

MASTER PHYSIQUE FONDAMENTALE ET APPLICATIONS

**PARCOURS PHOTONIQUE**

**Semestre 9**

**Parcours au choix (1 parmi 3)**

## Parcours A -Technologies de l'information et de la communication

### Présentation

---

Cette option vise l'acquisition de savoirs pointus dans le domaine des systèmes de transmission d'information par voie optique, et plus spécifiquement dans le secteur des télécommunications optiques. Ce domaine est un axe fort en région Bretagne, avec la présence de laboratoires de recherche CNRS reconnus (FOTON, Lab-STICC, IPR,...), du pôle de compétitivité Image & Réseaux, et du Labex Comin Labs.

**0 crédits ECTS**

### Objectifs

---

Ce module a pour objectif de fournir aux étudiants les clés pour comprendre les systèmes et réseaux de communications optiques : de la physique des composants à l'architecture des réseaux d'opérateur. Le fonctionnement complet d'une chaîne de transmission optique au niveau système est analysé. Les principaux composants et dispositifs qui se placent dans ces réseaux sont examinés (émetteurs, amplificateurs optiques, commutateurs, dispositifs de filtrage, récepteurs, ...). Ce module est complété par une ouverture sur les réseaux de transport optiques (architectures, principaux protocoles), les réseaux FTTH, et leurs évolutions (WDM flexible, paquets optiques).

# A1a-Amplification optique et propagation non linéaire A1b- Transmissions optiques

## Présentation

### Module A1a:

Introduction to optical communication systems

Why optics?

Brief review of the evolution of optical fibre communications systems. How impairments trigger progress.

Digital communications basics

Direct vs coherent detection

Transmission impairments and their compensation

Group-velocity dispersion

Optical fibre nonlinearities

Polarization effects

Management of dispersion and nonlinearities in optical fibre links

Optical amplification and its impact on system performance

Erbium-doped fibre amplifiers

Raman amplification

Amplifier noise

Noise accumulation over amplified fibre links

Modern systems

High-order modulation and pulse-shaping

Coding

Gaussian-noise model

Digital coherent detection

Possible evolutions: wideband systems, space division multiplexing,...

### Module A1b:

1. Motivation de l'optique hyperfréquence
2. Facteurs de mérite en optique hyperfréquence
3. Spécificités et optimisation des composants optoélectroniques pour l'optique micro-ondes
4. Conception et optimisation des liaisons optiques micro-ondes

## Objectifs

### Module A1a:

In this series of lectures, we will study how physical effects that are specific to the optical fibre channel have shaped modern communication systems with multi-terabit-per-second capacity.

### Module A1b:

Introduction à l'optique microonde. Ce module constitue une première sensibilisation aux spécificités des transmissions analogiques sur porteuse optique comparées à celles des transmissions numériques optiques. Les outils de base pour modéliser de telles transmissions y sont présentés en montrant comment les spécificités des liaisons analogiques dictent le choix des composants opto utilisés. Ce module se propose finalement d'aborder les techniques les plus récentes mises au point pour le dépôt, la distribution et le traitement tout optique des signaux analogiques dans le domaine RF et micro-onde.

## Modalités de contrôle des connaissances

### 3 crédits ECTS

Volume horaire

Cours Magistral : 24h

### Session 1 ou session unique - Contrôle de connaissances

Nature de l'enseignement	Modalité	Nature	Durée (min.)	Coefficient	Remarques
	CC	Ecrit - devoir surveillé	180	100%	Non enseigné par UBO mais mutualisé

### Session 2 : Contrôle de connaissances

Nature de l'enseignement	Modalité	Nature	Durée (min.)	Coefficient	Remarques
	CT	Oral	20	100%	

# A2a-Fonctions optiques à base de SOA A2b-Dispositifs dynamiques pour les réseaux

## Présentation

### Module A2a:

- > Structures et principales propriétés statiques des SOA, Non-linéarités (auto-modulation et modulation croisée du gain, de la phase, de polarisation, mélange à quatre ondes),
- > Modélisation et réponse dynamique en petit signal,
- > Fonctions tout-optiques et optoélectroniques à base de SOA (conversion en longueur d'onde, fonctions logiques, commutation et modulation, photo-détection en ligne, mélange des signaux millimétriques et radiofréquences).

### Module A2b:

- > Dispositifs d'émission/réception optiques pour les formats de modulation avancés et dispositifs de conversion en longueur d'onde : principe de fonctionnement, architectures types et paramétrage « système »,
- > Dispositifs de commutation de paquets optiques et de filtres en longueur d'onde basés sur l'interaction acousto-optique : du modèle physique à l'architecture.

### 3 crédits ECTS

Volume horaire

Cours Magistral : 24h

## Objectifs

L'objectif des **modules A2a et A2b** est de fournir aux étudiants les principaux éléments sur les amplificateurs optiques à semi-conducteurs (SOA) et les dispositifs dynamiques équipant les systèmes et réseaux de communications optiques. Le SOA est un composant clé pour l'évolution future de ces réseaux notamment au niveau du réseau d'accès : les différentes structures de SOA, ses non-linéarités ainsi que ses caractéristiques statiques et dynamiques seront étudiées. Les fonctions et les applications à base de SOA seront traitées dans le contexte des télécommunications optiques. Les dispositifs dynamiques au niveau de la modulation, du filtrage, de la conversion en longueur d'onde ou de la commutation des signaux optiques véhiculés deviennent des éléments fondamentaux et de plus en plus « intelligents » et complexes dans les nouvelles générations de réseaux optiques. Ceci afin de doter le réseau d'une agilité toujours croissante, dans un contexte de canaux multiplexés et portant des formats de modulation avancés/complexes. Un focus sera donné sur les architectures de ces nouveaux dispositifs, notamment sur la technologie acousto-optique utilisée dans les fonctions de filtrage et de commutation.

## Modalités de contrôle des connaissances

### Session 1 ou session unique - Contrôle de connaissances

Nature de l'enseignement	Modalité	Nature	Durée (min.)	Coefficient	Remarques
	CC	Ecrit - devoir surveillé	180	100%	Non enseigné par UBO mais mutualisé

### Session 2 : Contrôle de connaissances

Nature de l'enseignement	Modalité	Nature	Durée (min.)	Coefficient	Remarques
	CT	Oral	20	100%	

## Parcours B - Nanotechnologies

### Présentation

---

Cette option concerne un secteur innovant, les nanotechnologies, reconnu par la Commission Européenne. Il propose une formation orientée vers le domaine tant des matériaux que de leur mise en œuvre pour la réalisation de composants, et tournée vers l'analyse et la compréhension des effets physiques aussi bien des nano-objets que de ces mêmes composants. Une ouverture aux technologies quantiques est proposée. Ainsi, les enseignements proposés couvrent : l'optique des résonateurs, du couplage, et la photonique intégrée hybride, les propriétés électroniques, optiques, et quantiques, des nanostructures semi-conductrices, l'optique non linéaire et quantique. Les nanotechnologies optiques associent les nanosciences à l'optique. Elles répondent aux défis actuels de différents domaines d'applications : énergie, télécommunications, environnement, santé, etc. et permettent de faire émerger des applications quantiques de rupture.

**0 crédits ECTS**

# B1a-Résonateurs et couplages de modes 1 B1b-Résonateurs et couplages de modes 2

## Présentation

### Module B1a:

Ce module se propose de décrire des exemples d'applications pratiques des micro-résonateurs en optique et photonique. Après une introduction des propriétés de base et une description des propriétés physiques du composant, l'accent sera mis sur les applications et notamment celles relevant des fonctions optiques pour les télécommunications.

### 3 crédits ECTS

Volume horaire

Cours Magistral : 24h

- > Optique des Résonateurs. Deux approches complémentaires sont proposées, l'une temporelle et l'autre spectrale.
- > Résonateurs à haut facteur de qualité ; les différents types de cavités : sphères, sphéroïdes, tores, disques anneaux, à CP ; Techniques de couplages.
- > Effets linéaires et effets non-linéaires dans ces cavités ; les régimes de dispersion associés ; effets thermiques ; couplage de modes ; caractérisation des propriétés ; approche temporelle ; méthode de caractérisation hybride spectrale temporelle
- > Applications : Ligne à retard optique ; amplification sélective ; les fonctions logiques, bistabilité et multistabilité ; restauration du signal : remise en forme, resynchronisation
- > Atome photonique et résonateurs actifs
- > Approche spectrale ; fonction(s) de transfert, matrices étendues, densité spectrale de puissance
- > Couplage : couplage localisé, couplage distribué, couplage périodique ; couplonique et couplage de cavités
- > Structure modale et son ingénierie ; applications

### Module B1b:

1. Introduction to integrated photonics, overview
2. Theory of advanced electromagnetic waveguides
3. Micro-photonics components and hybrid process for sensors and optical telecommunication applications
4. Nanophotonic / sub-wavelength photonics by coupling hybrid thin layer process:

- Examples of photonic structures based on photonic crystals (filters, detectors, VCSEL).

## Objectifs

Comprendre les résonateurs à haut facteur de qualité, les techniques de couplage, les fonctions de transfert, les régimes de dispersion, la linéarité et non-linéarité dans les microcavités, les applications aux fonctions optiques, les résonateurs actifs, les fonctions de transfert, la couplonique.

## Modalités de contrôle des connaissances

### Session 1 ou session unique - Contrôle de connaissances

Nature de l'enseignement	Modalité	Nature	Durée (min.)	Coefficient	Remarques
	CC	Ecrit - devoir surveillé	180	100%	Non enseigné par UBO mais mutualisé

### Session 2 : Contrôle de connaissances

Nature de l'enseignement	Modalité	Nature	Durée (min.)	Coefficient	Remarques
	CT	Oral	20	100%	

# B2a-Propriétés électroniques des nanostructures B2b-Propriétés optiques des nanostructures

## Présentation

### Module B2a:

- > Exemples d'applications pratiques des notions de base d'élaboration de nanostructures, d'épitaxie...
- > Rappel sur les semi-conducteurs massifs : structure de bande et phénomènes de transport
- > Croissance des hétérostructures (épitaxie par jets moléculaires) et propriétés électroniques des interfaces (sauts de bandes)
- > Calcul des états électroniques : présentation des différentes méthodes : LCAO, k.p... Prise en compte de la contrainte
- > Modélisation et effet du confinement dans les semi-conducteurs
- > Composants à hétérostructures et leurs applications : propriétés de transport dans les hétérostructures, quelques transistors, quelques composants quantiques
- > Rappels sur les transitions optiques, règle d'or de Fermi
- > Transitions optiques dans les semi-conducteurs massifs
- > Transitions optiques dans les puits quantiques (2 D) (transitions optiques interbandes ou intrabandes, effets excitoniques, effet Stark)
- > Les lasers semi-conducteurs : lasers cascade, laser à boîtes quantiques, recherches actuelles

### 3 crédits ECTS

Volume horaire

Cours Magistral : 24h

## Objectifs

### Module B2a:

Aborder les propriétés électroniques et optiques des nanostructures à semi-conducteurs, d'acquérir des notions de base de mécanique quantique, des savoirs en composants électroniques et propriétés optiques des matériaux.

## Modalités de contrôle des connaissances

### Session 1 ou session unique - Contrôle de connaissances

Nature de l'enseignement	Modalité	Nature	Durée (min.)	Coefficient	Remarques
	CC	Ecrit - devoir surveillé	180	100%	Non enseigné par UBO mais mutualisé

### Session 2 : Contrôle de connaissances

Nature de l'enseignement	Modalité	Nature	Durée (min.)	Coefficient	Remarques
	CT	Oral	20	100%	

## B3a-Optique non linéaire B3b-Hybrid integrated photonics

### Présentation

#### Module B3a:

- > Introduction à l'optique non linéaire
- > Effets non linéaires du second ordre
- > Effets non linéaires du troisième ordre
- > Présentation succincte de l'intérêt de l'optique non linéaire pour la biologie :
- > Introduction à la microscopie multi-photonique et à ses applications dans le domaine de la biologie

**3 crédits ECTS**

Volume horaire

Cours Magistral : 24h

### Objectifs

#### Module B3a:

Aborder la physique des effets optiques non linéaires et les développements majeurs résultant de cette discipline. Cet enseignement constitue un complément essentiel à toute formation en relation avec les télécommunications optiques, le traitement optique de l'information, les composants photoniques.

### Modalités de contrôle des connaissances

#### Session 1 ou session unique - Contrôle de connaissances

Nature de l'enseignement	Modalité	Nature	Durée (min.)	Coefficient	Remarques
	CC	Ecrit - devoir surveillé	180	100%	Non enseigné par UBO mais mutualisé

#### Session 2 : Contrôle de connaissances

Nature de l'enseignement	Modalité	Nature	Durée (min.)	Coefficient	Remarques
	CT	Oral	20	100%	

## Parcours C - Imagerie pour le vivant et l'environnement

### Présentation

---

Cette option concerne le traitement optique de l'information et les méthodes de traitement d'images, les principes de la biophotonique et les techniques associées, ainsi que les techniques photoniques pour l'environnement, aussi bien les lidars que les techniques émergentes dans le moyen infra-rouge. L'acquisition de savoirs pointus dans ces domaines donne des débouchés en R&D notamment pour la conception de systèmes d'imagerie passive et active, l'imagerie biophotonique, la télédétection aéroportée & spatiale, l'imagerie active pour la défense et la sécurité, le traitement de signal/image, l'imagerie & le contrôle non-destructif pour l'industrie, etc.

**0 crédits ECTS**

# C1a-Traitement optique bidimensionnel C1b-Bruit et information dans les images

## Présentation

### Module C1a:

Après des rappels sur le formalisme de Fourier à 2 dimensions, nous abordons la théorie scalaire de la diffraction jusqu'à la formation des images : formation d'une image par une lentille mince, fonction de transfert d'un système limité par la diffraction, système optique en lumière cohérente et incohérente. Puis nous présentons l'holographie et les principes de l'imagerie holographique : les supports holographiques et les différents types d'hologrammes, les applications industrielles de l'holographie et l'holographie numérique. Nous terminons par des notions de traitement des images avec le filtrage des fréquences spatiales et la reconnaissance des formes.

### Module C1b:

- > Probabilités discrètes et continues: Distributions de probabilité, changements de variable, somme de variables aléatoires, théorème limite central. Lois dérivées de la loi gaussienne. Propagation des erreurs par linéarisation.
- > Statistique descriptive: Notions d'estimateurs, moyenne, variance, médiane, quartiles, boxplot...
- > Les intervalles de confiance et leurs interprétations
- > Notions de tests statistiques : principes, P-value, puissance, test paramétriques et non paramétriques. Les écueils des tests statistiques. Quelques tests statistiques usuels, et pourquoi il est recommandé d'utiliser des intervalles de confiance plutôt que des tests statistiques.
- > Corrélation et Régression

### 3 crédits ECTS

Volume horaire

Cours Magistral : 24h

## Objectifs

### Module C1a:

La théorie du signal et des systèmes multidimensionnels joue un rôle fondamental dans l'analyse et la mise en œuvre des systèmes modernes de traitement optique de l'information. Ce cours se focalise sur le traitement optique du signal bidimensionnel que constitue l'image.

### Module C1b:

Toute mesure comprend une part d'aléas, prise en compte dans la notion d'intervalle de confiance. Mais quelle est la signification d'un intervalle de confiance, comment le calculer et l'interpréter ? Peut-on dire qu'un traitement a un effet significatif, ou pas d'effet ? Deux mesures sont-elles égales ? Autant de questions qu'il faut d'abord savoir poser avant d'y répondre... Ce cours voudrait introduire les rudiments d'outils statistiques nécessaires à la gestion et au partage de données avec le milieu médical, des biologistes, des industriels.

## Compétences visées

Probabilités de base, statistique descriptive, intervalles de confiance, test statistiques rudimentaires, corrélation/régression

## Modalités de contrôle des connaissances

### Session 1 ou session unique - Contrôle de connaissances

Nature de l'enseignement	Modalité	Nature	Durée (min.)	Coefficient	Remarques
	CC	Ecrit - devoir surveillé	180	100%	Non enseigné par UBO mais mutualisé

### Session 2 : Contrôle de connaissances

Nature de l'enseignement	Modalité	Nature	Durée (min.)	Coefficient	Remarques
	CT	Oral	20	100%	

## C2a-Biophotonique C2b-Photonique pour l'environnement

### Présentation

#### Module C2a:

- > Interaction lumière-matière biologique : constituants et propriétés optiques des tissus vivants, régimes de propagation, effets bénéfiques et délétères.
- > Techniques d'imagerie à l'échelle cellulaire : les différents types de microscopies et les contrastes optiques associés, performances et limitations.
- > Techniques évoluées (FCS, FLIM, FRET, FRAP, TIRF, illumination structurée, super-résolution, non-linéaire, champ proche optique...).

#### Module C2b:

- > Polarimétrie de Mueller.
- > Méthodes linéaires cohérentes : speckle, techniques homodynes / hétérodyne, OCT.
- > Méthodes basées sur le transfert radiatif à travers un milieu diffusant.
- > Méthodes non linéaires cohérentes (amplification paramétrique d'images, imagerie par conjugaison de phase, ...).

**3 crédits ECTS**

Volume horaire

Cours Magistral : 24h

### Objectifs

#### Module C2a:

Aborder les aspects physiques des méthodes photoniques permettant l'analyse ou le contrôle d'objets d'intérêt biologique ou biomédical à l'échelle microscopique.

#### Module C2b:

- > Présentation de techniques optiques linéaires et non linéaires d'exploration biophysique non invasive.
- > Étude des modifications des propriétés de polarisation et de cohérence d'un rayonnement laser à la traversée de tissus et de fluides biologiques.
- > Utilisation de la cohérence et de l'optique non linéaire pour amplifier ou filtrer un signal optique.
- > Étude de la répartition angulaire de la lumière diffusée.
- > Détermination des propriétés physiologiques des milieux étudiés par l'analyse des transformations observées.

### Modalités de contrôle des connaissances

#### Session 1 ou session unique - Contrôle de connaissances

Nature de l'enseignement	Modalité	Nature	Durée (min.)	Coefficient	Remarques
	CC	Ecrit - devoir surveillé	180	100%	enseigné par UBO et mutualisation régionale

#### Session 2 : Contrôle de connaissances

Nature de l'enseignement	Modalité	Nature	Durée (min.)	Coefficient	Remarques
	CT	Oral	20	100%	

## C3a-Méthodes statistiques d'analyse de données biomédicales

## C3b-Méthodes de diagnostic biomédical

### Objectifs

#### Module C3a:

Ce module propose une première partie portant sur les techniques Lidar (marin et aérien), une deuxième partie concernera les techniques analytiques pour le monitoring en environnement

Programme du module : Principes, détection et localisation de cible, bathymétrie, métrologies des grandeurs physiques (température, salinité, turbidité), techniques d'imagerie (imagerie globale, à balayage), détection et quantification de polluants organiques dans l'environnement). Fluorescences, LIBS,...

#### Module C3b:

Introduction au Moyen Infrarouge

#### 3 crédits ECTS

Volume horaire

Cours Magistral : 24h

### Compétences visées

Probabilités de base, statistique descriptive, intervalles de confiance, test statistiques rudimentaires, corrélation/régression

### Modalités de contrôle des connaissances

#### Session 1 ou session unique - Contrôle de connaissances

Nature de l'enseignement	Modalité	Nature	Durée (min.)	Coefficient	Remarques
	CC	Ecrit - devoir surveillé	180	100%	12h/24h non enseignées par UBO mais mutualisées à l'échelle régionale

#### Session 2 : Contrôle de connaissances

Nature de l'enseignement	Modalité	Nature	Durée (min.)	Coefficient	Remarques
	CT	Oral	20	100%	