

## Optimisation de l'émission du continuum femtoseconde de lumière blanche entre 600 nm et 800 nm

S. Ramstein et S. Mottin

Laboratoire TSI CNRS UMR 5516, 42023 St-Étienne Cedex 02, France  
e-mail : [Stephane.ramstein@univ-st-etienne.fr](mailto:Stephane.ramstein@univ-st-etienne.fr) ; [mottin@univ-st-etienne.fr](mailto:mottin@univ-st-etienne.fr)

**Résumé.** Un dispositif de spectroscopie avec résolution du temps de vol des photons en milieu diffus a été développé. Celui-ci repose sur l'utilisation d'un continuum de lumière blanche généré par focalisation d'un laser amplifié (830 nm, 1 kHz, 0.5 W, 170 fs) dans de l'eau déminéralisée. Afin d'optimiser spectralement et en puissance la source blanche sur la fenêtre spectrale 600–800 nm, une étude de la mise en forme spatio-temporelle avant autofocalisation de l'impulsion laser par le milieu a été menée. Cette mise en forme est effectuée de manière spatiale en changeant la focale de la lentille de focalisation et de manière temporelle en changeant le taux de compression de l'impulsion. L'étude montre que le cône de lumière émise possède plus de puissance dans la fenêtre spectrale d'intérêt pour des focales longues. Sur la fenêtre 600-800 nm, le rendement énergétique intégré varie de 5%, avec une focale  $f = 6$  cm, à 15%, avec une focale  $f = 30$  cm. La mise en forme temporelle montre des effets similaires avec les mêmes ordres de grandeur.

### 1. INTRODUCTION

La spectroscopie proche infrarouge (NIRS, Near Infrared Spectroscopy) des tissus est une technique permettant le suivi de paramètres physiologiques comme le volume cérébral sanguin des tissus et leur taux d'oxygénation du fait des différences spectrales entre les hémoglobines oxygénées et déoxygénées. Ces index du métabolisme énergétique tissulaire s'obtiennent via la mesure de ces chromophores endogènes [1-2]. Dans la fenêtre visible et proche infrarouge, les molécules absorbantes contenues dans les tissus sont nombreuses (hémoglobines, cytochromes, lipides, eau, ...) [3-4]. L'accès à une information moléculaire fiable est amélioré par des approches à plusieurs longueurs d'onde [4-5].

Nous avons développé un dispositif expérimental de spectroscopie en milieu diffusant [6-7] permettant la mesure de l'absorption des tissus en fonction de la longueur d'onde sans balayage spectral. Le dispositif est fondé sur la mesure temporelle dans la fenêtre spectrale 600 nm - 800 nm d'impulsions laser blanches ultracourtes et kHz ayant traversés les tissus à analyser. Ces impulsions sont produites par génération d'un continuum de lumière blanche dans l'eau [8-11]. La transillumination de tissus épais impose une énergie par impulsion de l'ordre de quelques dizaines de  $\mu\text{J}$  sur l'ensemble du spectre d'émission. Les applications futures en tomographie multi sources et multi points de détection nécessitent plus d'énergie par impulsion. Pour ces applications, il est donc nécessaire d'optimiser le rendement énergétique et la forme spectrale de cette source dès sa génération.

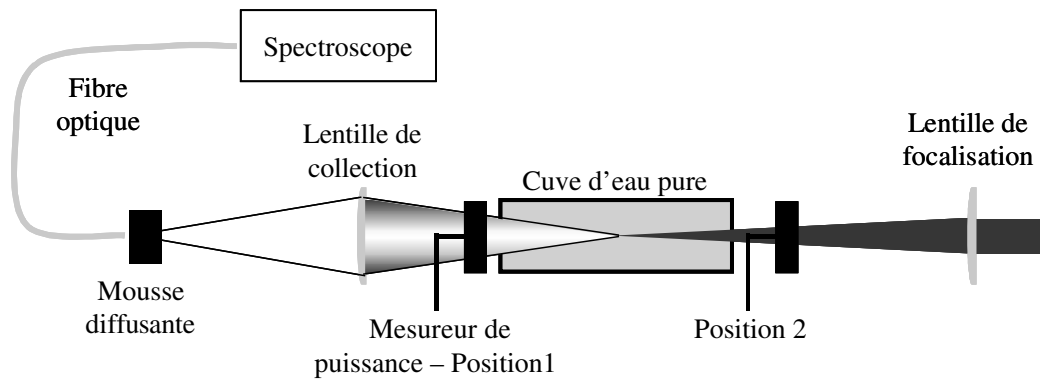
### 2. MATÉRIEL ET MÉTHODE

#### 2.1 Dispositif de génération du continuum de lumière blanche

Le système laser se compose d'un oscillateur (Coherent Vitesse XT, 830 nm, 4 nJ, 50 fs, 80 MHz) et d'un amplificateur à dérive de fréquence (BMI/Thalès Alpha 1000). En sortie de la chaîne amplifiée, les impulsions cadencées à 1 kHz ont une énergie de 500  $\mu\text{J}$  pour une largeur temporelle de 170 fs (mesurée

par autocorrélation, APE-Autocorrelator PulseCheck/PulseScope). Le continuum de lumière blanche est généré par mise en forme spatio-temporelle des impulsions dans de l'eau déminéralisée contenue dans une cuve en quartz de longueur 10 cm et de section 1,5 cm. La mise en forme doit permettre à la puissance crête de l'impulsion de dépasser le seuil en puissance de l'autofocalisation dans le milieu générateur [12]. Afin d'obtenir un bon contrôle de la puissance et du profil spectral du continuum, la mise en forme est réalisée de deux manières. La première, spatiale, consiste à réduire la section transverse de l'impulsion à l'aide d'une lentille de focalisation. Le dispositif de génération et de caractérisation du continuum est décrit figure 1. Afin de déterminer l'influence de la focalisation, deux focales ont été utilisées :  $f = 6$  cm et  $f = 30$  cm.

La mise en forme peut aussi s'effectuer de manière temporelle en modifiant la largeur à mi-hauteur de l'impulsion laser. Avec une chaîne à dérive de fréquence, ceci peut se faire simplement en changeant le taux de compression de l'impulsion par modification de la longueur du chemin optique qu'elle parcourt dans le compresseur autour de la position optimum déterminée par génération de continuum dans l'air (la puissance critique d'autofocalisation dans l'air est de 1.5 GW proche de nos puissances crêtes).



**Figure 1.** Dispositif de génération et de caractérisation du continuum de lumière blanche obtenu par focalisation du laser dans l'eau pure à l'aide d'une lentille.

## 2.2 Mesure spectrale du rendement de la source blanche

La génération du continuum dans l'eau s'effectue dans un cône divergeant avec un demi-angle d'environ  $20^\circ$  [10-13]. Lorsque l'émission est très blanche en son centre, le cône est entouré d'un anneau de lumière bleue. La lentille de collection de cette émission est une lentille de focale  $f = 4$  cm utilisée pour faire converger l'ensemble de la lumière émise vers l'entrée de la fibre optique d'un spectromètre (Ocean Optics, USB2000). Une mousse diffusante est placée à l'entrée de la fibre afin d'homogénéiser la distribution spatiale du spectre du continuum. Le spectromètre possède une résolution spectrale de 1 nm sur la fenêtre 300 nm – 1000 nm. L'acquisition du spectre est effectuée par l'accumulation de 200 mesures correspondant à un temps d'intégration de 50 ms chacune. La puissance totale de la lumière émise est mesurée à l'aide d'un mesureur de puissance classique (Coherent) à la sortie ou à l'entrée de la cuve d'eau. Lors de la mesure, on s'assure que la surface du détecteur reçoit l'ensemble de l'émission conique.

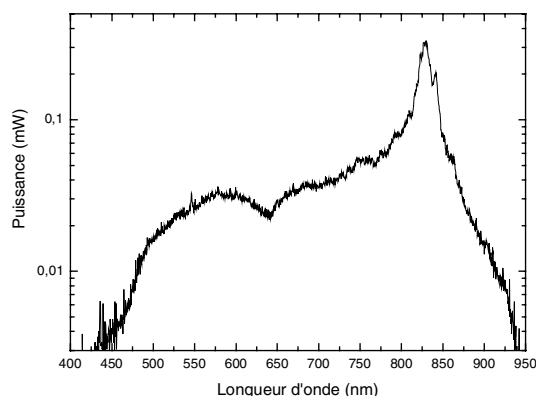
La distribution spectrale en puissance du continuum est obtenue en identifiant la puissance totale mesurée à l'intégrale du spectre mesuré. La distribution spectrale du rendement en puissance est obtenue en divisant la distribution spectrale en puissance par la puissance totale du faisceau pompe.

Afin de quantifier l'effet du confinement spatial sur la fenêtre spectrale 600 nm – 800 nm, la distribution spectrale du rendement en puissance est intégrée sur cette bande.

### 3. RÉSULTATS

#### 3.1 Spectre du continuum de lumière blanche

La distribution spectrale de la puissance du continuum généré avec une lentille de focale  $f = 6$  cm est présentée figure 2. La puissance moyenne de la source blanche est comprise entre environ 50 mW et 250 mW suivant les conditions expérimentales.



**Figure 2.** Distribution spectrale de la puissance du continuum généré avec une lentille de focale  $f = 6$  cm.

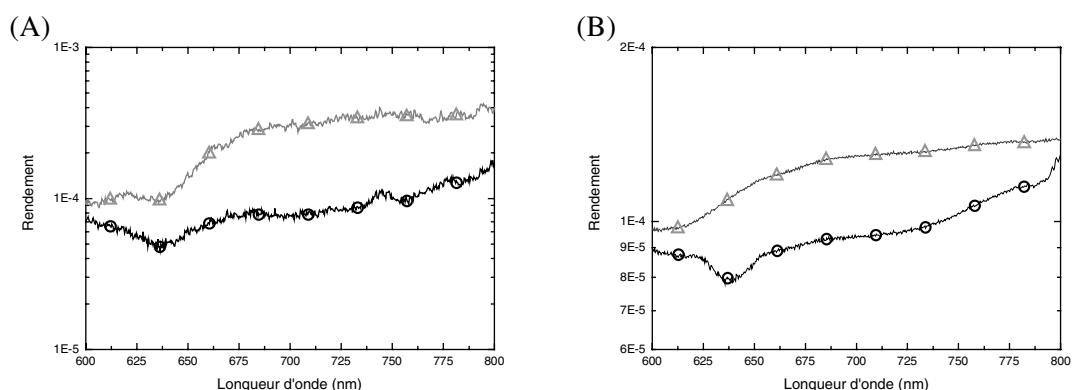
Le spectre du continuum de lumière blanche obtenu s'étend de 475 nm à 950 nm et est dissymétrique. Il présente un plateau anti-Stokes pour les longueurs d'onde inférieures à 800 nm. Un pic est visible à la longueur d'onde  $\lambda = 830$  nm. Il correspond à la longueur d'onde du faisceau laser utilisé pour générer le continuum. Une baisse locale de l'énergie lumineuse est toujours présente à  $\lambda = 640$  nm.

#### 3.2 Distribution spectrale du rendement en puissance sur la fenêtre 600 nm – 800 nm

La figure 3 montre les distributions spectrales du rendement du continuum de lumière blanche sur la fenêtre 600 nm – 800 nm. Quatre distributions sont présentées. Les deux premières (figure 3A) sont obtenues à taux de compression optimum et fixe en utilisant une lentille de focalisation de focale  $f = 6$  cm puis  $f = 30$  cm. Les deux autres (figure 3B) sont obtenues avec une lentille de focalisation de focale  $f = 6$  cm mais pour deux valeurs différentes du taux de compression de la chaîne laser.

Les résultats obtenus montrent qu'à 700 nm, le rendement mesuré est 4,3 fois meilleur en utilisant la lentille de focale  $f = 30$  cm plutôt que celle de focale  $f = 6$  cm. Il est 1,4 fois plus fort en utilisant un taux de compression non optimum pour le compresseur mais optimum sur le plan de l'émission sur la fenêtre 600 nm – 800 nm.

En intégrant la distribution spectrale du rendement sur la fenêtre spectrale 600 nm – 800 nm et avec la lentille de focale  $f = 6$  cm, 5,2 % de l'énergie du laser incident se retrouve dans cette fenêtre spectrale. Avec la focale  $f = 30$  cm et le même taux de compression on obtient 15,6 % de l'énergie. La diminution du confinement axial avec la lentille de focale  $f = 6$  cm entraîne une augmentation du rendement de 5,7 % à 7,4 % sur cette bande spectrale.



**Figure 3.** (A) Rendement du continuum de lumière blanche obtenu avec une lentille de focalisation de focale  $f = 6$  cm (courbe noire et cercles) et  $f = 30$  cm (courbe grise et triangles). Le taux de compression est fixé à l'optimum du compresseur. (B) Rendement du continuum de lumière blanche obtenu avec une lentille de focalisation  $f = 6$  cm. Deux valeurs du taux de compression sont utilisées : l'optimum pour le compresseur (courbe noire) et un plus faible, optimum sur le plan de l'émission sur la fenêtre 600-800nm (courbe grise).

#### 4. DISCUSSION

Le spectre du continuum obtenu avec la lentille de focalisation de focale  $f = 6$  cm est conforme avec ceux mesurés par d'autres auteurs dans l'eau [11-14] et dans des conditions expérimentales proches. Le spectre possède une forte dissymétrie vers les composantes anti-Stokes. Comme Arvinder et al. [14], une baisse locale d'énergie est observée dans le plateau. La longueur d'onde de coupure pour l'eau est mesurée classiquement vers 400 nm ce qui est en accord avec nos observations (figure 2).

Les résultats obtenus montrent que la mise en forme spatio-temporelle de l'impulsion pompe influence le rendement d'émission sur la bande spectrale 600 nm – 800 nm. Pour nos applications spectroscopiques, un rendement élevé et un spectre plat de la source laser blanche est nécessaire sur cette fenêtre. Notre étude énergétique indique qu'il faut utiliser des lentilles de focalisation de focale longue et un taux de compression non optimisé pour l'étage du compresseur. Dans ce cas, l'observation visuelle du continuum lors des expériences montre que l'émission conique est rouge-orangé entourée d'un anneau violet.

A notre connaissance il n'y a pas d'étude énergétique du continuum comparable dans la littérature. Des modifications très prononcées du spectre et de la puissance de la lumière émise suivant la focale ou le taux de compression utilisé ont été mesurées. La puissance crête des impulsions utilisées est environ 1000 fois supérieure à la puissance critique d'autofocalisation de l'eau à température ambiante ( $P_c = 3,77 \lambda^2 / (8 \pi n n_2) \approx 3$  MW pour un faisceau gaussien avec  $n = 1,33$  et  $n_2 = 3 \cdot 10^{-16} \text{ m.V}^{-2}$ ) [15]-[16]. Ainsi, dans ce régime, le continuum produit correspond à la superposition de très nombreux filaments possédant des histoires très variées. Ceci rend très difficile l'interprétation des observations.

#### 5. CONCLUSION

L'étude montre que la modification de la mise en forme spatio-temporelle de l'impulsion laser avant autofocalisation permet d'optimiser l'émission du continuum de lumière blanche généré dans l'eau. Cette modification peut s'effectuer en changeant la focale de la lentille de focalisation et/ou le taux de compression de l'impulsion. De plus, les résultats obtenus rendent compte d'un effet de la mise en forme de l'impulsion sur la puissance, le spectre de la lumière émise et le rendement de conversion du continuum.

## Remerciements

Les auteurs remercient le CNRS, le Ministère de la Recherche et l'Université Jean Monnet pour leur soutien financier. Nous remercions vivement Pierre Laporte et Alain Dequidt.

## Bibliographie

- [1] N. Plesnila et al. (2002), *J. Neurosci. Methods*, **114**, 107-117
- [2] J. P. Culver et al. (2003), *J. Cereb. Blood Flow Metab.*, **23**, 911-924
- [3] B. Beauvoit et al. (1995), *Anal. Biochem.*, **226**, 167-174
- [4] P. Taroni et al. (2004), *J. Biomed. Opt.*, **9**, 464-473
- [5] S. Andersson-Engels et al. (1993), *Opt. Lett.*, **18**, 1697-1699
- [6] S. Ramstein et al. (2003), *J. Phys. IV*, **108**, 127-130
- [7] P. Laporte et al. (2004), *Proc. SPIE*, **5249**, 490-500
- [8] R. R. Alfano et al. (1970), *Phys. Rev. Lett.*, **24**, 584-587
- [9] R. R. Alfano et al. (1970), *Phys. Rev. Lett.*, **24**, 592-594
- [10] R. R. Alfano (1989), *The supercontinuum laser source*, Springer-Verlag
- [11] A. Brodeur et al. (1998), *Phys. Rev. Lett.*, **80**, 4406-4409
- [12] A. Brodeur et al. (1999), *J. Opt. Soc. Am. B*, **16**, 637-650
- [13] J. M. Watson (1994), Université de Paris-Sud, Orsay
- [14] S. S. Arvinder et al. (2000), *Opt. Commun.*, **181**, 101-107
- [15] D. N. Nikogoyan (1997), *Properties of optical and laser-related materials a Handbook*, Wiley & sons
- [16] S. L. Chin et al. (1996), *Appl. Opt.*, **35**, 907-911