

---

# Traitement numérique du signal

## Un exemple pratique:

### *Révéler la dynamique spatio-temporelle de la lumière dans une fibre optique par mesure stroboscopique*

Master 1 Physique appliquée  
MATAD2 - 2020/2021

---

François Copie - Bât. P5 - 154 - francois.copie@univ-lille.fr

#### Objectifs

- Comprendre globalement le fonctionnement d'une expérience scientifique complexe;
- Utiliser une fonction pré-écrite d'importation de données;
- Rédiger un programme réalisant un traitement de données en plusieurs étapes;
- Représenter graphiquement de façon claire des résultats d'expériences.

## 1 / Contexte

Lorsque la lumière se propage dans une fibre optique, des phénomènes dits *non-linéaires* peuvent dégrader de manière très importante la dynamique des impulsions lumineuses. Il est primordiale de bien comprendre ces phénomènes car, comme vous le savez, la fibre optique est au cœur des infrastructures de télécommunications actuelles et est à l'origine de l'augmentation incroyable du débit des connexions internet.

Une technique a été récemment développée pour analyser précisément le comportement de la lumière lorsqu'elle se propage sur plusieurs centaines voir milliers de kilomètres [1, 2]. Une des difficultés de ce genre d'expérience est qu'il y a 2 échelles de temps très différentes à concilier: une échelle relativement lente associée à la dynamique de propagation ( $\approx 10$  km et donc des temps de  $\approx 10$   $\mu$ s) et une échelle très rapide associée aux phénomènes non-linéaires et à la dynamique interne des impulsions lumineuses ( $\approx 1$  ps), soit 7 ordres de grandeur de différence! Dans le cas présent, vous allez observer les conséquences d'un phénomène non-linéaire particulièrement important appelé *instabilité de modulation*.

La façon la plus pertinente d'observer la dynamique d'impulsions lumineuses dans les fibres est au moyen de *diagramme spatio-temporelles* illustrant comment les impulsions très courtes se déforment au cours de leur propagation <sup>1</sup>. Le dispositif décrit ci-dessous permet de construire de tels diagrammes.

## 2 / Dispositif expérimental et données enregistrées

Les données que vous allez traiter sont issues d'une expérience schématisée ci-dessous.

Un faisceau laser est injecté dans une fibre optique puis traverse un modulateur. Ce modulateur transforme le laser continu en un train d'impulsions carrées de 6 ns. Cette impulsion entre à l'aide d'un coupleur dans un anneau de fibre de 8 km de long. L'impulsion circule dans la fibre et rencontre tout les 8 km (soit toutes les 40  $\mu$ s) le coupleur. A cet endroit une fraction de l'impulsion sort de l'anneau. Il en résulte que l'on obtient en sortie un signal consistant en des

---

<sup>1</sup>Il faut pour ça se placer dans un référentiel se déplaçant à la vitesse de groupe de l'impulsion.

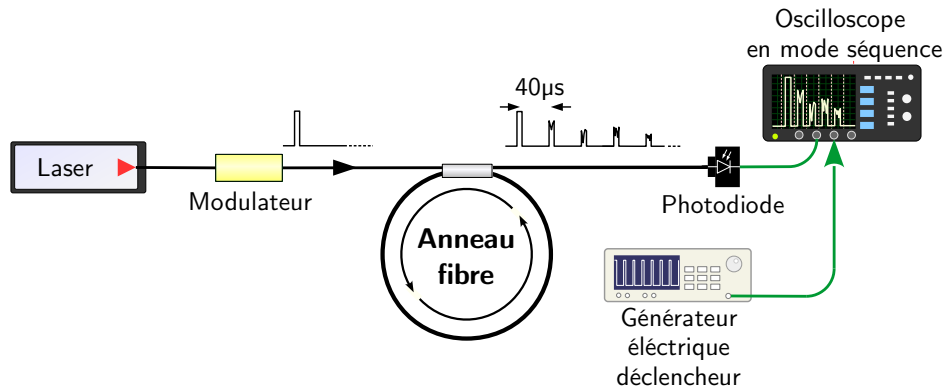


Figure 1: Schéma du dispositif expérimental pour l'enregistrement stroboscopique de la dynamique d'impulsions dans les fibres optiques.

impulsions successives, espacées de  $40 \mu\text{s}$  qui sont comme des *photographies* de l'impulsion prises à chaque fois qu'elle réalise un tour. L'intensité de la lumière est collectée par une photodiode rapide (bande passe de  $50 \text{ GHz}$ ) qui transmet une tension électrique proportionnelle à l'intensité lumineuse, avant d'être enregistrée par un oscilloscope avec un taux d'échantillonnage de  $160 \text{ Giga}$  échantillons par seconde! A ce rythme, la quantité de données générées est colossale:  $160$  milliards de points codés sur  $8$  bits par secondes! Il est donc important de penser de manière efficace l'enregistrement des données.

L'oscilloscope ultra-rapide (modèle Lecroy LabMaster 10 Zi-A) dispose d'un mode appelé *Séquence*. Dans ce mode, seule une fraction des données reçues est en fait enregistré. On définit un signal déclencheur (signal électrique) et la durée de l'enregistrement, ensuite l'oscilloscope enregistre une séquence à chaque fois que le signal déclencheur est reçu. Ici, un générateur électrique crée un signal de période  $\approx 40 \mu\text{s}$  ajusté pour être le plus proche du temps que prend l'impulsion pour faire un tour, c'est le signal déclencheur qui est envoyé à l'oscilloscope. Ce signal déclencheur est donc quasi-synchrone avec le signal que l'on veut enregistrer. En définissant une fenêtre d'enregistrement de  $500 \text{ ns}$ , l'oscilloscope enregistre un fichier contenant des séquences successives correspondant à des photographies de l'impulsion tout les  $8 \text{ km}$  de propagation en évitant d'enregistrer des données inutiles.

L'utilisation de l'oscilloscope en mode séquence permet d'enregistrer efficacement les données de l'expérience mais n'est pas exempt de défaut: le signal déclencheur n'est pas parfait car il n'est pas exactement synchronisé avec les impulsions et présente de la gigue (ou jitter en anglais) c'est à dire que sa fréquence n'est pas strictement constante dans le temps. Ces défauts vous apparaîtront dans le traitement des données et vous allez devoir y remédier!

### 3 / A vous de jouer !

Cette partie à vocation à vous guider dans le traitement de données enregistrées avec le dispositif décrit précédemment. Le travail est découpé en plusieurs parties qui sont expliquées brièvement, sans entrer dans le détail de toutes les opérations à effectuer.

Vous disposez d'un fichier de résultats expérimentaux nommé `C2--00010.trc`. `C2--00010` signifie qu'il s'agit du  $10^{\text{ème}}$  enregistrement de la voie 2 de l'oscilloscope. Le format `.trc` est un format binaire propre à la marque Lecroy. Ce fichier contient l'enregistrement de  $75$  séquences consécutives décrivant la propagation de  $4$  impulsions carrés de durée  $6 \text{ ns}$  séparées de  $100 \text{ ns}$ .

## A) Lecture du fichier de données expérimentales

- Créez un nouveau programme que vous appellerez `data_processing_oscillo.m`. Ecrivez un *header* c'est à dire une entête indiquant le nom du fichier, votre nom, la date et un résumé court du script que vous allez écrire ;
- Vous allez utiliser le script nommé `ReadLeCroyBinaryWaveform.m` pour importer les données d'expérience. Celles-ci sont au format `trc` qui est un format binaire propre à la marque Lecroy. Il est très compact mais la façon dont les données y sont stockées n'est pas directement lisible par un humain (au contraire du format CSV par exemple). **Comprenez comment fonctionne ce script et écrivez le code important les données du fichier `C2--00010.trc` dans une variable appelée `waveform` ;**
- Analyser dans votre espace de travail quelle est la classe de la variable `waveform`.

## B) Sélection des données à traiter

Vous constaterez que les données sont de base déjà bien organisées. Mais il n'est pas nécessaire de conserver tout les points mesurés.

- Pour commencer à visualiser les données, tracez sur un même graphique les enregistrements de plusieurs séquences. Observez. Essayez de comprendre ce qu'il se passe pour les impulsions ;
- Choisissez une des quatres impulsions et créez une nouvelles matrice `pulse` ne contenant que les données de cette impulsion à toutes les séquences. N'oubliez pas le vecteur de temps !

## C) Premier diagramme spatio-temporel avec les données "brutes"

Vous allez tracer ici un premier diagramme spatio-temporel de l'impulsion que vous avez sélectionné. La fonction `imagesc` est assez pertinente pour cela.

- Renseignez vous sur le fonctionnement de la commande `imagesc` et identifier quelles variables vous devez lui passer pour tracer votre diagramme ;
- Tracez le diagramme de l'évolution spatio-temporelle de l'impulsion que vous avez sélectionné en précisant les axes, l'échelle de couleur et donnez un titre! Les axes horizontaux et verticaux doivent représenter un temps et une distance de propagation (dans le sens que vous voulez) et les couleurs doivent représenter une tension électrique (enregistrée par la photodiode) ;
- Essayez d'interpréter au maximum ce que vous observez ;
- Enregistrez votre figure.

## D) Correction de la dérive et de la gigue par corrélation croisée

Vous avez du constater que les données "brutes" ne permettent pas d'analyser précisément le comportement de l'impulsion lumineuse lors de sa propagation. En effet, deux effets distincts rendent le diagramme spatio-temporel difficilement lisible:

1. Il y a une dérive linéaire lente de l'impulsion dans la fenêtre d'enregistrement. Ceci est dû à une mauvaise synchronisation entre le signal enregistré et le signal déclencheur ;
2. le signal déclencheur présente de la gigue ce qui donne un effet de "tremblement" du signal d'une séquence à la suivante.

Ces deux effets peuvent être corrigé dans le cas présent. **Cette étape constitue le cœur du traitement numérique de ces données.** Pour rendre les données plus lisibles il faut donc *recentrer* chaque séquence. Pour cela, vous allez effectuer numériquement la corrélation croisée entre les données de la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>ème</sup> séquence. La fonction de corrélation résultante présente un maximum pour une certaine valeur de temps  $\tau$ . Il suffit ensuite de décaler la 2<sup>ème</sup> séquence de cette quantité pour la *recentrer*. Ensuite il faut réaliser la même opération entre les 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> séquences, et ainsi de suite ...<sup>2</sup>

- Testez le fonctionnement de la corrélation croisée (fonction `xcorr`) sur les deux premières séquences. Il faut évidemment tracer le résultat pour comprendre ce qu'il se passe !
- Décalez la deuxième séquence de la quantité appropriée, vérifiée graphiquement que l'opération s'est bien déroulée. Il y a plusieurs méthode pour réaliser cela, réfléchissez et choisissez celle qui vous semble la plus facile ;
- Automatisez l'opération avec une boucle `for` pour qu'elle se fasse à la chaîne sur toutes les séquences. Le résultat sera stocké dans une nouvelle matrice `pulse_corr`. Lorsque vous décalez une séquence, il est judicieux de décaler en fait toutes les séquences suivantes de la même quantité. Comme il y a une dérive linéaire cela évite d'avoir à décaler chaque séquence consécutive d'une quantité de plus en plus grande.

## E) Visualisation des données entièrement traitées et conclusions

A ce niveau vous devez avoir une matrice `pulse_corr` contenant les données traitées décrivant l'évolution spatio-temporelle d'une impulsion lumineuse dans une fibre sur 600 km de propagation.

- Tracez soigneusement le diagramme spatio-temporel dans une figure ;
- Comparez au premier diagramme enregistré et concluez sur l'intérêt du traitement numérique que vous avez effectué ;
- Explorez le diagramme pour faire des observations intéressantes.

## References

- [1] Adrien E. Kraych, Pierre Suret, Gennady El, and Stéphane Randoux. Nonlinear Evolution of the Locally Induced Modulational Instability in Fiber Optics. *Physical Review Letters*, 122(5):054101, 2019.
- [2] Adrien E. Kraych, Dmitry Agafontsev, Stéphane Randoux, and Pierre Suret. Statistical Properties of the Nonlinear Stage of Modulation Instability in Fiber Optics. *Physical Review Letters*, 123(9):093902, 2019.

---

<sup>2</sup>Cette méthode ne fonctionne en fait que si l'on fait l'hypothèse assez forte que l'impulsion ne change pas beaucoup entre deux séquences consécutives. Faites moi confiance, cette hypothèse est suffisamment vérifiée ici!