier des charges/ des applications/utilisations

\*\* Concevoir des architectures de réseaux optiques (accès, métro, coeur) optimisées (performances, énergie) dans une approche multicouches (transversale de la couche physique aux couches réseaux)

\*\* Choisir des composants optiques (fibres, lasers...) en fonction de leurs performances pour construire des solutions de réseau

\*\* Concevoir les dispositifs nécessaires pour définir les besoins des futurs réseaux

\*\* Décliner l'expertise acquise en solutions optiques dans d'autres domaines d'application (métrologie, capteurs...)

LISTE DES MODULES – GRANDS THÈMES :

Module 1 : Notions de physique, de mathématiques appliquées, de théorie de l'information de communications numériques et de réseaux (Nombre d'heures ??)

Ce premier module a pour vertu de combler les lacunes dans les prérequis de la formation dans le domaine de la physique, des mathématiques, de la théorie de l'information et des communications numériques ou encore dans les éléments de base sur les réseaux. Toutes les thématiques ne seront pas abordées, uniquement celle manquante à la formation antérieure.

Module 2 : Dispositifs et composants, filières technologiques, technologies de rupture, les interfaces optiques/électroniques, Notion de systèmes, de chaîne de traitement de signaux (Nombre d'heures ???)

Module 3 : Traitement des signaux et de l'information optique (30 heures)

Module 4 : Les systèmes de transmission optiques (30 heures)

Module 5 : Les réseaux optiques (45 heures)

Module 6 : Domaines d'ouverture : capteurs, biophotonique, Lidar, Imagerie, Cellules photovoltaïques, instruments de caractérisation de composants, diagnostic et santé...(30 heures)

#### 3.2 Travaux pratiques

- Simulations optiques avec des logiciels spécifiques Optisys, VPI, Matlab...

- Travaux Pratiques d'initiation aux Fibres Optiques : systèmes EDUCOPTIC, IDIL, ...

- Travaux pratiques sur plateformes expérimentales : plateforme de caractérisation de composants (techniques de modulation, amplification optique, ...), plateforme RoF, plateforme WDM ?, plateforme très haut débit ?

- Visites dans les laboratoires industriels

### 3.3 Stages

Durée: 5 mois minimum

Les étudiants effectueront un stage de 5 mois minimum dans une entreprise ou un laboratoire de recherche et développement académique afin d'acquérir une première expérience professionnelle.

### 3.4 Disciplines non scientifiques

Connaissance du milieu industriel (Badr Eddine,...)

Connaissance du marché

Réseaux de l'optique en Ile de France : OpticsValley

### 3.5 Enseignants

A compléter, Nicolas, Didier, Arnaud...

Equipe pédagogique IMT/ TSP : Badr Eddine Benkelfat, Marc Castella, Yann Frignac, Eric Gangloff, Yaneck Gottesman, Frédéric Lehmann, Régine LeMontagner, Catherine Lepers, Mounia Lourdiane, Abderrahim Ramdane, Qin Zou

Équipe pédagogique IMT/ TPT : Philippe Ciblat, Didier Erasme, Renaud Gabet, Frédéric Grillot, Yves Jaouën, Ghaya Rekaya-Ben Othman, Cédric Ware.

Équipe pédagogique Supélec : Alain Destrez, Zeno Toffano

### 3.6 Débouchés

Ingénieur en optoélectronique, à compléter Badr Eddine...

Architecte réseaux, Ingénieur télécom, Recherche et Développement dans les systèmes et dispositifs de communications optiques (doctorat, ingénieur de recherche), Stratégie et conseils, Ingénierie des réseaux

Ingénierie et déploiement de réseaux, Ingénieur systèmes (capteur, métrologie, ...)

### 3.7 Lien avec les autres M2

Arnaud Bournel

### 3.8 Organisation et liste des UE envisagées

**Module 1 : Notions de physique, de mathématiques appliquées, de théorie de l'information de communications numériques et de réseaux (Nombre d'heures ??)**

Ce premier module a pour vertu de combler les lacunes dans les prérequis de la formation dans le domaine de la physique, des mathématiques, de la théorie de l'information et des communications numériques ou encore dans les éléments de base sur les réseaux. Toutes les thématiques ne seront pas abordées, uniquement celle manquante à la formation antérieure.

**Physique** : Electromagnétisme dans le vide et les matériaux, optique classique, physique statistique, physique quantique, cristallographie, physique des solides, physiques des semi-conducteurs, matériaux pour l'optique et l'optoélectronique, polarisation et biréfringence, électrodynamique quantique, optique quantique, interactions onde matière, optoélectronique, lasers, lasers à semi-conducteurs, optique de Fourier, optique guidée, optique non-linéaire, information quantique et photonique.

**Mathématiques** : Probabilités, statistiques, analyse dans le plan complexe, analyse spectrale, outils mathématiques pour le traitement du signal, corps de Galois, théorie des jeux, technique d'analyse numérique et algorithmes.

**Théorie de l'information et communications numériques** : Notions d'information et définitions, information mutuelle, schéma d'une transmission formelle, codage et décodage de source et canal, canal de transmission, représentation des signaux, densité spectrale de puissance, bruit additif blanc gaussien, interférence entre symboles, critère de Nyquist, filtrage adapté, évaluation des probabilités d'erreurs, limite de Shannon pour la capacité pour un canal à bruit additif blanc gaussien. Théorie de l'information et physique.

**Réseaux** : (à compléter)

**Module 2 : Dispositifs et composants, filières technologiques, technologies de rupture, les interfaces optiques/électroniques, Notion de systèmes, de chaîne de traitement de signaux (Nombre d'heures ???)**

**(Badr Eddine...)**

**Module 3 : Traitement des signaux et de l'information optique (30 heures)**

Prérequis :

« Introduction au traitement du signal, à l'optimisation et à l'apprentissage statistique »

- Mise à niveau des étudiants à dominante physique
- Cours effectué en M1 ? Tronc commun de M2 ? **(Arnaud)**

1. Rappel sur les modulations linéaires dans le contexte d'un canal gaussien
2. Traitement de l'Interférence Entre Symboles : Décodeur ML (Algo de Viterbi). Egalisation linéaire (ZF, MMSE). Approche multi-porteuses (OFDM)
3. Estimation de canal et synchronisation : Cas mono-porteuse (DA-séquence d'apprentissage, NDA-aveugle dont CMA). Modulation multi-porteuse OFDM
4. Traitement des effets non-linéaires : Evaluation de la capacité du canal optique. Egaliseurs non-linéaires (Volterra)
5. Traitement MIMO : Séparation de source (CMA, traitement adaptatif). Apport des codes spatio-temporels (Alamouti)
6. Ouverture : Transmission Multi-modes/Multi-cœurs
7. Etude de cas : TP/projet de mise en pratique des connaissances

Commentaire : Doit-on inclure les Codes correcteurs d'erreurs (FEC) ? **(Yann ?)**

Il y a un certain nombre de notions de base à acquérir (matrice de parité, distance de Hamming, Corps de Galois, ...) avant de pouvoir aborder les familles de codes (codes en bloc, codes convolutifs, codes LDPC). Un tel objectif impose un **volume horaire minimal de 8-10 TH**. Pour information, le cours de base du cycle Ingénieur de Télécom ParisTech, limité au décodage « hard », est de 20TH. Si, la compétence requise est de connaître simplement les courbes de gain de codage, cela peut être vu dans le module « *Systèmes de transmission optiques* »

**Module 4 : Les systèmes de transmission optiques (30 heures)**

1. Evolution historique des besoins sociétaux sur les autoroutes de l'information et de la capacité des transmissions sur fibre optique : Besoin en débit depuis 1970, évolution du produit capacité-distance depuis 1970, ordre de grandeurs en distance et capacité. Problème de l'énergie.
2. Conception des émetteurs optiques : sources laser, modulation directe et externe, modulateurs, formats de modulations employés en optique et schémas de montage de leur réalisation.

3. *Conception des récepteurs optiques* : filtres, photodiodes, circuit de décision, bruits, détection directe quadratique, détections linéaires différentielles et cohérentes, schémas de conception associés. Présentation d'ensemble de la chaîne de traitement du signal après détection cohérente.
4. *Multiplexage et démultiplexage* : temporel, fréquentiel ou en longueur d'onde, en polarisation, en code, spatial et techniques de mise en place.
5. *Critères de qualité d'une transmission optique* : BER, Q, OSNR, Diagramme de l'œil et ouverture de l'œil, sensibilité du récepteur, pénalité sur la sensibilité ou sur l'OSNR.
6. *Contraintes physique de la propagation sur un canal en longueur d'onde* : Effets linéaires (pertes, dispersion, PMD), Effets non linéaires (Kerr, Brillouin, Raman).
7. *Amplificateurs optiques* : EDFA et Raman. Rappel de principe, schéma de conception, Gain, Bruits, facteur de bruit, bande d'amplification, utilisation en ligne, bilan de liaison en OSNR.
8. *Contraintes physique de la propagation d'un multiplex WDM* : Effets linéaires : Variation des pertes, de la dispersion et de la PMD avec la longueur d'onde, bandes d'amplification, diaphoties linéaires. Effets non-linéaires : effet Raman auto-induit, effets Kerr entre canaux.
9. *Résumé de l'ensemble des effets et compromis*
10. *Modèle de la transmission et formalisme* : Rappel des représentations formelles des signaux, temporelles et fréquentielles, constellation etc., équations de propagation de Schrödinger non linéaires couplées, longueurs caractéristiques, changement de variable. Résolution en dispersion ou Kerr.
11. *Techniques et étapes de conception des systèmes* : Simulations numériques basées sur la Méthode de Fourier à pas séparés, utilité des campagnes de simulation. Expériences de laboratoire : économie des émetteurs et mise en boucle des éléments de ligne. Essais terrains.
12. *Typologie des systèmes de l'accès au sous-marin.*
13. *La recherche sur les systèmes de transmission du futur* : Verrous fondamentaux : bruit et effets non-linéaires et limites associées. Techniques de demain. Problème énergétique.

## **Module 5 : Les réseaux optiques (45 heures)**

La structure des réseaux se décompose généralement en trois hiérarchies dont les besoins sont différents : le réseau d'accès (orienté vers les utilisateurs) ; le réseau cœur (interconnexions à l'échelle nationale et internationale) ; et le réseau métropolitain intermédiaire. L'objectif de ce module est d'étudier les différents segments de réseaux décrits ci-dessus où l'optique permet de répondre à l'augmentation du débit d'informations :

1. *Montée en débit dans le réseau cœur* : Multiplexage en longueur d'onde. Evolution des transmissions IP/SDH/WDM vers les transmissions IP/WDM. Les réseaux optiques élastiques flexibles. Introduction de paquets optiques commutés dans les réseaux optiques : les technologies OBS et OPS.
2. *Montée en débit dans les réseaux métropolitain et d'accès*. Réseau métropolitain / d'accès : PON-WDM ; réseau métropolitain / de cœur : technologie P-OADM.
3. *Montée en débit dans les réseaux domestiques*. Nouvelles architectures des réseaux domestiques optiques, déployées par les utilisateurs à l'échelle de leurs locaux.
4. *Convergence fixe-mobile*. Architectures tenant compte des points d'interconnexion entre réseaux fixes (optiques) et mobiles (radio), telles que la radio sur fibre (RoF).
5. *Réduction énergétique dans les réseaux optiques*. Technologies mises en œuvre pour diminuer l'impact de l'empreinte carbone des réseaux optiques.



## Module 6 : Domaines d'ouverture : capteurs, biophotonique, Lidar, Imagerie, Cellules photovoltaïques, instruments de caractérisation de composants, diagnostic et santé...(30 heures)

Ce module est un module d'ouverture sur l'émergence de nouvelles technologies mettant en œuvre des systèmes photoniques. Il a pour objectif de faire découvrir quelques champs d'applications à fort potentiel. Une part importante des enseignements sera effectuée par des intervenants extérieurs.

L'essor des nouvelles technologies photoniques a ouvert de nouvelles perspectives au domaine des lasers à fibre, des capteurs, des systèmes Lidar, ... . Les secteurs visés concernent le génie civil, la défense, le secteur médical. A titre d'exemple, la fibre optique est intrinsèquement peu intrusive, insensible aux rayonnements électromagnétiques, et permet de faire transiter rapidement (à la vitesse de la lumière) une grande quantité d'informations. De nouveaux capteurs dits capteurs à fibres optiques (CFO) utilisent, pour la mesure, la sensibilité de la fibre optique elle-même ou le plus souvent certains éléments insérés dans son cœur (réseaux de Bragg, cavités). L'émergence de nouvelles technologies photoniques ouvrent de nouveaux champs d'applications.

1. *Métrologie, Instrumentation pour la caractérisation de composants photoniques*
2. *Capteurs optiques*  
Capteurs à fibre optique (Capteurs répartis/ Capteur Localisés) pour les applications en génie civil  
Gyromètre à fibre optique
3. *Fibres micro-structurées*
4. *Lasers à fibre*
5. *Lidars : principe et applications*
6. *Biophotonique, Diagnostic & Santé* (Badr-Eddine, Nicolas ?)
7. *Optique en espace libre*

Didier Erasme 6/11/13 16:15

Supprimé: Badr

## 4. Laboratoires de soutien en IdF

Laboratoires industriels	Laboratoires académiques
Alcatel-Lucent Bell Labs	Laboratoire Charles Fabry LCF
III-V Lab	Laboratoire CNRS LTCI Telecom ParisTech
Thales RT	Laboratoire CNRS SAMOVAR TelecomSudParis
ORANGE Labs	Institut d'Alembert – ENS Cachan
Prysmian Group	Laboratoire C2N (LPN-IEF)
3S Photonics	Laboratoire ONERA
	INRIA

## 5. Contacts

IMT/TSP	IMT/TPT	IOGS	SUPELEC (+centrale)	Paris 11
---------	---------	------	---------------------	----------

			ap 2017)	
Badr-Eddine.Benkelfat@telecom-sudparis.eu	<a href="mailto:Yves.Jaouen@telecom-paristech.fr">Yves.Jaouen@telecom-paristech.fr</a>	Nicolas.Dubreuil@institutoptique.fr	Zeno.Toffano@supelec.fr	Delphine.Morini@u-psud.fr
Yann.Frignac@telecom-sudparis.eu	<a href="mailto:Didier.Erasme@telecom-paristech.fr">Didier.Erasme@telecom-paristech.fr</a>		Alain.Destrez@supelec.fr	Xavier.Checouri@ief.u-psud.fr
Catherine.Lepers@telecom-sudparis.eu	<a href="mailto:Cedric.Ware@telecom-paristech.fr">Cedric.Ware@telecom-paristech.fr</a>		pierre.lecoy@ecp.fr	Arnaud.Bournel@u-psud.fr
Mounia.Lourdiane@telecom-sudparis.eu	<a href="mailto:Renaud.Gabet@telecom-paristech.fr">Renaud.Gabet@telecom-paristech.fr</a>			

## 6. Références

- plan très haut débit du gouvernement ([Catherine](#))

- rajouter références dans le contexte ([Nicolas](#))