

# Master 2 Photonique

## Programme d'études

---

## M2 photonique

---

Semestre 1 du M2 :

des UEs « théoriques » en PHOTONIQUE (24 ECTS)

*Des savoirs pointus en optique-photonique*

**Bloc de Tronc Commun** (72h) :

- TC1 (3ECTS) Propagation et fonctions optiques spatiales (2 modules)
- TC2 (3ECTS) Sources lasers (2 modules)
- TC3 (3ECTS) Optique intégrée et quantique (2 modules)

*Des savoirs orientés vers un domaine d'application*

**Bloc d'Option** (72h) à choix :

- Option C (9 ECTS) : Imagerie pour le vivant et l'environnement
- ou Option B (9 ECTS) : Nanotechnologies
- ou Option A (9 ECTS) : Technologies de l'information et de la communication

des UEs d'OUVERTURE (24 ECTS)

*Des savoir-faire pratiques* : UE OT Ouverture Technologique (3 ECTS) : **Atelier technologique** organisé de la façon suivante : 4 jours de travaux pratiques sur une des plateformes technologiques de la région ou dans un laboratoire de pointe (à choisir parmi 5 ateliers proposés)

*Une préparation aux métiers scientifiques et professionnalisation progressive* :

- UE OS Ouverture professionnelle (3 ECTS) : avec des ECs à choix parmi une liste prédéfinie d'EC, à titre d'exemple de l'Anglais et des conférences.
- UE OS Ouverture Scientifique (6 ECTS) : **projet en laboratoire** ou *bien le projet en laboratoire peut être substitué par un projet plus court (3 ECTS) essentiellement bibliographique et être complété par le suivi d'un module d'autre formation (3ECTS).*

---

**STAGE (30 ECTS)**

*Stage 4 à 6 mois en laboratoire public ou en entreprise*

**BLOC TRONC COMMUN****S9-UE1****TC1-Propagation et fonctions optiques spatiales****3 ECTS**

Langue d'enseignement : français

Heures en présentiel : 24H (Cours)

**S9-UE1-M1** Module TC1a : Propagation optique en espace libre

Enseignant (UBO) : Bernard LE JEUNE (12H CM)

Objectifs du module : Procurer la base des outils théoriques et pratiques pour étudier les paramètres portés par l'onde optique en fonction des propriétés des sources (ponctuelles, étendues, cohérentes), des propriétés des milieux traversés (homogènes, inhomogènes, faiblement ou fortement diffusants) et des configurations de détection.

Programme du module :

- Notions de photométrie traditionnelle et généralisée.
- Notions de polarisation
- Notions de cohérences temporelle et spatiale
- Notions de spectrométrie
- Notions de diffusion (photons balistiques et multi-diffusés)

**S9-UE1-M2** Module TC1b: Fonctions optiques spatiales

Enseignants (IMTA) : Marie-Laure MOULINART (6H CM) et Jean-Louis DE BOUGRENET (6H CM)

Objectifs du module : Fournir les connaissances et les notions de base sur les fonctions optiques spatiales et leur utilisation pour les télécommunications

Programme du module :

1. Fonctions optiques de base en espace libre  
Réfraction et déflexion, diffraction et interconnexions, dispersion, utilisation de la polarisation, matériaux anisotropes, fonctions combinant biréfringence et double réfraction
2. L'aiguillage optique  
Caractéristiques générales, classification, quelques technologies.
3. Les fonctions de logique spatiale  
La logique spatiale à base de polarisation, la substitution symbolique, architectures parallèles de type OPALS, automate cellulaire, application à la substitution d'en-tête.
4. Les réseaux d'interconnexion  
Structures principales, classification et comparaison, implantation en optique et fonctionnement, adéquation architecture-composant.
5. L'ingénierie optique en espace libre  
Résoudre un problème de dimensionnement

## S9-UE2

### TC2-Sources lasers 3 ECTS

Objectif: Aborder la physique des lasers, des lasers à semi-conducteurs et de la modulation.

Mots-clés : Physique des lasers, Télécommunications Optiques, Métrologie, Capteurs

Langue d'enseignement : français, anglais (poly en français et en anglais)

Heures en présentiel : 24H (Cours)

#### S9-UE2-M1 Module TC2a : Introduction aux lasers à semi-conducteurs

Enseignants (ENIB) : Florian BENTIVEGNA (6H CM) et Pascal MOREL (6H)

Milieu amplificateur et cavité, bases pour les milieux semi-conducteurs ; Différents types de structures, lasers mono et multi-section ; Structures accordables en longueur d'onde ; Modélisation et paramètres des lasers à semi-conducteurs ; Modulation et contrôle des propriétés dynamiques ; Association et intégration avec d'autres structures, applications (récupération d'horloge, lasers à fibre).

#### S9-UE2-M2 Module TC2b: Propriétés statiques et dynamiques des sources lasers

Enseignant (ENSSAT): Pascal BESNARD (12H)

Introduction aux lasers; fonctionnement continu; modulation de la lumière (modulation externe, commutation de gain, déclenchements de pertes, absorbant saturable, blocage de modes, lasers impulsions) et ingénierie de l'impulsion ; injection optique, contre-réaction optique ; caractérisation en bruit, bruit d'intensité, bruit de fréquence, cohérence, métrologie ; Une brève comparaison des lasers à fibres et des lasers à semi-conducteurs ; Exemple de sources pour les applications télécom, les sciences du vivant, l'environnement, capteur optique laser.

## S9-UE3

### TC3-Optique intégrée et Quantique 3 ECTS

Mots-clés : Équations de Maxwell, opto-électronique, télécommunications optiques, optique sur puce, quantique

Langue d'enseignement : français, anglais (poly en français et en anglais)

Heures en présentiel : 24H (Cours)

#### S9-UE3-M1 Module TC3a : Optique intégrée

Enseignant (INSA) : Yoan LEGER (12H CM)

Objectifs du module : Acquérir les notions de bases assurant la compréhension des phénomènes physique à la base de dispositifs photoniques à l'état de l'art et permettant leur design.

Programme du module :

- 1) Le guide d'onde diélectrique. Physique du guide d'onde diélectrique plan par l'optique géométrique et l'électromagnétisme. Introduction aux méthodes de résolutions de problèmes 2 et 3D. Physique de la fibre optique. Principe des pertes par courbures.
- 2) Théorie des modes couplés. Principe des coupleurs co- et contra-directionnels par l'approche perturbative. Principe du miroir de Bragg et du coupleur externe.
- 3) Composants photoniques. Illustration des chapitres précédents par l'étude d'exemple de la photonique : Interféromètre de Mach Zehnder, filtre en anneau (all-pass et add-drop), AWG. Introduction aux méthodes de fabrication.

### S9-UE3-M2 Module TC3b: Introduction to quantum optics

Enseignant (UR1-SPM) : Marco ROMANELLI (12H CM)

Objectifs du module : Comprendre les bases du formalisme de l'optique quantique et appréhender les concepts émergents liés aux technologies quantiques. Modélisation de la lumière (photons) et statistiques (Poisson, super-Poisson). Quantification du champ, états de Fock, calculs simples avec des beams splitters et des détecteurs. Applications : la cryptographie et la téléportation quantique.

Prérequis: familiarité avec la mécanique quantique de base (systèmes à 2 niveaux, oscillateur harmonique), et avec les ondes électromagnétiques et l'optique ondulatoire, surtout les phénomènes d'interférence.

Programme du module :

1. Introduction: light beams as streams of photons. Photon statistics. Photon statistics of coherent light and of thermal light: Poisson statistics, Planck's law. First-and second-order coherence functions.
2. A brief reminder: the principles of quantum mechanics. The quantum harmonic oscillator: energy levels, energy eigenstates, coherent states.
3. Quantization of the free electromagnetic field. Observables: field, energy, momentum operators. The photon. Eigenstates of the free field hamiltonian: Fock states. Properties of the ground state (vacuum state). Vacuum fluctuations. (Quasi-classical) coherent states. Single-mode quantum field. Quadrature operators, Heisenberg inequalities. Squeezed states. Entangled states: Bell's inequalities, GHZ states.
4. Photodetection signals: photocount rate, coincidence count rate, homodyne detection. Photodetection signals at the output of simple optical systems: single-photon states and coherent states impinging on a beam-splitter, or on a Mach-Zehnder interferometer. Quantum noise for intense beams: noise spectra, input-output method, quantum fluctuations in linear and nonlinear optical cavities.

## BLOC OPTION

### S9-UE4

#### Option A : Technologies de l'information et de la communication 9 ECTS

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. 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).

Mots-clés : Optique, Communications numériques optiques. Formats de modulation. Amplification optique. Fibres optiques. Optique non-linéaire. Fonctions optiques

Langue d'enseignement : français ou anglais (poly en français et en anglais)

Heures en présentiel : 72H (Cours)

L'objectif des **modules A1a et A1b** est d'établir une solide culture de base sur les systèmes de transmission sur fibres optiques et les effets physiques qui interviennent lors de la propagation des signaux dans les fibres ainsi que dans les mécanismes d'amplification, aussi bien pour les modulations numériques qu'analogiques. On aborde en particulier les techniques d'optique-microonde pour le dépôt, la distribution et le traitement tout optique des signaux analogiques dans le domaine RF et micro-onde.

**S9-UE4-M1** Module A1a : Amplification optique, propagation non linéaire, transmissions optiques

Enseignant (ENSSAT) : Christophe PEUCHERET (12H)

Objectifs du module : 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.

*Programme du module :*

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,...

### S9-UE4-M1 Module A1b : Optique microonde

Enseignant (UR1-SPM): Mehdi ALOUINI (12H)

Objectifs du module : 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 déport, la distribution et le traitement tout optique des signaux analogiques dans le domaine RF et micro-onde.

Programme du module :

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

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.

**S9-UE4-M3** Module A2a : Amplification optique et fonctions optiques à base de SOA

Enseignant (ENIB) : Ammar SHARAIHA (12H)

Programme du module :

- 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).

**S9-UE4-M4** Module A2b : Dispositifs dynamiques pour les réseaux optiques

Enseignant (ENIB) : Mickaël GUEGAN (6H) et André PERENNOU (6H)

Programme du module :

- 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.

L'objectif des **modules A3a et A3b** est de comprendre un réseau optique, en lien avec leurs architectures et les différentes notions pertinentes : routage, brassage, accès, nœuds, paquets, etc.

**S9-UE4-M5** Réseaux optiques (Optical Network)

Enseignants (IMTA) : Luiz ANET-NETO, Bruno FRACASSO (12H)

Mots-clefs : Réseaux télécoms. Modèle OSI. Routage. Protection. Transparence optique. SDH. OTN. GMPLS. Accès optique. PON. Réseau métropolitain. Paquets Optiques. Bursts Optiques. Nœud de commutation. ☐

Programme du module A3a

- Introduction aux réseaux. Services, historique. Notion de routage (connexion/sans connexion). Introduction au modèle OSI. Typologie des réseaux. ☐ Réseau de transport : SDH. Impact du WDM et évolutions récentes (OTN, MPLS) ou prévues (brassage optique, GMPLS). Notion de réseau transparent. Introduction à la protection des réseaux.

Programme du module A3b

- Architecture d'accès. Introduction de l'optique dans l'accès. Les différents PON. Perspectives d'évolution métró/accès. ☐ Notion de paquets optiques et bursts optiques. Introduction aux technologies nécessaires pour les nœuds OBS/OPS. Intérêt de ces approches du point de vue d'un réseau d'opérateur.



## BLOC OPTION

### S9-UE5

#### Option B : Nanotechnologies 9 ECTS

L'option B comporte 6 modules d'enseignement. L'option B 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 (modules B1a et B1b), les propriétés électroniques, optiques, et quantiques, des nanostructures semi-conductrices (modules B2a et B2b), l'optique non linéaire et quantique (module B3a) (module B3b). 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.

Langue d'enseignement : français ou anglais

Heures en présentiel : 72H (Cours)

#### **S9-UE5-M1** Module B1a : Résonateurs et couplage de modes

Enseignant (ENIB) : Yann BOUCHER (12H)

Mots-clés : Cavité optiques, interférences, équations de Maxwell

Objectifs des modules B1a et B1b : 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.

Programme des modules : 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.

- 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

**S9-UE5-M2** Module B1b : Photonique intégrée hybride

Enseignant (UR1-SPM) : Bruno BECHE (12H)

Objectifs du module : Integrated photonics and nano-photonics devices by hybrid and coupled thin layer process. The goal of such micro- and nano-photonics module is to present integrated photonics and materials with a view to highlight the recent development of specific hybrid processes (such as biomolecular film deposition, assembled growth and handling of optical elements, plasma treatments coupled with microtechnologic thin layers processes, and microfluidic devices) for the realisation of optical components devoted respectively to sensors (physical, chemical, biologic measurements) and to optical telecommunications applications.

Program:

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).

Langue d'enseignement : français et anglais

**S9-UE5-M3** Module B2a : Physique des nanostructures semi-conductrices optiques

Enseignant (INSA) : Hervé FOLLIOT (12H)

Les objectifs du **module B2a** sont d'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.

Programme des deux modules :

- 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

Langue d'enseignement : français

**S9-UE5-M4** Module B2b : Technologies quantiques

Enseignant (INSA) : Hervé FOLLIOT et futur recrutement INSA Rennes (12H)

Les objectifs du **module B2b** sont.

Programme : à définir avec le futur recrutement à l'INSA Rennes

**S9-UE5-M5** Module B3a : Optique non linéaire

Enseignant (INSA) : Rozenn PIRON (12H)

L'objectif du module B3a est d'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.

Programme du module :

- 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.

Langue d'enseignement : français

**S9-UE5-M6** Module B3b : Applications de l'optique quantique

Enseignant (ENSSAT) : Yannick DUMEIGE (12H)

L'objectif du module B3b est d'initier aux applications spécifiques de l'optique quantique, en lien également avec le module d'optique non linéaire.

Programme du module :

1. Fonction d'autocorrélation d'intensité et bruit d'amplitude en optique quantique. Applications aux états nombres, à l'état cohérent et au rayonnement thermique.
2. Systèmes passifs : expérience HOM, interféromètre, amplificateur linéaire indépendant de la phase.
3. Optique non-linéaire et optique quantique : amplification paramétrique, effet Kerr, compression du bruit quantique et applications en métrologie. Création de photons jumeaux.
4. Protocoles de cryptographie quantique (BB94, Ekert91, BBM92)
5. Sources de photons uniques
  - a. Les différentes sources de photons uniques : lasers atténués, sources de photons annoncés et émetteurs uniques.
  - b. Applications : cryptographie quantique, capteurs quantiques.

*(In English) Quantum optics applications*

1. *Second order auto-correlation function and amplitude noise in quantum optics. Application to Fock states, coherent state and blackbody radiation.*
2. *Passive systems: HOM experiment, interferometer, linear phase-independent amplification.*
3. *Nonlinear optics and quantum optics: parametric amplification, Kerr effect, quantum noise squeezing and application to quantum metrology. Twin photons production.*
4. *Quantum Key Distribution (QKD) protocols (BB94, Ekert91, BBM92)*
5. *Single photons sources*
  - a. *Faint laser, heralded photons sources and single emitters.*
  - b. *Applications: QKD and quantum metrology.*

## BLOC OPTION

### S9-UE6

#### Option C : Imagerie du vivant et de l'environnement 9 ECTS

L'option C concerne le traitement optique de l'information et les méthodes de traitement d'images (modules C2a et C2b), les principes de la biophotonique et les techniques associées (modules C2a et C2b), ainsi que les techniques photoniques pour l'environnement, aussi bien les lidars que les techniques émergentes dans le moyen infrarouge (modules C3a et C3b). 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.

Langue d'enseignement : variable suivant modules

Heures en présentiel : 72H (Cours)

#### **S9-UE6-M1** Module C1a : Traitement optique bidimensionnel

Enseignants (IMTA) : Kevin HEGGARTY, Daniel STOENESCU, Vincent NOURRIT (12H)

Objectifs du module : 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.

Programme du module : 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.

Langue d'enseignement : français

#### **S9-UE6-M2** Module C1b : Méthodes statistiques d'analyse de données biomédicales

Enseignant (UR1-SPM) : Christophe ODIN (12H)

*Cours mutualisé avec le M2 Physique Médicale*

Prérequis : Notions de probabilité, sens critique

Objectifs du module : 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.

Programme du module :

- 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

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

Langue d'enseignement : français et anglais

### **S9-UE6-M3** Module C2a : Biophotonique

Enseignant (UBO) : Yann LE GRAND (12H)

Objectifs du module : aborder les aspects physiques des méthodes photoniques permettant l'analyse ou le contrôle d'objets d'intérêt biologique ou biomédical à l'échelle microscopique.

Programme du module :

- 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...).

Langue d'enseignement : français

### **S9-UE6-M4** Module C2b : Méthodes de diagnostic en biophotonique

Enseignants (UBO) : Guy LE BRUN (6H) et Sylvain RIVET (6H)

Objectifs du module :

- 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.

Programme du module :

- Polarimétrie de Mueller.
- Méthodes linéaires cohérentes : speckle, techniques homodynes / hétérodynes, 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, ...).

Langue d'enseignement : français

### **S9-UE5-M5** Module C3a : Photonique pour l'environnement

Enseignant (UBO) : Fabrice PELLEN (9H) et Philippe GIAMARCHI (3H)

Objectifs du module : 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,...

Langue d'enseignement : français

**S9-UE6-M6** Module C3b : Introduction au Moyen Infrarouge

Enseignant (ENSSAT) : Joël CHARRIER (12H)

Objectifs du module : Introduction au Moyen Infrarouge

Programme

Les matériaux compatibles pour le MIR

- Généralités sur les sources et détecteurs utilisés
- composants discrets en optique libre
- optique guidée : fibres et optique intégrée

Applications:

- environnement
- santé
- Défense

Langue d'enseignement : français/anglais

## Les 3 UE d'ouverture

### **S9-UE7 OT-Ouverture technologique** 3 ECTS

L'UE d'ouverture technologique (UE OT) offre un accès unique et mutualisé entre tous les établissements participant au master photonique à plusieurs plates-formes technologiques reconnues de premier plan (**NanoRennes, Perfos, Persyst**), à des services communs (microscopie confocale et multiphotonique) ou à des bancs de laboratoire (techniques d'imagerie en régimes dynamiques ; caractérisation d'amplificateurs optiques à semi-conducteurs, de cellules acousto-optiques; mesures des paramètres fréquentiels, spatiaux, temporels, des lasers).

L'étudiant remplit le questionnaire pour lister par ordre de préférence 3 ateliers parmi les 5 proposés. L'équipe pédagogique répartit les étudiants en respectant les limites d'effectif par atelier et au mieux les desiderata des étudiants. Ces ateliers d'ouverture technologique se déroulent sur 4 jours, fin janvier – début février, dans les laboratoires à Brest, Lannion, ou Rennes suivant l'OT suivie.

**S9-UE7-M1** Module OT1 : Transmission haut-débit pour l'accès et les longues distances et fibres optiques spéciales et élaboration de circuits optiques en salle blanche (à l'ENSSAT Lannion)

Enseignants : ENSSAT, équipe SP Institut Foton

Sur deux jours une initiation pratique aux réseaux de transmission optique et aux fibres optiques spéciales est proposée grâce à la visite des plates-formes technologiques Persyst (plate-forme d'évaluation et de recherche des systèmes de transmissions optiques) du laboratoire Foton et Perfos (Plate-forme de recherche et développement du cluster Photonics Bretagne).

Deux autres jours sont consacrés à une approche aux techniques de fabrication de circuits optiques intégrés en salle blanche mais également à des caractérisations physiques (microscopies optique et électronique à balayage) et optiques associées. Cet enseignement, sous forme de TP, se propose ainsi de concevoir, réaliser et caractériser optiquement, dans le proche-infrarouge ( $1.55 \mu\text{m}$ ), un guide d'onde intégré de type ruban.

**S9-UE7-M2** Module OT2 : Métrologie des lasers (à l'UR1-Campus de Beaulieu)

Enseignants (UR1) : M. BRUNEL + équipe DOP Institut Foton (TD 4H, TP 28H)

L'Institut FOTON (équipe DOP à Rennes, Campus de Beaulieu) propose un atelier technologique autour de la métrologie des lasers. L'objectif est que l'étudiant soit en capacité de caractériser expérimentalement tous les paramètres physiques associés aux ondes émises par un laser. Au travers de l'étude de lasers très différents les uns des autres (laser à semi-conducteur, laser à fibre, laser à solide pompé par diode, laser femtoseconde), il s'agira de mesurer "sous toutes ses coutures" la lumière laser, à savoir les aspects temporels, fréquentiels, spatiaux, ainsi que l'état de polarisation ou les bruits d'intensité et de phase. Pour cela, il faudra prendre en main un ensemble d'appareils de mesure de pointe du laboratoire, en effectuant des choix raisonnés pour mesurer tel ou tel paramètre. Au bilan, l'étudiant devrait acquérir une connaissance complète des paramètres pertinents, notamment en lien avec les applications des lasers, et des moyens de les mesurer.

Atelier 1 : Diodes lasers, EEL visible et DFB télécom  
Atelier 2 : Laser impulsionnel microchip Nd:YAG Q-switch nanoseconde  
Atelier 3 : Laser impulsionnel Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> femto-seconde  
Atelier 4 : Laser à fibre erbium DFB bi-polarisation

**S9-UE7-M3** Module OT3 : Technologie optronique III-V (à l'INSA Rennes)  
Enseignants (INSA Rennes) : Cyril PARANTHOËN, équipe OHM Institut Foton

Centrée sur la plateforme du CNRS de technologie NanoRennes, cette formation vise à aborder les procédés de fabrication des composants photoniques à base de semi-conducteurs III-V. Cet enseignement pratique qui se déroule essentiellement dans les salles blanches de la plateforme, consiste à réaliser une diode laser à semi-conducteur pour les applications en télécommunication optique. La formation se déroule en trois étapes principales, une introduction à la croissance des structures lasers, la réalisation technologique en salles blanches des dispositifs lasers, les caractérisations électro-optiques des diodes lasers.

**S9-UE7-M4** Module OT4 : Ateliers expérimentaux sur l'amplification à base de SOA, la commutation acousto-optique et la simulation de dispositifs WDM (à Brest)  
Enseignants (IMT Atlantique et ENIB) : Bruno FRACASSO,

Centré sur le site de Brest et adossé à la plate-forme PERDYN, cet enseignement vise à former, par la pratique, aux techniques de caractérisation de fonctions optiques dynamiques, tout particulièrement dans le contexte des télécommunications, qu'il s'agisse de dispositifs à base d'amplificateurs optiques à semi-conducteurs (SOA) ou de modulateurs spatiaux de lumière exploitant l'effet acousto-optique. Modélisation et simulation de dispositifs WDM. Ces travaux pratiques mettent donc en application les concepts théoriques enseignés dans le socle scientifique de l'option A.

**S9-UE7-M5** Module OT5 : Techniques d'imagerie en régime dynamique (à Brest)  
Enseignants (UBO) : Yann LEGRANDY, équipe OPTIMAG

Cet enseignement, qui s'appuie sur plusieurs dispositifs expérimentaux de recherche présents au laboratoire OPTIMAG de l'Université de Brest, vise à former par la pratique, au sein du laboratoire, aux techniques de métrologie relevant de l'optique pour les sciences du vivant et l'environnement (microscopie non linéaire appliquée à la biologie et au diagnostic médical, polarimétrie de Mueller, technique Lidar, techniques cohérentes pour la biologie). Ces travaux pratiques mettent donc en application les concepts théoriques enseignés dans le socle scientifique de l'option C.

**S9-UE8** OP-Ouverture professionnelle  
3 ECTS

**S9-UE9** OS-Ouverture scientifique  
6 ECTS



## S10 - STAGE

### S10-UE1 STAGE

30 ECTS

Le stage de fin d'études est réalisé au deuxième semestre. C'est le point d'orgue du master, dont le choix, laboratoire ou entreprise, sujet expérimental, numérique, poursuite en thèse ou non, etc., est discuté avec l'équipe pédagogique et soutenu par des activités de recherche de stage (forum de la photonique, travail sur le CV, etc.). Les étudiant.e.s trouvent des stages en laboratoire ou en entreprise, dans toute la France comme à l'étranger.