

## TP2 - Capteur à fibre optique à mesure répartie de température (Fiber Optic Distributed Temperature Sensor : DTS)

### A. Principe de la mesure

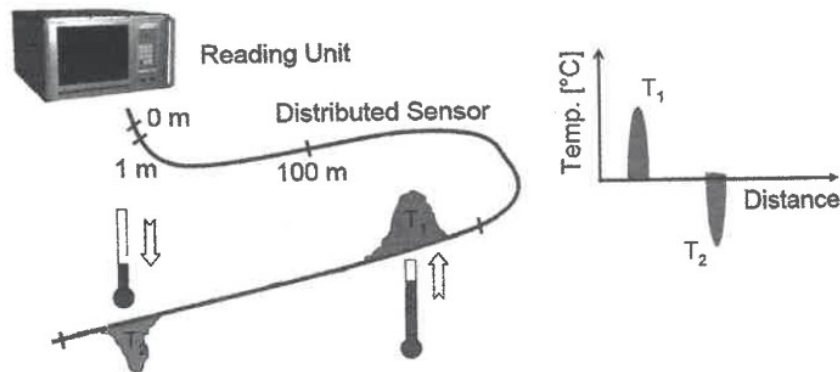


Figure 1 - Raman Distributed Sensor (DTS) measurement (Doc. Omnisens)

Le capteur de température à mesure répartie sur fibre optique (DTS : distributed temperature sensor) est équivalent à un ensemble de capteurs de température uniformément répartis le long de la fibre. La résolution spatiale le long de la fibre est la distance minimale  $\Delta z = z_2 - z_1$  entre deux pics de Dirac en température :  $T_1(z) = \theta_1 \delta(z - z_1)$  et  $T_2(z) = \theta_2 \delta(z - z_2)$ , localisés aux points  $z_1$  et  $z_2$  sur la fibre optique que l'on peut distinguer avec le système de mesure. La résolution  $\Delta z$  dépend de plusieurs facteurs, notamment de : (i) la durée  $\tau_L$  de l'impulsion laser et (ii) la bande passante  $\Delta f$  du système de détection optique (photodétecteur + système d'acquisition). Un pic de Dirac en température produira donc une réponse temporelle (réponse impulsionnelle) de largeur temporelle finie  $\Delta t$ .

Le photodétecteur reçoit la lumière Raman diffusée qui provient de toute la fibre optique qui fait de 20 m de longueur. La vitesse de propagation de la lumière dans la fibre est :  $v = 2 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$  (indice de la silice :  $n \approx 1,5$ ). La durée d'un aller-retour d'une impulsion lumineuse dans la fibre est :  $\frac{2 \times 20 \text{ m}}{2 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}} = 2 \times 10^{-7} \text{ s} = 200 \text{ ns}$ . Le signal DTS

Raman est donc réparti sur une durée de 200 ns. Si  $t=0$  est l'instant où l'impulsion laser entre dans la fibre, le signal de diffusion Raman venant de la position  $z$  sur la fibre est détecté à l'instant  $t(\text{ns}) = z(\text{m}) \times 10 \text{ ns/m}$ . Inversement, l'instant  $t$  où est détecté le signal détermine la position  $z$  du signal de température sur la fibre :  $z(\text{m}) = t(\text{ns}) \times 0,1 \text{ m/ns}$ . Avec une réponse impulsionnelle de largeur temporelle  $\Delta t$ , la résolution spatiale du capteur de température est :  $\Delta z = \frac{v \times \Delta t}{2}$ , soit  $\Delta z(\text{m}) = \Delta t(\text{ns}) \times 0,1 \text{ m/ns}$ . Si le signal est mesuré avec un bon rapport signal-à-bruit, la déconvolution du signal avec la réponse impulsionnelle permet d'obtenir une résolution spatiale meilleure que  $\Delta z$ .

### 1. Liste du matériel du banc optique

- **Fibre optique** de longueur 20 m, (M15L20 de Thorlabs à gaine orange de diamètre 3 mm ou FG200UCC\_High\_OH de diamètre 0,2 mm), servant de capteur de température à mesure répartie.
- **Laser impulsionnel Nd : YAG** à déclenchement passif (Q-switched), émettant à 1064 nm des impulsions d'énergie 10  $\mu\text{J}$ , de durée 0,6 ns à la cadence de 7 kHz.
- Atténuateur variable DO 2 max (transmission minimale 1%).
- **Cristal doubleur** de KTP convertissant le faisceau infrarouge à 1064 nm en un faisceau à 532 nm
- **Filtres optiques** : (i) passe-bande centré à 532 nm coupant le résidu infrarouge à 1064 nm, (ii) filtre passe-bande centré à 515 nm, (iii) filtre passe-bande centré à 550 nm, (iv) filtre coupe-bande centré à 532 nm.
- **Composants optiques** : Deux miroirs (M1 et M2), un prisme, trois lentilles convergentes ( $f_1=+50\text{mm}$ ,  $f_2=+100\text{mm}$  et  $f_3=300\text{mm}$ )
- **Spectromètre** USB 650 « Red Tide » pour l'analyse de la lumière diffusée
- **Photodétecteur** ADP430 de Thorlabs, avec photodiode Si à avalanche, avec gain M=100 au maximum.
- **Oscilloscope** LeCroy WavePro 7300A
- **Accessoires** : Carte de visualisation infrarouge, puissance-mètre optique, lunettes de protection pour 1064 nm, bloqueur de faisceau, photodiode Si pour le déclenchement de l'oscilloscope.

## B. Schéma du banc de mesure

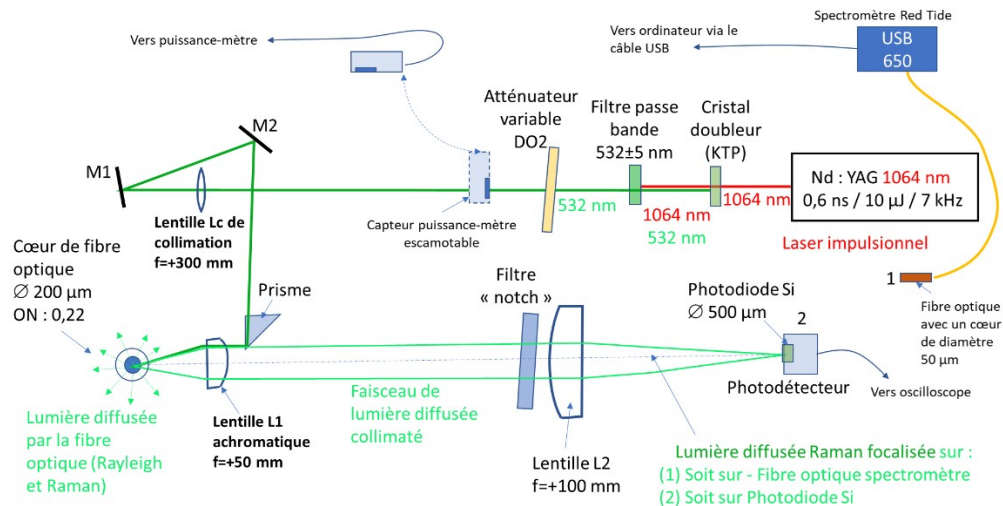


Figure 2 - Le capteur de température est une fibre optique à cœur de silice ( $\text{SiO}_2$ ) de 20 m de longueur.

## C. Doublage de fréquence

### Sécurité laser

On utilise un laser Nd :YAG impulsionnel à 1064 nm, émettant des impulsions de 10 µJ à une cadence de 7 kHz. La puissance moyenne est de 70 mW, donc le risque oculaire très élevé. On utilise un cristal doubleur de fréquence (KTP) qui donne une puissance moyenne de plus de 20 mW. Un filtre passe-bande bloque le résidu de lumière à 1064 nm qui n'a pas été doublée. L'atténuateur variable permet un contrôle de la puissance du faisceau d'excitation. Il est constitué d'un disque en verre pouvant tourner sur son axe. Une couche mince de chrome (Cr) d'épaisseur variable a été déposée sur le disque (zone semi-transparente) sauf sur un quart du disque (zone transparente). La densité optique (DO) maximale de 2, donc atténuation de 1/100 (zone où la couche de Cr est la plus épaisse). Lorsqu'on met le laser en marche, l'atténuation doit être maximale. L'augmentation de la puissance doit se faire progressivement. On doit toujours connaître la puissance du faisceau qui est utilisée, mesurée avec le puissance-mètre.

- L'obturateur du laser Nd :YAG doit être fermé au moment où le laser est mis sous tension. Placer perpendiculairement au faisceau la carte de visualisation IR (surface sensible est rectangulaire de couleur orange). La carte étant plastifiée, elle peut réfléchir une partie de la lumière laser ; il faut veiller à ce qu'aucune faisceau ne soit réfléchi en direction d'un œil. La carte IR étant en place juste après la sortie du laser, on peut ouvrir l'obturateur. On doit voir alors une tache lumineuse orangée qui indique que le faisceau sort du laser. Fermer l'obturateur une fois les observations terminées.
- Vérifier que l'atténuateur est au maximum d'atténuation (minimum de puissance en sortie). L'obturateur doit être fermé pendant la mise en place du capteur du puissance-mètre perpendiculairement au faisceau (le capteur est réfléchissant donc susceptible de renvoyer une partie du faisceau dans une direction non souhaitée pendant la manoeuvre). Ouvrir l'obturateur une fois le capteur bien en place. Mesurer la puissance à 532 nm. Tourner la roue de l'atténuateur de manière à augmenter la puissance. La puissance maximale devrait être de l'ordre de 20 mW.
- Une fois déterminée la puissance maximale à 532 nm, repositionner l'atténuateur pour avoir le minimum de puissance (<1 mW). Fermer l'obturateur et faire pivoter la tige qui porte le capteur pour permettre au faisceau de passer. Ouvrir à nouveau l'obturateur et vérifier avec un morceau de papier blanc le trajet du faisceau optique jusqu'à la fibre optique.

## D. Spectre de la silice amorphe

### 2. Injection du faisceau d'excitation dans la fibre optique

Le faisceau d'excitation est focalisé par la lentille L1. Il entre dans le cœur de la fibre placée au centre de la fêrûle. Pour être guidé par la fibre optique, la direction du faisceau d'excitation doit se trouver dans le cône d'acceptance de la fibre. Dans ce cas, la lumière d'excitation ressort à l'autre extrémité de la fibre en formant un faisceau conique (la

tache projetée sur une surface perpendiculaire à l'axe du faisceau est circulaire. Elle est toutefois « speckelisée » parce que la fibre est multimode. En revanche, si on voit un anneau de lumière, cela signifie que la lumière a fuité dans la gaine et donc que l'injection se trouve en dehors du cône d'acceptance. Pour recueillir le maximum de lumière diffusée, on a intérêt à utiliser une fibre de la plus grande ouverture numérique (ON) possible (NA : numerical aperture). L'ouverture numérique est un paramètre important qu'il est important de connaître.

- Pour mesurer l'ouverture numérique de la fibre optique, positionner la fibre au niveau de la table et projeter la lumière vers le sol sur lequel on aura posé une feuille de papier blanc. Tracer le contour de la tache lumineuse sur la feuille afin de mesurer le diamètre de la tache lumineuse. Calculer l'angle d'acceptance puis l'ouverture numérique de la fibre. Calculer le diamètre du cône d'acceptance à 50 mm de la fibre et conclure quant à l'adaptation de ce diamètre avec celui de la lentille L1( lentille achromatique de distance focale 50 mm qui collecte la lumière rétrodiffusée).

### 3. Analyse de la lumière diffusée avec le spectromètre

La lumière rétrodiffusée par la fibre contient : les photons Rayleigh (diffusion élastique, donc sans changement de fréquence) et les photons Raman (diffusion inélastique, donc avec changement de fréquence). Seuls les photons Raman portent une information sur la substance diffusante (ici la silice constituant le cœur de la fibre). Les photons Rayleigh à 532 nm étant environ  $10^6$  fois plus nombreux que les photons Raman, ils doivent être retirés du faisceau de photons diffusés avant analyse par le spectromètre (sinon le spectromètre sera ébloui par le flux trop important de photons Rayleigh). La lumière diffusée est donc filtrée par un filtre coupe-bande (filtre « notch ») de DO=4 pour les photons Rayleigh. La lentille L2 (distance focale :  $f=+100$  mm) sert à focaliser la lumière Raman sur le cœur de la fibre optique qui est reliée au spectromètre USB650.

- Régler la puissance du faisceau d'excitation à environ 1 mW.
- Pour vérifier le centrage de la tache focalisée par L2 sur le cœur de la fibre optique. Pour cela il sera nécessaire de faire basculer le filtre « notch » (manipulation en tenant la monture du filtre. Attention à ne pas toucher les surfaces optiques du filtre). Si la tache n'apparaît pas bien focalisée au centre de la fêrle, il faut la centrer en agissant sur les vis de réglage latéral du support de la lentille L2.
- Pour enregistrer un spectre Raman de la silice amorphe, il faut préalablement remettre en place le filtre « notch ». Ouvrir l'application « SpectraSuite » qui pilote le spectromètre. Configurer « SpectraSuite » pour la spectrométrie Raman (Echelle verticale : 500 counts max, horizontale :  $-1000$  à  $2000\text{ cm}^{-1}$ ). Si l'on ne voit pas le spectre, on peut augmenter un peu la puissance d'excitation à 2 mW. Agir de nouveau sur les vis de réglage de la lentille de 100 mm de focale afin de maximiser l'amplitude du signal Raman.
- Optimiser l'amplitude du signal Raman en agissant d'abord sur les translations X, Y et Z de la fibre-capteur, puis en agissant sur les vis de la lentille L2.
- Augmenter la puissance d'excitation afin d'atteindre un signal d'environ 3000 counts.
- Comparer avec un spectre de la silice amorphe de la fibre avec celui de la silice tiré de la littérature (*Spectre\_Raman\_Silice\_SiO2.png*).

### 4. Test de linéarité de la réponse spectrale avec la puissance d'excitation

Il est important de vérifier si l'amplitude du signal Raman est bien proportionnelle à la puissance d'excitation. L'amplitude du signal Raman est proportionnelle au temps d'intégration.

- Proposer un protocole d'expérience qui permet de vérifier la linéarité du signal Raman avec la puissance d'excitation. Indication : dans le menu « graph layer options », onglet « overlay » permet prendre le dernier graphique enregistré comme référence. On peut aussi enregistrer les données dans un fichier afin de les traiter ultérieurement.

#### Filtrage sélectif Stokes et anti-Stokes

- Placer le filtre passe-bande Stokes et enregistrer le spectre de la lumière de diffusion Raman filtrée. Tourner la tige supportant le filtre pour changer l'angle d'incidence sur le filtre et décrire l'effet du filtre sur la bande Stokes.
- Placer maintenant le filtre passe-bande anti-Stokes et enregistrer le spectre de la lumière de diffusion Raman filtrée. Tourner la tige supportant le filtre pour changer l'angle d'incidence sur le filtre et décrire l'effet du filtre sur la bande Stokes.

## E. Détection du signal DTS avec le système d'acquisition rapide

On utilise un oscilloscope numérique LeCroy 7300A de bande passante 3 GHz pouvant échantillonner jusqu'à 20 GHz.

En revanche, pour détecter le signal DTS, on utilisera le photodétecteur APD430A de Thorlabs dont la bande passante est seulement de 400 MHz. La lumière diffusée est reçue par une photodiode à avalanche Si (en silicium). Le gain de l'avalanche atteint la valeur maximale  $M=100$ .

La résolution spatiale du capteur à mesure répartie sur la fibre dépend de : (i) la durée de l'impulsion laser et (ii) de la réponse impulsionnelle du système de détection optique. Comme la bande passante du photodétecteur est beaucoup plus petite que celle de l'oscilloscope, seul le photodétecteur limite en pratique la résolution spatiale du capteur.

On utilisera le fait que le système de mesure a un comportement linéaire, ce qui permettra d'améliorer la résolution spatiale en déconvoluant le signal DTS mesuré par la réponse impulsionnelle du système de mesure (voir § 13).

### 5. Observation du signal DTS

On utilisera APD430A de Thorlabs qui comprend une photodiode à avalanche. La sensibilité du photodétecteur peut être modifiée en modifiant le gain  $M$  de la photodiode à avalanche en tournant le bouton de gain (gain maximum :  $M=100$ ).

- Mettre l'oscilloscope LeCroy 7300A sous tension.
- Mettre en place le photodétecteur APD430A. Enlever le carton qui diffuse la lumière. Les impulsions d'excitation doivent entrer dans la fibre et ressortir à l'autre extrémité (le vérifier en retirant le bouchon sur la fêrûle).
- Régler le gain  $M$  au minimum. Laisser pour le moment le photodétecteur hors-tension. Mettre en place le filtre « notch » et la puissance d'excitation au maximum. On devrait pouvoir observer la tache de diffusion Raman focalisée sur une feuille de papier blanc. Positionner le photodétecteur de sorte que la photodiode à avalanche soit bien centrée sur la tache focalisée. Bloquer la tige portant le photodétecteur. Connecter la sortie du photodétecteur à la voie C2 de l'oscilloscope. Mettre sous tension le photodétecteur (interrupteur sur le boîtier d'alimentation + interrupteur sur le photodétecteur 0→1, gain au minimum pour commencer).
- Mettre en position le filtre passe-bande anti-Stokes, en laissant en place le filtre « notch ».
- Dans le menu « Recall configuration » rappeler la configuration « Raman\_fibre ». Vérifier les paramètres de l'acquisition : fréquence d'échantillonnage 20 GS/s, Echelle horizontale : 20 ns/div. Vérifier les réglages suivants pour la voie C2 : bande passante maximale (full, c'est-à-dire 3GHz), couplage DC 50Ω, averaging 4000.
- Le signal DTS montre une lente diminution du signal au cours du temps (à interpréter). Monter progressivement le gain  $M$  de la photodiode à avalanche et vérifier que l'amplitude du signal croît.
- Afficher la fonction « math » F1 qui effectue un moyennage de C2 (choisir : average « summed », 10 sweeps). Appuyer sur la touche « STOP » puis « clear sweeps ». Redémarrer les acquisitions avec « NORMAL ». Les acquisitions s'arrêtent à la fin du moyennage (nécessite environ 15 secondes).
- Pour configurer le dossier de sauvegarde des résultats de mesure, aller dans « File\Save waveform ». Sélectionner « File ». Dans le champ « Trace title » modifier le nom du fichier qui sera sauvegardé, par exemple « impulsion\_excitation\_FEMTO ». Dans le champ « Save files in directory », créer votre répertoire pour la sauvegarde « D:\My Document\TP\_MIA\_Raman\_Fiber\Nom\_de\_votre\_répertoire ». Cliquer sur « Save Now ». Le répertoire est créé en même temps que les données du signal C2 (colonne temps et colonne amplitude) sont sauvegardées dans un fichier texte (séparateur de colonne est la « , »). Pour vérifier que la sauvegarde a bien été faite, aller dans le menu « File\minimize » et ouvrez l'explorateur pour voir les fichiers enregistrés dans « D:\My Document\TP\_MIA\_Raman\_Fiber\Nom\_de\_votre\_répertoire ». A la fin du TP, on récupérera les données enregistrée sur une clé USB pour les sauvegarder dans un dossier partagé UMBOX.
- Sauvegarder le signal moyenné F1 dans un fichier puis dans la mémoire M1 (signal de référence). Sauvegarder une image au format png dans le menu « file\print setup ». Afficher la fonction « math » F2=F1-M1, qui effectue la différence entre F1 et le signal M1. Le signal F2 est partout nul. Refaire une nouvelle acquisition. Recommencer les acquisitions pour vérifier que F2 (ligne de base) est proche de zéro. Sauvegarder le signal F2 dans un fichier (au format « .csv »).

## 6. Réponse impulsionnelle

Pour déterminer la réponse impulsionnelle, on chauffera (ou on refroidira) localement la fibre (sur une longueur de 2 à 3 cm maximum) et on enregistrera le signal DTS.

- Un bloc d'aluminium de 3 cm d'épaisseur sera chauffé jusqu'à 60°C. Le bloc chauffé sera placé sur la fibre avec un thermocouple dessous. Après avoir effacé les données de la mémoire avec la fonction « clear sweep », une nouvelle acquisition redémarre. Sauvegarder les signaux F1 et F2. Noter la température de la fibre et dans le nom du fichier, noter cette température, par exemple avec « F2\_xxxx\_2m\_AS\_60C.txt » (AS pour anti-Stokes et 60C pour 60°C à 2 m de l'extrémité de la fibre).
- Remplacer le filtre passe-bande anti-Stokes par le filtre passe-bande Stokes. Enlever avant le bloc chaud et attendre la stabilisation de la température avant de faire la ligne de base F1 que l'on sauvegarde dans la mémoire M1. Remettre le bloc chaud à une position 1 m plus éloignée de l'extrémité de la fibre. Refaire une mesure. Sauvegarder sous le nom « F2\_3m\_S\_60C.txt ».
- Remettre le filtre AS.

## 7. Signal DTS avec une distribution de température

Une partie de la fibre sera chauffée autour de 60°C et une autre partie sera refroidie. Le chauffage et le refroidissement sera assuré par des parallélépipèdes (bloc) en aluminium. Le bloc froid a été préalablement conservé à -18°C dans un congélateur.

- Un bloc d'aluminium avec une sonde thermocouple K et des gants anti-chaleur posés dessus, se trouve sur le dispositif de chauffage. Chauffer le bloc d'aluminium jusqu'à une température comprise entre 50°C et 70°C.
- La fibre optique est déroulée sur la table. Repérer un point A où se trouvera le point chaud (centre du bloc chaud posé sur A, faisant 6 cm de largeur). A une distance comprise entre 40 cm et 100 cm du point A se trouvera le point B où sera placé le centre du bloc froid (faisant 30 cm de largeur).
- Après l'installation des blocs chaud et froid, enregistrer à nouveau les signaux F1 et F2.
- (Après le TP, dans le CR) Déterminer par résolution du problème inverse la distribution de température le long de la fibre.

## F. Travail à réaliser après le TP

### 8. Linéarité du spectre de la silice avec la puissance d'excitation

- A partir des données enregistrées, établir si la réponse spectrale suit une loi linéaire par rapport à la puissance d'excitation (ou non).

### 9. L'atténuation du signal DTS

L'intensité du signal DTS décroît durant les 200 ns que dure le signal.

- Utiliser le signal DTS enregistré F1 et tracer le graphique : en fonction de  $2z$  la distance de propagation aller-retour ( $z$  est la coordonnée d'un point de la fibre où est effectuée la mesure ;  $z=0$  est le point d'entrée). Ajouter une courbe de tendance linéaire et calculer l'atténuation du signal DTS en dB/m.

### 10. Bruit du photodétecteur APD 430

- L'annexe du manuel d'utilisation du photodétecteur indique un bruit intégré de 5,5 nW (bruit équivalent à l'entrée du photodétecteur dans l'obscurité), valeur donnée pour un gain de  $5,3 \times 10^5 V/W$ , à la longueur d'onde de 800 nm. Calculer le bruit  $\sigma_U$  en sortie.

### 11. Bruit dans le signal DTS

On a répété plusieurs fois la mesure sans chercher à modifier la température de la fibre.

- Tracer le graphique donnant l'écart-type  $\sigma_T$  du bruit de mesure ramené à l'entrée soit la « température équivalente au bruit », en fonction de  $z$ , on prendra la sensibilité calculée et on négligera ses variations avec  $z$ .

### 12. Détermination de la réponse impulsionnelle

La réponse impulsionnelle  $h(z)$  du capteur est la réponse du système de mesure à la distribution de température d'un pic de Dirac :  $T(z) = \delta(z)$ . Si la bande passante du système de détection était infinie et que l'impulsion laser était ultracourte, la réponse impulsionnelle  $h(z)$  serait un pic de Dirac. Le système de mesure utilise des impulsions



de durée de 0,5 ns avec une bande passante de 400 MHz, d'après la documentation du photodétecteur APD430A. Par conséquent, la réponse impulsionnelle  $h(z)$  aura la forme d'un pic d'une certaine largeur qu'il est possible de déterminer expérimentalement. Soit  $T(z)$  une distribution quelconque de température. En supposant que le système de mesure se comporte de manière linéaire, le signal de température mesuré  $S(z)$  sera le produit de convolution de la distribution de température  $T(z)$  par la réponse impulsionnelle  $h(z)$ , ce qui s'écrit :

$$S(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} T(z-z')h(z')dz'$$

Connaissant la distribution de température  $T(z)$  et le signal mesuré  $S(z)$ , il est possible de déterminer la réponse impulsionnelle  $h(z)$  (opération de déconvolution). Ce type de « problème inverse » est typiquement un « problème mal posé » qui nécessite une méthode de calcul basée sur la régularisation de Tikhonov (voir la présentation de Melina Freitag). Le programme « [DTS\\_Impulse\\_response\\_Deconvolution\\_with\\_Tikhonov\\_regularisaton\\_v1.R](#) » implémente la méthode. On suppose que la distribution de température  $T(z)$  est une porte de largeur déterminée par la largeur du bloc chaud et de hauteur égale à la température du bloc chaud.

- Dans le programme, paramétrer la fonction qui représente la distribution de température. Exécuter le programme qui demandera de sélectionner le signal F2 enregistré dans le format « .csv ». Le programme calculera la réponse impulsionnelle et la sauvegardera dans un fichier au format « .csv ».

### 13. Recherche d'une distribution de température le long de la fibre

C'est un « **problème inverse** » résolu par **déconvolution**<sup>1</sup>. Dans la dernière section de la partie expérimentale, on a créé une distribution de température sur la fibre comprenant une zone chaude homogène centrée sur un point A, sur une longueur de fibre  $l_A$  et une zone froide centrée en un point B, sur une longueur de fibre  $l_B$ . On a noté la distance entre les deux points A et B, les largeurs de fibre chauffée  $l_A$  ou refroidie  $l_B$ , ainsi que les températures des points chaud  $T_A$  et froid  $T_B$ . La distribution de température est donc *a priori* connue, ce permettra de vérifier que la méthode utilisée pour résoudre le problème inverse est correcte. Le signal DTS est :  $S(z)$  (c'est le signal F2 enregistré par l'oscilloscope) et la réponse impulsionnelle  $h(z)$  du système de mesure a été préalablement déterminée. Le problème que l'on a maintenant à résoudre est de calculer la distribution de température  $T(z)$  connaissant le signal  $S(z)$  et la réponse impulsionnelle  $h(z)$ . La relation entre les trois fonctions est :  $S(z) = (T * h)(z)$ , où \* désigne le produit de convolution, ce qui s'écrit :

$$S(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} T(z-z')h(z')dz'$$

Du fait de la commutativité du produit de convolution, on peut également écrire :

$$S(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(z-z')T(z')dz'$$

Par conséquent, pour trouver la distribution de température  $T(z)$ , on peut utiliser la même méthode que celle qui a été utilisée pour trouver la réponse impulsionnelle  $h(z)$  connaissant  $T(z)$  et  $S(z)$ .

- Exploiter le signal DTS enregistré (F2) pour déterminer la distribution de température sur la fibre. Choisir au mieux le paramètre de régularisation.

### 14. Estimation de la puissance de diffusion Raman

- A partir des données du photodétecteur APD430A, calculer la puissance Raman moyenne rétrodiffusée arrivant sur le photodétecteur.
- Nous faisons l'hypothèse que toute la lumière diffusée Raman sortant de la fibre dans le cône d'acceptance est interceptée par la lentille collectant la lumière diffusée que le système optique n'a pas de pertes. En intégrant sur toute la durée du signal DTS, calculer l'énergie lumineuse Raman rétrodiffusée.

---

<sup>1</sup> Ce type de problème étant « mal posé », il est indispensable d'utiliser une méthode de régularisation de la solution (méthode de régularisation de Tikhonov).

- Calculer le rapport entre l'énergie lumineuse Raman rétrodiffusée et l'énergie de l'impulsion d'excitation.

## G. Annexe

### 15. Atténuation de la fibre capteur

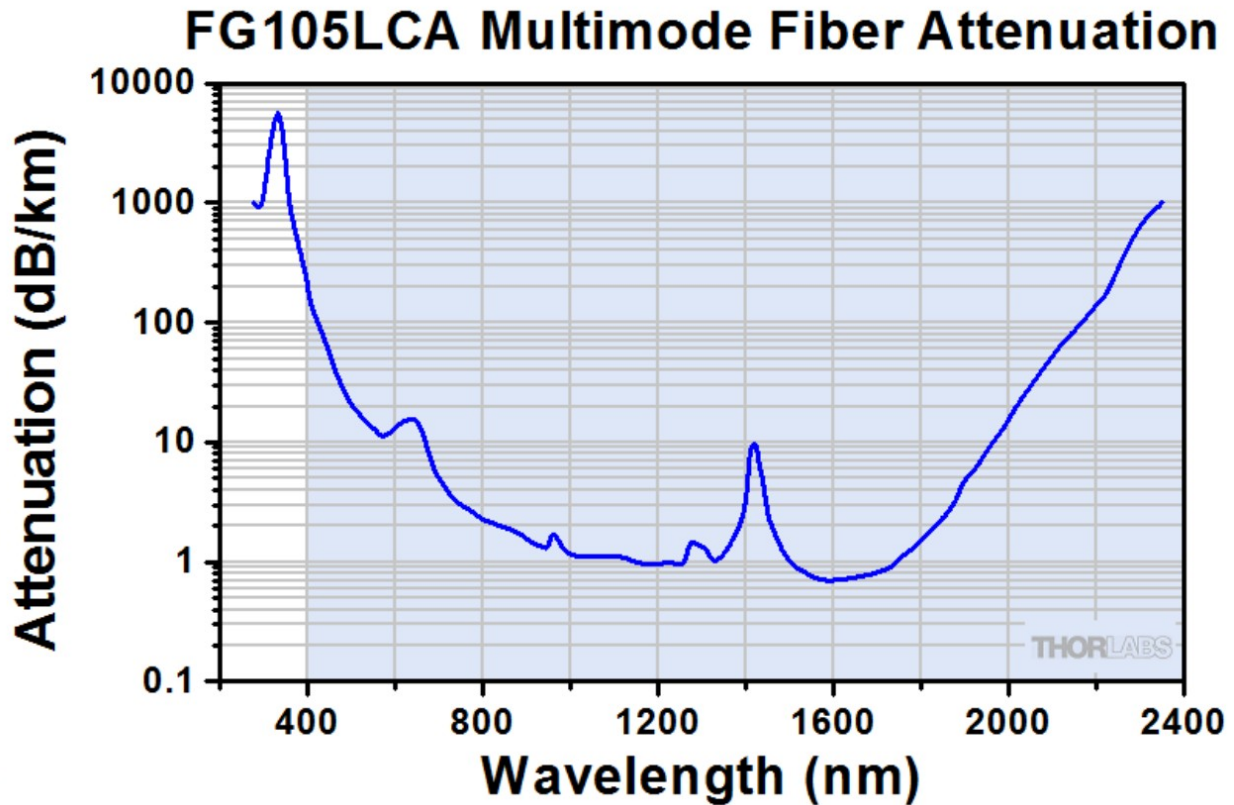


Figure 3 : Atténuation de la fibre optique M15L20 de Thorlabs. A 532 nm, l'atténuation de la fibre est comprise entre 10 et 20 dB/km.

A la longueur d'onde utilisée (532 nm), la fibre a une atténuation de 12 dB / km. L'atténuation est :  $A_{dB} = 10 \times \log_{10} \left( \frac{P_0}{P_1} \right) / l$ , où  $P_0$  est la puissance incidente à l'entrée de la fibre,  $P_1$  est la puissance à la sortie de la fibre

et  $l$  est la longueur de la fibre. Sur 20 m, la perte relative de puissance est :  $1 - \frac{P_1}{P_0} = 5\%$ .

### 16. Déconvolution par régularisation de Tikhonov

Un exemple typique de déconvolution est le problème suivant. Un photodétecteur reçoit un signal lumineux  $I(t)$  et fournit en sortie un signal  $U(t)$ . Le photodétecteur se comporte comme un filtre passe-bas caractérisé par une fréquence de coupure à -3 dB  $f(-3dB)$ , qu'on appelle bande passante du photodétecteur. On adopte souvent pour un photodétecteur un modèle de système dynamique du premier ordre. Donc la réponse impulsionnelle du photodétecteur, qui est la réponse à une fonction de Dirac  $\delta(t)$ , est de la forme :  $h(t) = 0$  si  $t < 0$  et  $h(t) = \frac{1}{\tau} \exp \left( -\frac{t}{\tau} \right)$  si  $t \geq 0$ , où la constante de temps est :  $\tau = \frac{1}{2\pi f(-3dB)}$ .

La réponse  $U(t)$  du photodétecteur est le produit de convolution de  $I(t)$  par  $h(t)$ , qui s'écrit :  $U(t) = (I * h)(t)$ . De manière explicite, on a :

$$U(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(t-t')h(t')dt'$$

Le problème de déconvolution est de trouver  $I(t)$ , connaissant  $h(t)$  et  $U(t)$ . Remarque : le produit de convolution est commutatif ; on peut écrire :  $U(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t-t')I(t')dt'$ .

Le programme :

« [Photodetector\\_Response\\_Deconvolution\\_with\\_Tikhonov\\_regularisation\\_v1.R](#) »

implémente la déconvolution par régularisation de Tikhonov. L'algorithme implémenté suit la méthode présentée par Melina Freitag dans le document « Thikhonov\_regularisation\_M\_Freitag.pdf ».

$$(f * g)(t) := \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)g(t - \tau) d\tau.$$

An equivalent definition is (see commutativity):

$$(f * g)(t) := \int_{-\infty}^{\infty} f(t - \tau)g(\tau) d\tau.$$

For functions  $f, g$  supported on only  $[0, \infty]$  (i.e., zero for negative arguments), the integration limits can be truncated, resulting in:

$$(f * g)(t) = \int_0^t f(\tau)g(t - \tau) d\tau \quad \text{for } f, g : [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}.$$