



**HAL**  
open science

## Mieux comprendre la dualité temps/fréquence et la modulation de phase optique

Kamal Hammani, Julien Fatome, Christophe Finot

► **To cite this version:**

Kamal Hammani, Julien Fatome, Christophe Finot. Mieux comprendre la dualité temps/fréquence et la modulation de phase optique. CETSIS 2014: Enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes, Oct 2014, Besançon, France. 6 p. hal-01069093

**HAL Id: hal-01069093**

**<https://hal.science/hal-01069093>**

Submitted on 26 Sep 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Mieux comprendre la dualité temps/fréquence et la modulation de phase optique

Kamal HAMMANI, Julien FATOME et Christophe FINOT  
christophe.finot@u-bourgogne.fr

Département de Physique, UFR Sciences et Techniques, Université de Bourgogne  
Laboratoire Interdisciplinaire CARNOT de Bourgogne, UMR 6303 CNRS-Université de Bourgogne  
9 avenue Alain Savary, BP 48070, 21078 DIJON Cedex

**RESUME :** L'analyse de Fourier tient une place majeure dans l'analyse et la compréhension de nombreux phénomènes de la physique et de l'ingénierie contemporaines. Pourtant les étudiants, qui ont souvent découvert cette notion à travers des travaux numériques, ne perçoivent pas forcément toute la richesse qui peut être tirée de l'analyse conjointe dans les domaines temporels et spectraux, notamment dans le domaine de l'optique. Nous avons mis en place dans le cadre de la seconde année du master Physique Lasers et Matériaux de l'Université de Bourgogne une expérience permettant d'insister sur ces notions et de montrer sur un exemple non trivial de modulation de phase périodique, les précautions à prendre dans l'interprétation des différents spectres accessibles expérimentalement. Cette séance de travaux pratiques, rendue possible grâce à l'utilisation de l'infrastructure de recherche, constitue également une introduction à l'utilisation de matériel standard des télécommunications optiques.

**Mots clés :** Retour d'expérience, traitement du signal, expérience d'optique, télécommunications optiques.

## 1 INTRODUCTION GENERALE

La très grande majorité des instruments d'optique comme les photodiodes, les capteurs CCD, ou bien encore l'œil sont avant tout sensibles à l'intensité lumineuse. Ainsi, la phase optique est bien souvent négligée car sa visualisation requiert des dispositifs plus élaborés de nature interférométrique. Or, l'information contenue dans la phase est depuis peu codée et exploitée dans le cadre de la transmission d'informations à haut débit et sur de longues distances. En supplantant les codages traditionnels en intensité [1], l'avènement de ces communications cohérentes marque d'ailleurs un tournant majeur des technologies haut-débit de ce début du XXI<sup>ème</sup> siècle [2].

L'objectif de ce TP est de mettre en évidence diverses signatures d'une modulation en phase simple (de type sinusoïdale, parfaitement périodique). Par ce biais, nous souhaitons également insister sur les possibilités offertes par l'analyse de Fourier [3], qui tient une place majeure dans d'innombrables branches de la physique et du traitement du signal dont l'optique [4]. Si les étudiants sont habitués à manipuler ce concept dans le cas d'un signal initial réel (par exemple, dans le cas de la diffraction de Fraunhofer provoquée par une ouverture [5]), nous avons constaté qu'ils éprouvaient beaucoup plus de difficultés à gérer des signaux modulés en phase. À travers ce TP, nous souhaitons éviter une approche exclusivement numérique [1] et amener nos étudiants à manipuler sur des équipements d'une plateforme de recherche où ils disposent de toute une gamme d'instruments analogiques pour visualiser directement différentes conséquences de cette modulation de phase.

Nous présenterons dans cette communication tout d'abord le matériel mis à disposition des étudiants avant de résumer les points les plus marquants des expériences menées. Nous présenterons également avant

de conclure la manière dont nous avons évalué nos étudiants.

## 2 L'EQUIPEMENT DISPONIBLE

### 2.1 La plateforme expérimentale PICASSO

Le TP proposé repose sur la plateforme PICASSO (Plateforme d'Innovation et de Conception pour l'Analyse et la Simulation de Systèmes Optiques) de l'Université de Bourgogne (UB). Plus précisément, cette plateforme intégrée à l'équipe Solitons, Lasers et Communications Optiques du Laboratoire Interdisciplinaire CARNOT de Bourgogne (UMR 6303 CNRS-UB) est spécialisée dans les télécommunications à haut-débit et dispose d'un équipement de caractérisation proche de l'état de l'art.

À vocation essentiellement recherche, nous l'utilisons pour la première fois dans le cadre d'une activité à destination d'un public de niveau Master (hors stages en laboratoire). Ce point a été positivement remarqué par les étudiants qui ont apprécié d'utiliser du matériel haut de gamme offrant une richesse d'analyse plus élevée que les dispositifs habituellement mis en œuvre pour la pédagogie. L'interface des équipements exclusivement en anglais n'a pas semblé rebouter les étudiants qui ont acquis assez rapidement une certaine autonomie pour les opérations les plus basiques. Notons que les fiches techniques résumant les caractéristiques principales de chaque appareil utilisé étaient incluses dans le fascicule remis à l'avance aux élèves. De même, nous avons sensibilisé les étudiants sur le coût d'acquisition de tels appareils d'analyse et le positionnement des appareils au niveau commercial (milieu ou haut de gamme).



fig 1 : Vue de la plateforme PICASSO

## 2.2 L'émission d'une onde modulée en phase

Le signal optique étudié est adapté aux télécommunications optiques. Une diode laser émet une lumière quasi-monochromatique à une longueur d'onde voisine de 1550 nm. Ce signal est ensuite modulé en phase à l'aide d'un modulateur en Niobate de Lithium  $\text{LiNbO}_3$  directement alimenté par une horloge électrique délivrant un signal sinusoïdal parfaitement périodique à une fréquence d'une dizaine de GHz. L'utilisation de matériel adapté aux débits des télécommunications optiques facilite l'obtention de telles fréquences qui, comme nous le verrons plus tard, est une condition indispensable pour observer un spectre optique avec suffisamment de précision.

## 2.3 La caractérisation de la lumière résultante

### 2.3.1 Dans le domaine temporel

Pour observer le profil d'intensité dans le domaine temporel, nous disposons d'une photodiode à grande bande passante (>50GHz) reliée à un oscilloscope disposant d'une bande passante d'analyse électrique adaptée. Notons qu'en complément de ce TP, les étudiants ont à leur programme une autre séance dédiée spécifiquement à la question de la caractérisation temporelle de signaux impulsionnels où les contraintes portant sur les bande-passantes d'analyse sont détaillées.

### 2.3.2 Dans le domaine spectral

Dans le domaine spectral, nous avons mené l'analyse du signal à travers son spectre électrique obtenu sur un analyseur RF de bande passante 26 GHz et à travers son spectre optique. Concernant le spectre électrique, nous avons fait le choix d'un appareil dédié, les étudiants ayant d'autre part découvert les fonctionnalités mathématiques désormais implémentées dans les dernières générations d'oscilloscopes à échantillonnage [6]. Pour le spectre optique, nous avons comparé les résultats obtenus pour deux analyseurs ayant des résolutions différentes : 0.07 nm pour l'un (moyen de gamme), < 0.1 pm pour l'autre (produit haut de gamme de conception française [7]).

## 2.4 Le façonnage optique de la lumière

La dernière étape de la séance consiste à tester l'impact d'une fonction de transfert complexe appliquée au signal optique considéré. Une telle fonction de transfert linéaire implique une modification des profils spectraux d'intensité et de phase de l'onde optique. Elle est réalisable grâce à un façonneur optique programmable basé sur une méthode proche de la méthode 4-f [5]. Auparavant restreinte à quelques laboratoires seulement et aux applications femtosecondes [8], le façonnage optique linéaire s'est désormais développé dans le domaine de longueurs d'onde des télécommunications optiques avec maintenant des dispositifs commerciaux simples d'utilisation [9]. Dans le cadre de ce TP, nous nous restreindrons à l'utilisation de fonctions de transfert simples comme l'ajout d'une phase parabolique ou bien le filtrage en intensité par une forme gaussienne dont la fréquence centrale peut être variée.

## 2.5 Montage complet

Le montage complet est schématisé sur la Figure 2 où nous avons distingué par différentes couleurs les parties gérant un signal électrique de celles gérant un signal optique. Le montage ne présente pas de difficulté particulière de mise en place, l'ensemble des composants disposant de connecteurs optiques standardisés ou électriques ne nécessitant pas d'alignement [10]. Ce TP a constitué pour nous une occasion de sensibiliser nos étudiants aux précautions à prendre lorsque des signaux ou des composants électriques RF sont mis en œuvre au niveau de l'adaptation d'impédance et des chocs électrostatiques.

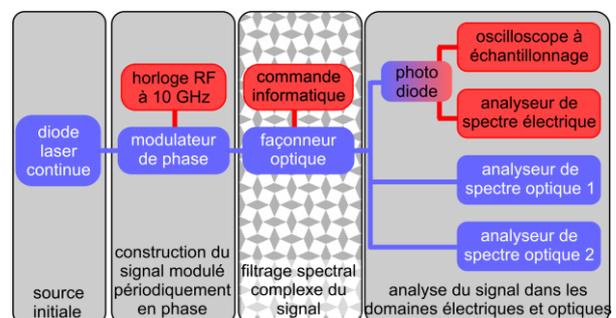


fig 2 : (haut) Photographie du montage expérimental final. (bas) Schéma du montage réalisé. Les éléments bleus représentent les composants optiques, ceux en rouge concernent les signaux de nature électrique.

Au total, l'équipement exploité dans cette expérience représente un budget d'acquisition d'environ 200 k€ HT, rendant indispensable la coopération avec une plateforme dédiée à la recherche, seule en mesure de disposer de ces éléments.

### 3 ETUDE REALISEE

#### 3.1 Mise en évidence de la modulation de phase

Après modulation, la lumière est caractérisée par son champ électrique complexe qui s'écrit sous la forme suivante :

$$\psi(t) = \sqrt{I(t)} e^{i\varphi(t)} e^{i\omega_b t} \quad (1)$$

avec  $I(t)$  et  $\varphi(t)$  les profils d'intensité et de phase temporels du signal considéré où  $\omega_b$  représente la pulsation de la porteuse optique. Dans notre cas,  $I(t)$  est constant au cours du temps tandis que  $\varphi(t)$  correspond à une variation sinusoïdale de fréquence  $f$  et d'amplitude  $A$  :

$$\varphi(t) = A \sin(2\pi f t) \quad (2)$$

##### 3.1.1 Dans le domaine temporel

La photodiode offre directement l'accès au profil d'intensité  $I(t)$ . Nous visualisons alors sur l'oscilloscope un signal continu sans aucune fluctuation caractéristique de la fréquence de modulation  $f$ , les fluctuations observées étant dues au bruit. Nous constatons également que la mise en marche ou l'extinction du signal de modulation électrique ne modifie en rien ce signal.

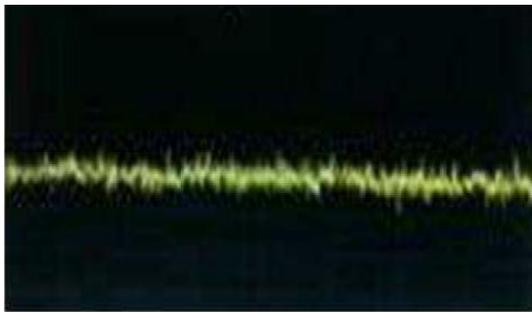


fig 3 : Vue sur l'oscilloscope (enregistrement sur une durée de 400 ps, niveau zéro correspondant à la base de la photo)

##### 3.1.2 À partir du spectre électrique

En utilisant l'analyseur RF, nous accédons au spectre électrique du signal. Mathématiquement, ce signal correspond au module de la transformée de Fourier du profil d'intensité  $I(t)$ . Il est donc ici important de noter que le spectre électrique ne comporte pas d'information directe sur la phase du signal optique et donc aucune signature n'est censée être observée à 10 GHz.

Expérimentalement, sur la Figure 4, nous distinguons un léger pic émergeant du bruit à cette fréquence. En éteignant la diode laser, nous observons que ce pic de-

meure présent, prouvant donc qu'il n'est pas en relation avec le signal modulé. Ce pic est attribué à un rayonnement parasite du générateur de signaux capté par le dispositif RF. Ce point nous a permis de souligner aux étudiants l'importance des considérations de type CEM dans les expériences de précision.

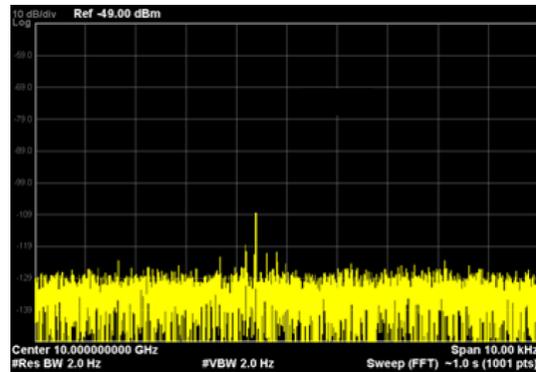


fig 4 : Résultats enregistrés sur l'analyseur de spectre RF. Les résultats sont observés autour de la fréquence de 10 GHz.

##### 3.1.3 À partir du spectre optique

Nous avons ensuite observé le spectre optique du signal. Nous avons tout d'abord utilisé un analyseur avec une faible résolution. Les résultats donnés Figure 5(haut) montrent alors que le spectre résultant est alors très loin d'une distribution de Dirac caractéristique d'un signal continu. Le spectre présente une certaine largeur et une structure complexe marquée par des bosses régulièrement espacées. En jouant sur l'amplitude de la modulation électrique (et donc optique), les étudiants ont vérifié que l'étendue et la forme du spectre varient en fonction de ce paramètre, alors que le profil d'intensité  $I(t)$  reste globalement inchangé. Ce point constitue une violation apparente d'une relation simplifiée sur laquelle se base bon nombre d'étudiants pour leur réflexion qualitative : plus un spectre est large, plus la structure temporelle est brève. Pour le champ lumineux de nature complexe, cette relation est à manipuler avec précaution.

Notons également que l'analyseur de spectre optique donne à travers la longueur d'onde, la valeur de  $\omega_b$  (alors que l'analyseur électrique n'apporte aucune information sur ce point).

L'utilisation d'un analyseur ayant une meilleure résolution est alors primordiale pour observer les détails de cette structure et faire le lien avec la théorie analytique. Les résultats obtenus avec l'utilisation d'un analyseur de spectre optique haut de gamme sont montrés Figure 5(bas). Cet enregistrement permet de voir distinctement le spectre de raies, en accord avec la nature parfaitement périodique du signal testé. En conséquence, l'analyse spectrale du signal se résume à l'analyse d'un ensemble de raies discret. Nous vérifions sur le spectre

que l'écart entre deux raies correspond exactement (à la résolution de l'ASO près) à la fréquence de modulation  $f$  du signal. Sur le spectre expérimental, nous constatons également la nature symétrique du spectre, l'amplitude décroissante des composantes (hors composante centrale) de même que l'excellent rapport signal sur bruit du signal optique étudié. Nous avons ainsi sensibilisé les étudiants à la grande dynamique de mesure qu'offrent ces appareils.

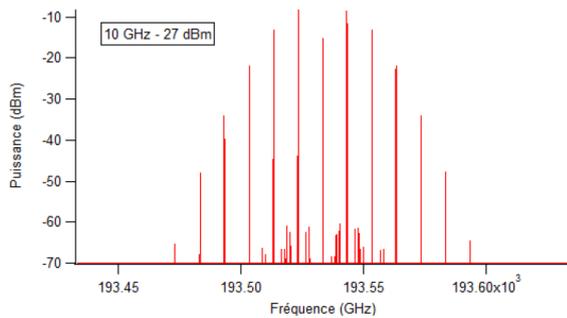
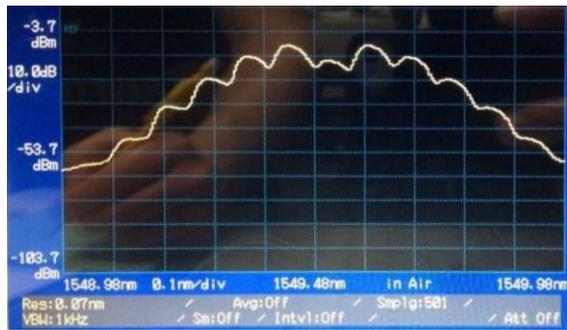


fig 5 : Vue sur deux analyseurs de spectres optiques. (haut) Analyseur avec une résolution conventionnelle pour les télécommunications optiques. (bas) Analyseur disposant d'une très haute résolution.

Le lien entre ces enregistrements et la théorie se fait assez simplement. L'amplitude  $s_n$  de la  $n^{\text{ième}}$  bande est analytiquement prédite à partir de fonctions de Bessel  $J_n$  d'ordre  $n$ , fonctions qui jouent un rôle important dans différentes branches de la physique [11] et de l'optique (diffraction par une ouverture circulaire, mode fondamental d'une fibre optique ...):

$$s_n = J_n(A) \quad (3)$$

Cette formule, également connue dans les domaines de la modulation de fréquence, met en évidence plusieurs propriétés illustrée Fig. 6, qui peuvent être confirmées très simplement de manière expérimentale :

- L'amplitude des raies ne dépend pas de la fréquence de modulation.
- L'évolution des fonctions de Bessel n'est pas monotone.
- Il est possible d'avoir, pour une certaine amplitude  $A$  de modulation,  $s_0 = s_1$  (point **A**) ou  $s_2 = s_0$  (point **B**) ou bien encore  $s_0 = 0$  (point **C**) ...

Par contre, comme le spectre optique est le module au carré de la transformée de Fourier du champ, il n'est pas possible de visualiser le changement de signe relatif entre les différentes composantes (qui restent néanmoins réelles).

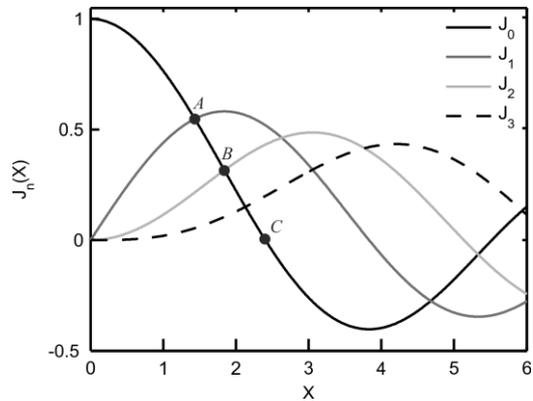


fig 6 : Fonction de Bessel  $J_n$  pour différents ordres  $n$

### 3.2 Façonnage optique simple

Une fois les questions spectrales bien assimilées, nous avons introduit le concept de façonnage optique linéaire, i.e. l'application d'une fonction de transfert en amplitude et phase. Les fonctions de transfert étudiées expérimentalement restent ici tout à fait basiques, à savoir un filtre Gaussien de largeur et position ajustables et une phase parabolique.

L'ajout d'une phase parabolique permet d'émuler physiquement la propagation dans une fibre optique. Les étudiants ont alors constaté que malgré aucun changement visible sur le spectre optique, le profil temporel est sévèrement affecté avec une modulation à la fréquence  $f$  qui se dessine clairement. Encore une fois, ce fait paraissait contre intuitif à nos étudiants qui pensaient que toute phase supplémentaire conduisait forcément à un élargissement temporel. Les étudiants ont également eu l'occasion de vérifier l'absence d'influence du signe du profil parabolique appliqué.

Le résultat du filtrage spectral par une Gaussienne décentrée conduit également à l'apparition de structures impulsionnelles temporelles périodiques comme représenté sur la Figure 7. Encore une fois, ce fait a paru contre intuitif aux étudiants habitués à raisonner sur la base du principe que plus le spectre est étroit, plus les impulsions sont étalées.

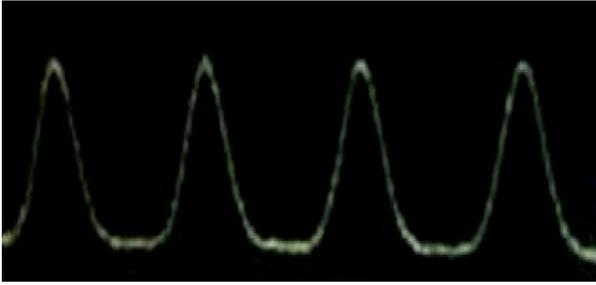


fig 7 : Vue sur l'oscilloscope temporel après filtrage (enregistrement sur une durée de 400 ps, niveau de zéro correspondant à la base de la photo)

L'utilisation de l'analyseur RF permet de confirmer le développement de ce signal périodique : une raie d'intensité beaucoup plus élevée que le parasite précédemment détecté est désormais nettement visible dans le spectre électrique à la fréquence  $f$ . De même, en regardant à la fréquence  $2f$  (ie 20 GHz), nous constatons l'émergence d'un autre pic, confirmant que le signal obtenu n'a pas un profil purement sinusoïdal. Les limites de l'analyseur RF n'ont pas permis d'analyser les harmoniques supérieures.

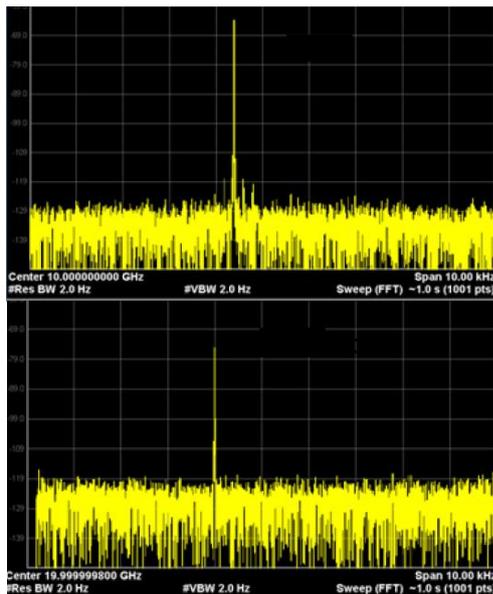


fig 8 : Vue sur l'analyseur RF après filtrage : fréquence autour de 10 GHz (haut) et autour de 20 GHz (bas)

#### 4 EVALUATION DES ETUDIANTS

Ce TP fait suite à un cours magistral de 8h détaillant les différents paramètres caractérisant la lumière et introduisant à ce titre l'ensemble des notions théoriques nécessaires à la bonne compréhension de la séance qui s'étalait sur une demi-journée (3 heures). Un énoncé complet était disponible à l'avance pour les étudiants. Les expériences se sont déroulées en présence perma-

nente d'un enseignant, présence justifiée d'une part par le coût élevé et la spécificité du matériel mis à la disposition des étudiants et d'autre part par la volonté d'instaurer une interaction et une réflexion tout au long du TP sur les phénomènes observés. Nous avons constaté la nécessité de nombreux rappels ou compléments à apporter pour corriger certaines images erronées qu'avaient pu se forger les étudiants sur la phase optique ou, de manière plus générale, sur ce que représentait les spectres observés.

Les étudiants ont travaillé par trinômes et ont été évalués durant cette séance sur leur implication personnelle, notre but étant d'éviter toute passivité des étudiants. Comme nous cherchions avant tout à stimuler les échanges, nous n'avons pas pris en compte les erreurs réalisées ou bien les questions.

Suite à la séance de TP, les étudiants avaient à rédiger un compte-rendu détaillé de leurs travaux. Ils disposaient pour ce faire de plusieurs semaines et nous les avons encouragés à échanger si besoin entre les différentes équipes. Ils ont également été fortement incités à utiliser des logiciels tels Matlab® pour reproduire numériquement et valider leurs observations. Volontairement, aucun code tout prêt ne leur a été fourni, leur expérience acquise dans les autres modules d'enseignement devant leur permettre d'être autonome sur cette tâche. Les comptes rendus ont été corrigés et pris en compte dans la note finale.

Les CRs ont été remis aux étudiants avant la dernière étape d'évaluation consistant en une courte interrogation orale (une dizaine de minutes) destinée à cerner la compréhension finale des concepts théoriques et expérimentaux abordés. Cette dernière étape a été réalisée individuellement.

#### 5 CONCLUSION

Le TP introduit cette année a eu un retour très positif, tant du point de vue des étudiants, ravis de manipuler du matériel à l'état de l'art sur un problème concret, que du point de vue des encadrants qui ont apprécié l'investissement dont ont fait preuve quelques trinômes. Les séances ont donné lieu à un véritable dialogue autour de l'importance de la phase optique, des télécommunications et du concept de spectre, permettant de corriger un certain nombre d'images erronées que s'étaient forgées les étudiants. Ce TP a clairement aidé les étudiants à mieux comprendre l'utilité et la complémentarité des différentes analyses qui peuvent être menées sur un signal et les nuances existants entre spectres électriques et optiques. Ainsi, une idée démentie est que le spectre électrique ne correspond pas à un simple agrandissement du spectre optique destiné uniquement à visualiser les fréquences les plus faibles avec plus de précision. Nous avons constaté que les exemples concrets visualisés directement sur les appareils de mesure peuvent constituer un complément très appréciable à l'outil de simulation numérique [12] en réduisant la passivité éventuelle de certains étudiants.

Nous projetons de faire progresser ce TP en incluant les techniques de filtrage ligne-à-ligne plus élaborées, ouvrant la porte à la génération de formes arbitraires. De telles techniques dépassent largement le champ d'application des seules télécommunications optiques par fibres et sont ainsi d'usage courant dans les expériences de contrôle cohérent par laser ou dans la génération de micro-ondes par techniques photoniques.

## Remerciements

Nous remercions le Labex ACTION (ANR-11-LABX-01-01) qui a financé une partie du matériel pédagogique ainsi que le FEDER et la Région Bourgogne qui à travers son programme PARI Photcom contribue à l'évolution technologique de la plateforme PICASSO. Cette innovation pédagogique a été rendue possible grâce à la confiance accordée par les responsables du master Physique Laser et Matériaux ainsi que le soutien de l'UFR Sciences et Techniques qui a accepté de prendre en charge le surcout induit par l'encadrement de ces travaux pratiques.

## Bibliographie

- [1] E. Cassan, "Une introduction aux télécommunications optiques par la simulation de systèmes simples," *Journal de l'Enseignement des Sciences et Technologies de l'Information et des Systèmes (J3EA)*, Vol. 2, 007 (2003).
- [2] P. J. Winzer, and R. J. Essiambre, "Advanced modulation formats for high-capacity optical transport networks," *J. Lightw. Technol.*, Vol. 24, 4711-4728 (2006).
- [3] J. Fourier, *Theorie analytique de la chaleur*, par M. Fourier (Chez Firmin Didot, père et fils, 1822).
- [4] P. M. Duffieux, *The Fourier Transform and its Applications to Optics* (Wiley, New York, 1983).
- [5] J.-C. Pissondes, "Du traitement du signal avec des ondes et des lentilles: Le traitement d'images et la transformée de Fourier à la lumière de la diffraction en Optique," *Journal de l'Enseignement des Sciences et Technologies de l'Information et des Systèmes (J3EA)*, Vol. 12, 0016 (2013).
- [6] G. Couturier, L. Béchou, J.-B. Bégueret, and C. Pellet, "FFT et applications: caractérisation d'un CAN, choix d'une fenêtre de pondération et réponse en fréquence d'un système linéaire," *Journal de l'Enseignement des Sciences et Technologies de l'Information et des Systèmes (J3EA)*, Vol. 2, 009 (2003).
- [7] A. Technologies, <http://www.apex-t.com/optical-spectrum-analyzers/>.
- [8] A. M. Weiner, "Femtosecond pulse processing," *Optical and Quantum Electronics*, Vol. 32, 473-487 (2000).
- [9] A. M. Clarke, D. G. Williams, M. A. F. Roelens, and B. J. Eggleton, "Reconfigurable Optical Pulse Generator Employing a Fourier-Domain Programmable Optical Processor," *J. Lightw. Technol.*, Vol. 28, 97-103 (2010).
- [10] P. Arguel, and P. Destruel, "Approche expérimentale d'une ligne de transmission par fibre optique," *Journal de l'Enseignement des Sciences et Technologies de l'Information et des Systèmes (J3EA)*, Vol. 2, 008 (2003).

[11] Gray, and Mathews, *Treatise on Bessel Functions and Their Applications to Physics* (MacMillan and Co, 1895).

[12] A. Quinquis, E. Radoi, C. Ioana, and F. Totir, "Outil Didactique pour l'Apprentissage du Traitement du Signal et de l'Image," *Journal de l'Enseignement des Sciences et Technologies de l'Information et des Systèmes (J3EA)*, Vol. 4 (2005).