

Laser supercontinuum à fibre optique

Principe et applications

Supercontinuum fiber laser

Principle and Applications

par **Thibaut SYLVESTRE**

Directeur de Recherche CNRS

Institut FEMTO-ST, Université Marie et Louis Pasteur, Besançon, FRANCE

Résumé : Suscitant un intérêt croissant, les lasers supercontinuum à fibre optique allient brillance élevée et large couverture spectrale du visible à l'infrarouge. Impactant la science fondamentale et des domaines clés comme la métrologie, la spectroscopie et l'imagerie, ils bénéficient de nombreuses avancées. Cet article passe en revue les progrès depuis les années 2010, notamment l'usage de fibres optiques spéciales : fluorure, chalcogénure, tellurite et silicium pour l'infrarouge moyen, silice dopée et cœur creux pour l'ultraviolet, ainsi que les fibres à dispersion normale, essentielles à une génération ultra-stable et cohérente.

Abstract : Supercontinuum fiber lasers, with their high brightness and wide frequency range extending from visible to infrared, have garnered significant interest and have a major impact on fundamental science and numerous applications in metrology, spectroscopy, and imaging. This paper reviews recent advances in the development of supercontinuum fiber lasers based on specialty optical fibers, such as fluoride, chalcogenide, tellurite, and silicon-core fibers for the mid-infrared range, doped silica fibers, and hollow-core gas-filled fibers for the ultraviolet range, as well as all normal dispersion fibers for ultra-stable and coherent supercontinuum generation.

Mots-clés : Laser, Fibres optiques, Optique non linéaire, Supercontinuum

Keywords : Laser, Fiber Optics, Nonlinear Optics, Supercontinuum

Table des matières

1	Etude du supercontinuum	4
2	Principe physique	5
3	Supercontinuum dans le moyen-infrarouge	8
3.1	Fibres en verre fluoré et chalcogénure	8
3.2	Fibres cristallines	10
4	Supercontinuum dans l'ultraviolet	10
4.1	Fibres à cœur creux remplies de gaz	10
4.2	Fibres en verre innovantes	11
5	Supercontinuum ultra-stable à haute cohérence	11
6	Applications des lasers supercontinuum	13
7	Conclusion	14

Introduction

Depuis l'invention du laser en 1960, l'un des défis majeurs a été de développer des méthodes efficaces pour convertir la lumière laser en de nouvelles longueurs d'onde. La génération de supercontinuum (SC), observée pour la première fois en 1970 dans les matériaux massifs, puis en 1976 dans les fibres optiques, s'est rapidement imposée comme une solution à la fois élégante et performante [1]. En élargissant considérablement le spectre monochromatique des lasers tout en préservant une sortie spatialement cohérente et de haute puissance, cette nouvelle source de lumière blanche a révolutionné de nombreux domaines d'application. Les sources supercontinuum génèrent un spectre électromagnétique continu et ultra-large, s'étendant sur plusieurs octaves en fréquence, du visible à l'infrarouge, tout en restant guidées par fibre optique. Elles allient ainsi la brillance d'un laser à la vaste couverture spectrale d'une lampe, offrant un fort potentiel pour remplacer de nombreuses sources lumineuses traditionnelles utilisées en métrologie optique, spectroscopie et microscopie. Grâce à leur polyvalence, les lasers SC sont exploités dans divers domaines, notamment l'imagerie biomédicale, la tomographie par cohérence optique (OCT) [2], le traitement des matériaux, la détection optique, la spectroscopie d'absorption et la métrologie par peignes de fréquences optiques (OFC). Les atouts de la lumière supercontinuum résident non seulement dans sa brillance, supérieure de plusieurs ordres de grandeur à celle du rayonnement du corps noir, mais aussi dans ses remarquables propriétés de cohérence. Ces caractéristiques permettent l'exploitation de schémas de détection interférométriques et hétérodynes relativement simples, garantissant des performances exceptionnelles dans de nombreuses applications.

Les sources SC commerciales les plus avancées reposent principalement sur des fibres optiques microstructurées en silice [3]. Elles délivrent une puissance de plusieurs Watts sur l'ensemble de la fenêtre de transmission des fibres de silice, soit de 400 nm à 2400 nm. Aujourd'hui, une douzaine d'entreprises à travers le monde commercialisent des lasers SC, rencontrant un succès notable. Parmi ces sociétés, on peut citer LEUKOS en France et NKT Photonics au Danemark. Des sources dédiées au moyen infrarouge (MIR), basées sur des fibres en fluorure et offrant des spectres s'étendant jusqu'à 4 μm , voire 4,8 μm dans certains cas, sont également disponibles.

Cependant, de nombreuses applications émergentes nécessitent l'extension du spectre SC au-delà de l'état actuel de la technique, vers l'ultraviolet (UV), idéalement de 50 nm à 400 nm, et vers le moyen-infrarouge (MIR), de 2.5 μm à 20 μm . Il y a un besoin particulier de sources de lumière UV à large bande pour l'imagerie par fluorescence et pour des utilisations diagnostiques et thérapeutiques en médecine. Le MIR couvre la région des empreintes moléculaires et chimiques, ainsi que les fenêtres atmosphériques 3-5 μm et 8-12 μm . La couverture de cette gamme MIR est également nécessaire pour l'imagerie OCT, la détection à distance, les LIDARs, la surveillance de la pollution de l'air, et les chirurgies médicales non invasives.

Ces dix dernières années ont été marquées par des progrès significatifs dans l'amélioration continue des sources lasers SC en termes de couverture spectrale, de stabilité, de bruit, de densité de puissance et de robustesse. Des développements importants ont été réalisés pour atteindre les gammes de longueurs d'onde UV et MIR ciblées. Les lasers SC ont considérablement évolué pour devenir une technologie véritablement révolutionnaire capable de relever divers défis sociétaux et industriels. L'une des raisons clés de ces avancées a été le développement de nouvelles classes de fibres optiques spéciales, et cet article a pour but de présenter une revue de ces travaux.

L'article est structuré comme suit : la section 1 présente un tour d'horizon des différentes technologies de fibres optiques et des bandes spectrales couvertes par les sources SC. La section 2 introduit la physique de la génération de SC et donne un aperçu des différentes approches utilisées pour la génération de SC par fibre. Dans la section 3, nous passons en revue les résultats depuis 2010 de la génération de SC dans le MIR à l'aide de fibres de verres fluorés et chalcogénures. Nous décrivons spécifiquement les travaux sur le développement de sources compactes et fiables de SC MIR basées sur des systèmes de fibres en cascade. Dans la section 4, nous présentons les différentes fibres optiques utilisées pour la génération de SC dans l'UV, notamment les fibres à cœur creux remplies de gaz et les fibres de silice de qualité UV. La section 5 met en avant les progrès depuis 2015 dans le développement de sources SC à faible bruit et haute cohérence basées sur des fibres à dispersion entièrement normale (ANDi). Enfin, la section 6 offre un aperçu rapide des principales applications des sources SC.

1 Etude du supercontinuum

Pour introduire les thèmes explorés dans cette revue, il est utile de commencer par un aperçu des différentes largeurs de bande SC rapportées dans la littérature [4], obtenues grâce à divers types de fibres optiques. La Figure 1 présente un panorama de la couverture spectrale des SC générés par fibre, allant de 0.1 μm dans l'UV à 20 μm dans le MIR. Cette étude inclut des sources SC basées sur des fibres en silice, couvrant de 400 nm à 2,4 μm , des fibres de silice de qualité UV (fortement dopées en OH) permettant une extension dans l'UV jusqu'à 300 nm, ainsi que des fibres de silice dopées au germanium (GeO_2), s'étendant dans l'IR jusqu'à 3,2 μm . La figure met également en évidence les largeurs de bande de SC obtenues à partir de fibres d'oxyde de métaux lourds (HMO), de fibres de verre fluoré (ZBLAN) jusqu'à 4,8 μm , de fibres de verre chalcogénure allant jusqu'à 18 μm , ainsi que de fibres à cœur liquide et à cœur creux remplies de gaz pour l'UV. Les encarts présentent des images en microscopie électronique à balayage (MEB) de diverses fibres utilisées pour la génération de SC, incluant (à gauche) des fibres microstructurées et à cœur suspendu, (en haut à droite) des fibres anti-résonantes à cœur creux (HC-ARF) et à bande interdite photonique (PBG), ainsi qu'en bas à droite, des fibres ZBLAN, en oxyde de métaux lourds, et en chalcogénure. L'objectif ultime est d'atteindre une couverture complète du spectre d'émission des synchrotrons, représenté en vert clair sur la Figure 1.

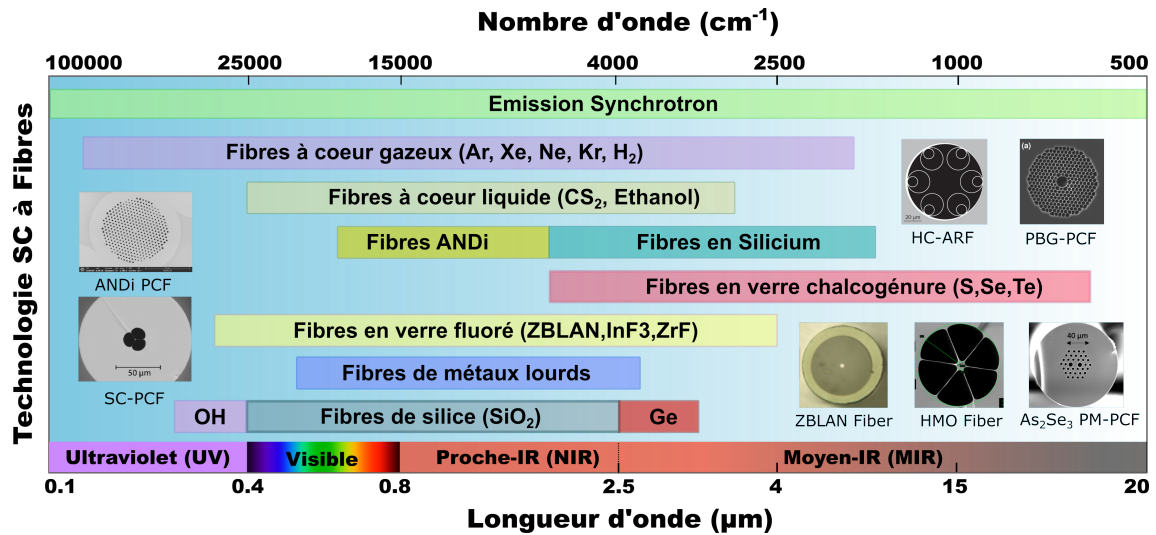


Figure 1 – Panorama des bandes passantes des sources supercontinuum (SC) dans diverses fibres optiques, couvrant de l’ultraviolet (UV) au moyen infrarouge (MIR). Les encadrés présentent quelques exemples de fibres utilisées, notamment : (à gauche) la fibre PCF silice à dispersion normale (ANDi) et la fibre PCF à coeur suspendu ; (en haut à droite) la fibre anti-résonante à coeur creux (HC-ARF) et la fibre à bande interdite photonique (PBG-PCF) ; (en bas à droite) la fibre à saut d’indice en verre fluoré (ZBLAN), la fibre PCF à oxyde de métal lourd (HMO-PCF), et la fibre PCF à maintien de polarisation (PM) en chalcogénure (As_2Se_3). (Source : laboratoire FEMTO-ST, CNRS, Université Marie et Louis Pasteur, Besançon)

- Les sources supercontinuum génèrent un rayonnement électromagnétique alliant la brillance d’un laser à la couverture spectrale d’une lampe.
- Grâce à cette combinaison unique, ils peuvent remplacer la majorité des sources lumineuses conventionnelles utilisées en métrologie optique, spectroscopie et microscopie.
- Les développements depuis 2010 de nouvelles fibres optiques ont permis d’améliorer les capacités de génération de supercontinuum.
- Grâce à ces progrès, la couverture spectrale du supercontinuum s’étend désormais de l’ultraviolet (0,1 μm) au moyen infrarouge (18 μm).

2 Principe physique

De nombreuses expériences ont été réalisées pour contrôler et exploiter l’élargissement spectral des impulsions laser dans les fibres optiques [5, 6]. Toutefois, c’est l’apparition des fibres microstructurées, ou à cristal photonique (PCF), au milieu des années 90 qui a véritablement révolutionné la génération de SC à large bande spectrale, couvrant plusieurs octaves dans le visible et l’infrarouge proche [3, 7, 8]. En effet, les PCF ont apporté un ajustement précis de la dispersion de la fibre tout en optimisant leur efficacité non linéaire, ce qui a permis de générer des spectres s’étendant sur l’intégralité de la fenêtre de transmission des fibres de silice, de 400 nm à 2400 nm. Cela a ainsi ouvert la voie à des applications dépassant le cadre du laboratoire. Une illustration de la brillance de ces lasers "blancs" à fibre est présentée à la Figure 2. Un des facteurs clés du succès des fibres PCF a été la capacité à faire correspondre la longueur d’onde de dispersion nulle de la fibre avec celle des systèmes laser femtosecondes disponibles, facilitant ainsi les dynamiques solitoniques responsables de l’élargissement spectral des impulsions lasers [9]. Les solitons temporels sont des impulsions optiques brèves remarquablement stables, résultant d’un équilibre précis entre la dispersion et l’automodulation de phase (SPM) [10]. Leur excitation nécessite l’injection d’impulsions laser dans le régime de

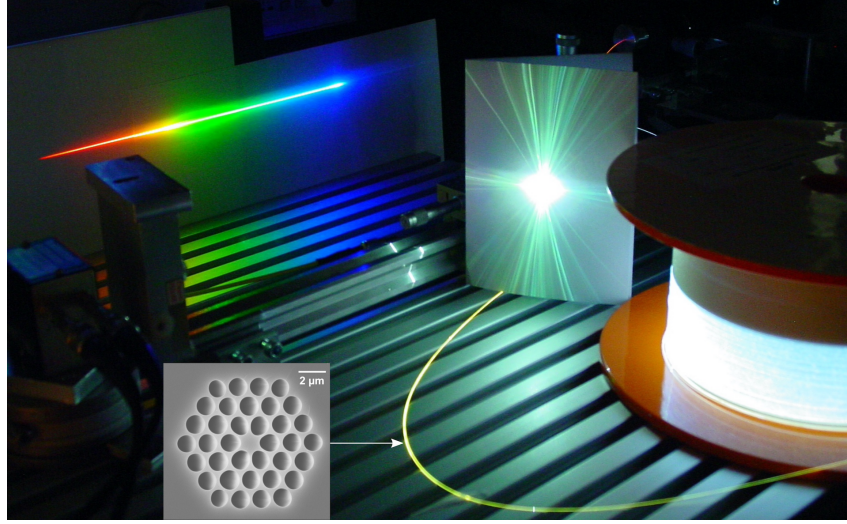


Figure 2 – Illustration de la génération de supercontinuum dans une fibre optique microstructurée de silice, pompée par un laser Ti :Saphire femtoseconde à 800 nm, en régime de dispersion anormale. (Source : laboratoire FEMTO-ST, CNRS, Université Marie et Louis Pasteur, Besançon)

dispersion anormale d'une fibre optique. Dans ce régime, l'impulsion d'entrée subit d'abord une forte compression, suivie d'une fission en plusieurs solitons fondamentaux. La dynamique de ces solitons est perturbée par la dispersion d'ordre supérieur et la diffusion Raman stimulée (SRS), ce qui entraîne l'émission d'ondes dispersives (DW), également appelées radiations résonantes ou de type Cherenkov, dans le domaine visible, ainsi qu'un décalage de fréquence propre des solitons (SSFS) vers l'infrarouge [9].

Une simulation numérique de la génération de SC par solitons est présentée dans la Figure 3(a), montrant l'évolution spectrale typique d'une impulsion de forme sécante hyperbolique de durée 100 fs à la longueur d'onde de 1040 nm, dans le régime de dispersion anormale d'un fibre optique monomode. La simulation repose sur l'équation de Schrödinger non linéaire généralisée (GNLSE), résolue par la méthode de Fourier itérative, en utilisant les paramètres spécifiés dans la légende de la Figure 3. Cette équation est formulée comme suit [9, 11].

$$(1) \quad \frac{\partial A}{\partial z} + \frac{\alpha(\omega)}{2} A - \sum_{n \geq 2} \frac{i^{n+1}}{n!} \beta_n \frac{\partial^n A}{\partial T^n} = i\gamma(1 + i\tau_0 \frac{\partial}{\partial T}) \left(A \int_{-\infty}^{\infty} R(T') |A(z, T - T')|^2 dT' \right),$$

Où $A(z, T)$ est l'amplitude complexe du champ électrique se propageant dans la direction z et dans le référentiel de vitesse de groupe de l'impulsion laser. $\alpha(\omega)$ représente l'atténuation dépendante de la fréquence, β_n est la n^{th} dérivée de la constante de propagation. Le coefficient non linéaire Kerr $\gamma = 2\pi n_2 / (\lambda_0 A_{eff})$ est obtenu à partir de l'indice non linéaire du verre de silice $n_2 = 2.5 \times 10^{-20} m^2/W$, A_{eff} représente l'aire effective du mode fondamental [11]. La dérivée temporelle de l'enveloppe du champ à droite de l'équation (1) correspond à l'effet d'auto-raïdissement avec son échelle de temps caractéristique $\tau_0 = 1/\omega_0$ ($\omega_0/2\pi$ étant la fréquence porteuse de l'impulsion). $R(T) = (1 - f_R)\delta(T) + f_R h_R(T)$ est la réponse non linéaire globale, où $h_R(T)$ est la susceptibilité Raman retardée de la silice [11], et f_R la contribution fractionnelle de l'effet Raman à l'effet Kerr, ici considérée comme $f_R=0,18$.

L'élargissement spectral de l'impulsion laser est principalement dicté par le profil de dispersion de la fibre. Ainsi, une large gamme de fibres microstructurées a été développée pour adapter la dispersion nulle à différentes longueurs d'onde de pompage, notamment autour de 800 nm (Laser Ti :Sa), 1030 nm (Ytterbium), 1064 nm (Nd :YAG), 1550 nm (Erbium), 2 μm (Thulium)

et au-delà. Parallèlement, des efforts significatifs ont été consacrés à la conception de fibre à double zéro de dispersion, optimisés pour générer deux ondes dispersives [12].

Bien que la génération de SC basée sur les solitons soit reconnue pour produire les spectres les plus larges avec des seuils de puissance relativement bas, la génération de SC dans des fibres à dispersion entièrement normale (ANDi) constitue une alternative prometteuse, car elle permet de générer des spectres SC à la fois uniformes et stables [13, 14]. La Figure 3(b) illustre ce régime spécifique, qui repose sur d'autres effets non linéaires que les solitons, notamment l'auto-modulation de phase (SPM) et la rupture d'onde optique (OWB). Ces deux mécanismes cohérents contribuent conjointement à l'élargissement spectral du laser, générant des spectres plats et hautement cohérents, particulièrement adaptés aux applications exigeant une grande stabilité spectro-temporelle. De plus, l'intégrité de l'impulsion est préservée, comme l'illustre la Figure 3(b). La dérive de fréquence ("chirp") induite peut être également compensée à l'aide de réseaux, permettant ainsi de comprimer l'impulsion laser jusqu'à quelques femtosecondes.

La génération de SC a été également observée pour différentes durées d'impulsions laser : femtosecondes, picosecondes, nanosecondes et même en régime continu (CW) [4]. Dans ces cas des impulsions de longue durée, des phénomènes comme l'instabilité de modulation (MI) et la diffusion Raman stimulée en cascade (CRS) influencent la dynamique du SC. Dans les fibres multimodes ou biréfringentes, des processus de mélange à quatre ondes vectoriels ou intermodaux peuvent également générer de nouvelles bandes spectrales paramétriques et étendre le spectre du laser. Enfin, de nouvelles approches émergent, notamment dans les fibres multimodes à gradient d'indice (GRIN), où l'auto-imagerie du faisceau laser conduit à un SC large bande, ainsi que dans les fibres à cœur liquide (LiCOF), exploitant la non-linéarité spécifique des liquides non linéaires pour produire un SC hautement cohérent [15].

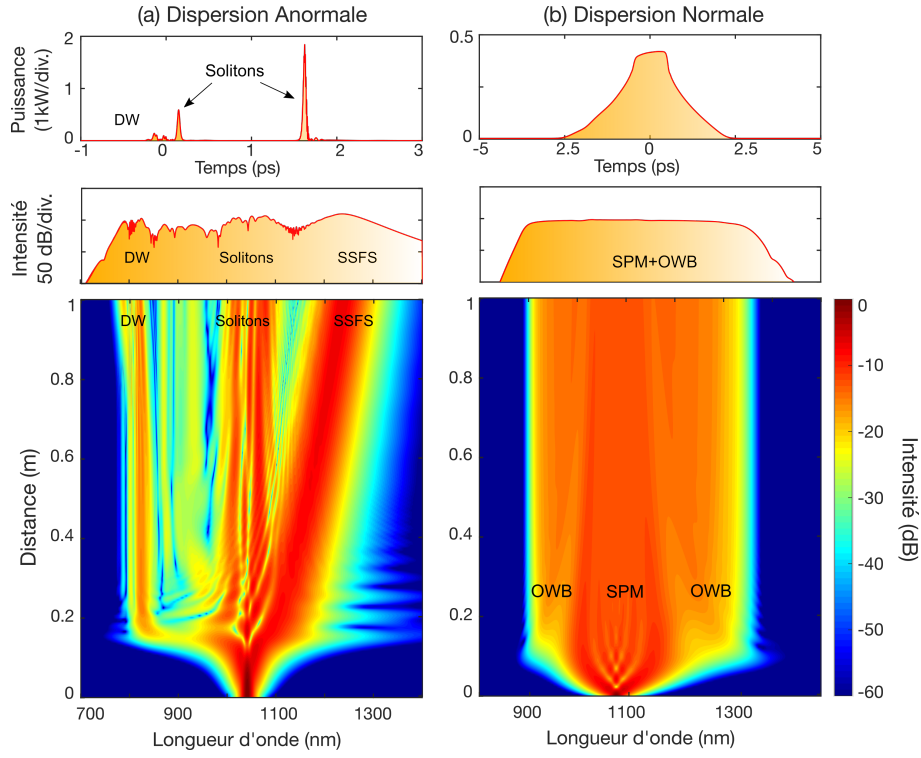


Figure 3 – Simulations numériques basées sur l'équation de Schrödinger non linéaire généralisée de la génération de SC en régime de dispersion (a) anormale ($\beta_2 < 0$) et (b) normale ($\beta_2 > 0$), en fonction de la distance de propagation dans la fibre optique. Les paramètres d'entrée sont : durée d'impulsion de 100 fs à 1040 nm avec une puissance crête de 1 kW, $\gamma = 27 W^{-1} km^{-1}$, et $\beta_2 = -5 ps^2.km^{-1}$ et $\beta_3 = 0,04 ps^3.km^{-1}$ pour (a) et avec une puissance de crête de 7 kW, $\beta_2 = 5,27 ps^2.km^{-1}$ et $\beta_4 = 2.10^{-4} ps^4.km^{-1}$ pour (b). (Source : laboratoire FEMTO-ST, CNRS, Université Marie et Louis Pasteur, Besançon)

- La génération de supercontinuum dans les fibres optiques repose principalement sur les nonlinéarités du troisième ordre des verres.
- Les effets Kerr (réponse électronique) et Raman (réponse moléculaire) sont les principaux mécanismes impliqués.
- Le profil de dispersion de la fibre influence de manière significative l'évolution spectrale du laser.

3 Supercontinuum dans le moyen-infrarouge

3.1 Fibres en verre fluoré et chalcogénure

Les recherches sur la génération de supercontinuum (SC) dans le moyen infrarouge (MIR) ont connu un essor considérable grâce aux progrès des fibres en verres spéciaux et en semi-conducteurs cristallins [16]. Ce domaine reste très actif en raison de ses applications potentielles en spectroscopie moléculaire, en tomographie par cohérence optique (OCT), en traitement des matériaux et en détection optique. Le développement des sources SC dans le MIR présente plusieurs défis, notamment l'utilisation de verres non silicatés, les techniques de fabrication complexes et les longueurs d'onde de pompage spécifiques. Parmi les fibres infrarouges, celles en verre de chalcogénure (contenant du soufre, du sélénium ou du tellure) se distinguent par leur large fenêtre de transmission jusqu'à 20 μm dans le MIR, leur dispersion ajustable et leur non-linéarité bien supérieure à celle des fibres en silice ou en fluorure de zirconium (ZBLAN). Parmi les matériaux utilisés, on retrouve les verres chalcogénures (As_2S_3 , As_2Se_3 , $GeAsSe$), les

tellurites (TeO_2), les chalcogénures (Ge-Te-AgI), les oxydes lourds ($\text{PbO-Bi}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-CdO}$) et les fluorures (ZBLAN, InF_3 , ZrF_4). Les expériences récentes ont permis d'obtenir des spectres SC très étendus dans le MIR, notamment avec des fibres en As_2Se_3 ou en Ge-Se-Te , couvrant de $1,7\text{ }\mu\text{m}$ à $18\text{ }\mu\text{m}$ [17], ainsi que des systèmes entièrement fibrés générant plusieurs centaines de milliwatts.

La génération de SC dans ces fibres peut être réalisée par pompage direct — impliquant des sources laser infrarouges coûteuses et encombrantes — ou par pompage en cascade — une alternative plus compacte et pratique exploitant des lasers à fibre à $1,55\text{ }\mu\text{m}$. Cette dernière approche permet un décalage progressif du spectre vers le MIR en combinant des fibres en silice et en verres infrarouges, favorisant ainsi un élargissement spectral. Parmi les systèmes MIR SC en fibre à cascade les plus avancés, nous avons démontré en 2020, avec les sociétés LEUKOS, SelenOptics et Le verre Fluoré, une source laser SC couvrant une large bande spectrale de $2\text{ à }10\text{ }\mu\text{m}$ au sein d'un système de fibres en cascade à base de silice, de ZBLAN et de chalcogénure [18]. Le montage expérimental de cette source SC MIR est schématisé sur la Fig. 4(a). Une fibre ZBLAN de 25 m de long a été directement pompée à $1,55\text{ }\mu\text{m}$ par un laser à fibre pulsé commercial de 460 ps de durée, sans amplification intermédiaire. Cette fibre a généré un premier SC s'étendant de $0,7\text{ à }4,1\text{ }\mu\text{m}$ (Fig. 4(b)). Ce spectre SC a ensuite été filtré à $1,9\text{ }\mu\text{m}$ à l'aide d'un filtre passe-bas en germanium, afin d'éviter l'absorption non linéaire dans la fibre suivante. Il a ensuite été injecté dans une fibre microstructurée en chalcogénure ($\text{As}_{38}\text{Se}_{62}$) de 9 m de long, produisant un ainsi spectre SC de $2\text{ à }10\text{ }\mu\text{m}$ (voir Fig. 4(c)), avec une puissance de sortie moyenne de 16 mW [18]. Cette technique a ouvert la voie à des sources SC à large bande, pratiques et robustes, ne nécessitant ni source de pompage dans le moyen infrarouge ni amplificateurs à fibre dopée.

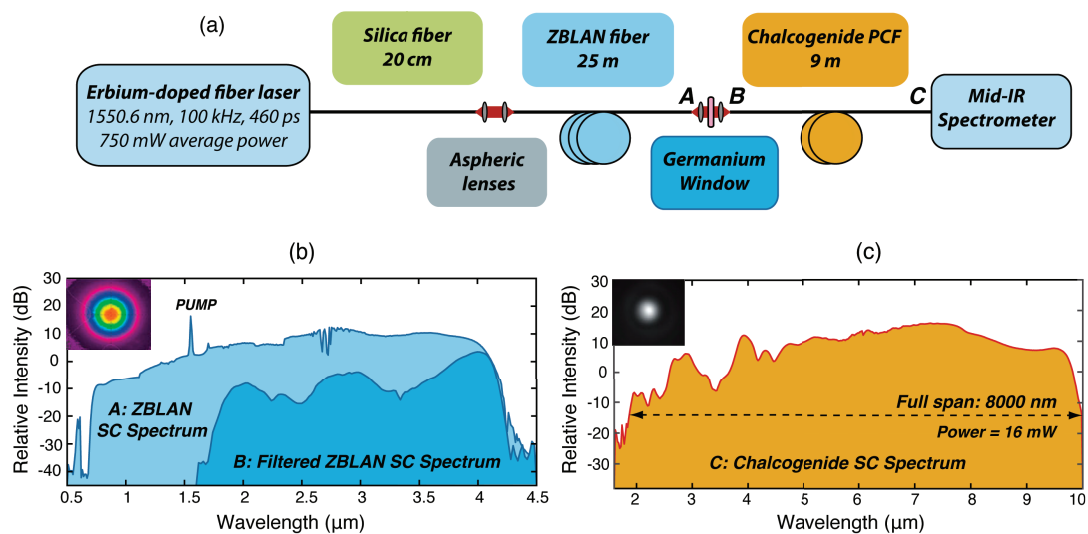


Figure 4 – (a) Schéma du montage expérimental pour la génération de SC dans le moyen infrarouge dans un système de fibres optiques en cascade silice-ZBLAN-chalcogénure. (b) Spectres expérimentaux de SC à la sortie de la fibre ZBLAN (bleu clair) et après le filtre passe-bas en germanium (bleu foncé). (c) Spectre expérimental de SC à la sortie de la fibre en chalcogénure (jaune). Les encarts montrent les profils de mode optique à la sortie des fibres optiques ZBLAN (b) et chalcogénure (c). Extrait de la référence [18]. (Source : laboratoire FEMTO-ST, CNRS, Université Marie et Louis Pasteur, Besançon)

3.2 Fibres cristallines

Récemment, des fibres avec un cœur cristallin en silicium ont émergé pour des applications non linéaires [19]. Ces fibres, gainées de silice, offrent une robustesse mécanique tout en présentant un indice de réfraction non linéaire élevé et un confinement optique efficace. Comparées aux fibres en verre de chalcogénure, elles permettent un meilleur contrôle de la dispersion et des pertes réduites dans le MIR. Une expérience notable a démontré un SC allant de 1,6 μm à 5,3 μm dans une fibre à cœur Si effilée, pompée à 3 μm avec des impulsions femtosecondes [19].

- La génération de supercontinuum dans le moyen infrarouge (de 2 à 20 μm) a considérablement progressé.
- Les fibres de verres fluorés et chalcogénures ont joué un rôle clé dans cette avancée.
- Ces fibres offrent des sources compactes et de haute performance adaptées à de nombreuses applications scientifiques et industrielles.

4 Supercontinuum dans l'ultraviolet

Un défi majeur dans la génération de SC est l'extension du spectre d'émission non seulement vers le moyen infrarouge (MIR), mais aussi vers la gamme des longueurs d'onde UV de 100 nm à 400 nm [20, 21]. Il existe un besoin particulier de sources SC UV pour des applications comme la microscopie à fluorescence, où elles permettent l'excitation cohérente simultanée de protéines fluorescentes [22]. Cependant, la génération de SC dans l'UV dans des fibres standards de silice présente un défi en raison de plusieurs limitations, notamment l'absorption intrinsèquement élevée du verre, le phénomène de photo-noircissement induit par les radiations UV et la forte dispersion normale. Des progrès ont été réalisés en amincissant les fibres à cœur photonique (PCF) par fusion et étirage, ce qui a permis d'étendre le spectre du SC en dessous de 400 nm. Cependant, cette approche reste limitée, atteignant une extension spectrale minimale d'environ 320 nm [4]. Ces défis soulignent la nécessité d'explorer de nouveaux matériaux et géométries de fibres pour surmonter les limitations actuelles et ouvrir la voie à une génération UV efficace et étendue pour des applications de pointe.

4.1 Fibres à cœur creux remplies de gaz

L'utilisation des fibres à cœur creux remplies de gaz pour la génération de SC, notamment dans l'UV, a connu un essor significatif au cours de la dernière décennie [23]. Cette approche offre plusieurs avantages majeurs. Tout d'abord, les gaz utilisés (Ar, Xe, He, Ne, Kr, H_2) sont transparents du proche UV (VUV) à l'infrarouge moyen, permettant un guidage optique bien au-delà des capacités des fibres à cœur solide. Ce guidage a été démontré avec des fibres anti-résonantes de type "revolver" [23], où la lumière est intégralement confinée dans le cœur creux de la fibre, étendant les fenêtres de transmission bien au-delà de celles imposées par le verre de la fibre. Ensuite, les gaz supportent des intensités beaucoup plus élevées que les verres et se régénèrent après ionisation, évitant ainsi les dommages permanents. Cette propriété permet la génération de SC à très haute intensité, essentielle pour des applications ultra-rapides nécessitant des énergies élevées en un seul tir laser. De plus, les gaz présentent des non-linéarités ajustables distinctes de celles des fibres solides. Les gaz nobles sont exempts de diffusion Raman, mais leur ionisation et dynamique plasma induisent de nouveaux régimes solitoniques. En revanche, les gaz moléculaires possèdent une diffusion Raman avec des décalages de fréquence plus importants et des largeurs de ligne plus étroites qu'en milieu vitreux. La dispersion et la non-linéarité peuvent également être ajustées via la pression ou le mélange gazeux, offrant une

grande flexibilité dans le contrôle des dynamiques SC.

Les premières études ont démontré l'émission d'ondes dispersives dans l'UV jusqu'à 113 nm en utilisant des fibres à cœur creux (30 μm de diamètre), remplies d'hydrogène ou d'hélium et pompées par des impulsions de 30 fs à 800 nm. Avec des impulsions plus longues (500 fs), la génération de SC basée sur l'instabilité de modulation a été observée dans le visible et l'IR. Les dernières avancées incluent l'emploi de fibres anti-résonantes pour une génération SC optimisée, de fibres creuses effilées pour améliorer la conversion UV, et l'exploitation d'un peigne de fréquence Raman transformé en SC UV profond [4].

Toutefois, ces fibres présentent des limitations : Incompatibilité avec la technologie des fibres standards, nécessitant des systèmes spécifiques de gaz et de vide ; Coût élevé des lasers de pompe à haute puissance ; Disponibilité commerciale limitée, rendant leur adoption plus complexe. Malgré ces contraintes, les fibres creuses remplies de gaz ouvrent de nouvelles perspectives pour la génération de SC à très large bande, avec des performances inaccessibles aux fibres solides.

4.2 Fibres en verre innovantes

Bien que ces résultats démontrent un fort potentiel, la compatibilité avec la plateforme en silice, omniprésente en photonique, demeure un défi. D'où l'intérêt croissant pour la génération de lumière UV à l'aide de verres modifiés, plus résistants aux UV. Des avancées significatives ont permis la fabrication de fibres en silice de grade UV, spécialement conçues pour résister à la solarisation et au photo-noircissement, tout en offrant de faibles pertes grâce à une teneur élevée en ions OH^- . Ces fibres permettent désormais la génération de supercontinuum UV dans la région de la lumière noire (300-400 nm) et dans le visible [24]. Une alternative prometteuse réside dans l'utilisation de fibres optiques en verre fluoré ZBLAN, qui présentent une excellente transmission jusqu'à 200 nm, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives pour l'extension du supercontinuum dans l'UV.

- Les sources supercontinuum (SC) dans l'ultraviolet sont un domaine exploratoire en plein développement.
- Elles reposent principalement sur les fibres à cœur creux remplies de gaz.
- Ces fibres permettent d'atteindre des longueurs d'onde aussi courtes que 113 nm.

5 Supercontinuum ultra-stable à haute cohérence

Un inconvénient majeur de la génération de SC par solitons sous dispersion anormale est la faible cohérence temporelle, due au bruit induit par l'instabilité de modulation et la diffusion Raman [6]. En alternative, l'injection d'impulsions femtosecondes dans des fibres PCF à dispersion normale (ANDi) a été explorée [13]. Dans ce régime, l'élargissement spectral est exclusivement gouverné par l'auto-modulation de phase (SPM) et la rupture d'onde optique (OWB) (voir Fig. 3.(b)), deux effets intrinsèquement cohérents. Bien que ce concept ait plus de dix ans, la demande croissante en sources SC à faible bruit a ravivé l'intérêt pour les fibres ANDi, qui permettent une suppression efficace du bruit tout en conservant la cohérence initial du laser de pompe. Les performances exceptionnelles des SC générés dans les fibres ANDi, notamment en termes de cohérence et de faible bruit, ont été confirmées par diverses techniques : mesures du bruit relatif d'intensité (RIN), interférométrie de Michelson, transformation de Fourier dispersive et battement RF avec des diodes laser stabilisées. Cependant, la conception d'une fibre ANDi ne garantit pas systématiquement un SC cohérent. La compétition entre

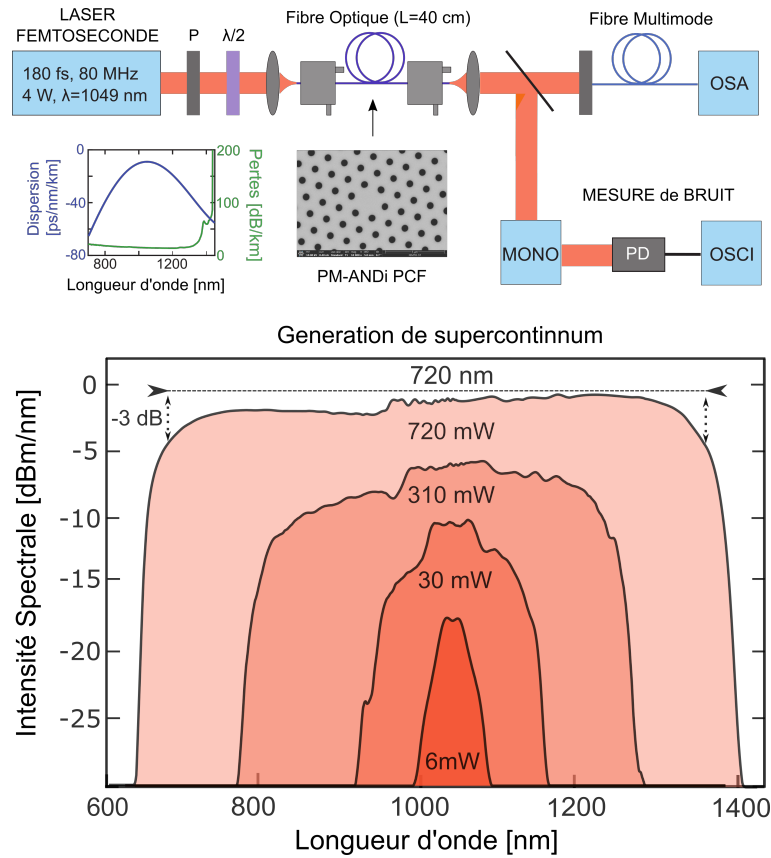


Figure 5 – (a) Configuration expérimentale pour la génération de supercontinuum (SC) à très faible bruit dans une fibre PM-ANDi PCF, comprenant un laser à verrouillage de mode femtoseconde à ytterbium (ORIGAMI 10 HP), un filtre à densité neutre variable (ND), une lame demi-onde (HWP), des lentilles asphériques (AL), des supports de translation 3D (S), 2 m de fibre PM-ANDi PCF, un miroir basculant (FM), une sphère d'intégration (IS), 2 m de fibre multimode (MM), un analyseur de spectre optique (OSA), un monochromateur (MONO), une photodiode (PD) et un oscilloscope (OSCI). L'encadré montre la dispersion de la fibre et son spectre d'atténuation. (b) Spectres SC expérimentaux à la sortie de la fibre PM-ANDi PCF pour une puissance de sortie moyenne de 6 mW à 720 mW avec un faisceau d'entrée polarisé le long de l'axe rapide de la fibre. (Source : laboratoire FEMTO-ST, CNRS, Université Marie et Louis Pasteur, Besançon)

dynamiques non linéaires cohérentes et incohérentes définit un seuil critique, déterminé par la durée d'impulsion T_{crit} ou le nombre de solitons N_{crit} , au-delà duquel la cohérence se dégrade. Pour des durées d'impulsion supérieures à 1 ps, la diffusion Raman stimulée (SRS) et le mélange à quatre ondes (FWM) altèrent la cohérence du SC. Néanmoins, les fibres ANDi présentent des seuils critiques bien plus élevés que celles à dispersion anormale, avec un T_{crit} environ 10 fois plus grand et un N_{crit} 50 fois plus élevé pour des spectres couvrant une octave.

La Fig. 5 présente des mesures récentes de la génération de supercontinuum (SC) dans une fibre ANDi à maintien de polarisation, pompée par des impulsions de 180 fs à 1049 nm [14]. À une puissance de pompe élevée, l'action combinée de effets non linéaires aboutit à un spectre SC remarquablement plat couvrant la plage de 670 à 1390 nm. Le SC présente une densité de puissance spectrale élevée allant jusqu'à 0,4 mW/nm, un rapport d'extinction de polarisation de 17 dB, un bruit d'intensité de seulement 0,54 %, ainsi qu'une dérive de fréquence quasi-linéaire idéale pour la compression d'impulsion.

- Développement de sources supercontinuum à faible bruit et haute cohérence
- basées sur des fibres à dispersion entièrement normale
- Nombreuses applications en métrologie et imagerie

6 Applications des lasers supercontinuum

La figure 6 offre un aperçu des domaines d'application des lasers supercontinuum. Ces sources sont particulièrement prisées dans les domaines nécessitant une large bande passante optique tout en maintenant une cohérence spatiale élevée, permettant ainsi une collimation et une focalisation précises malgré les aberrations chromatiques [4]. Par exemple, elles sont couramment utilisées en spectroscopie avec un monochromateur comme source de lumière accordable. Comparées aux lasers accordables, les lasers supercontinuum offrent une couverture spectrale beaucoup plus large, bien que leur densité spectrale de puissance soit généralement plus faible, ce qui se traduit par une puissance réduite, en particulier lorsqu'un monochromateur à bande étroite est utilisé.

Ces sources présentent un potentiel significatif pour remplacer les sources lumineuses traditionnelles en métrologie optique, spectroscopie, microscopie. Elles trouvent des applications dans des domaines variés, tels que l'imagerie biomédicale [25], la tomographie par cohérence optique (OCT) [2], le traitement des matériaux, la détection optique par LIDAR, la spectroscopie d'absorption, les télécommunications, ainsi que la métrologie par peignes de fréquences optiques (OFC) [26].

De plus, les sources SC sont utilisées dans des applications comme la microscopie de fluorescence, la microscopie CARS (Coherent Anti-Stokes Raman Scattering) en biologie, la cytométrie en flux, la caractérisation de dispositifs optiques, la génération d'ondes porteuses multiples dans les systèmes de communication par fibre optique. Elles ont permis des avancées considérables en imagerie, notamment en termes de résolution spatiale, de sensibilité et de dynamique.

Ces sources sont également utilisées pour alimenter des amplificateurs et oscillateurs ultra-rapides femtosecondes, tels que les amplificateurs paramétriques optiques. Une large bande passante d'entrée est cruciale pour injecter le signal tout en maintenant une grande cohérence. Les sources de supercontinuum stables et cohérentes générées dans des fibres optiques à dispersion entièrement normale, via la modulation de phase auto-induite (SPM) et le brisement d'onde optique (OWB), sont particulièrement adaptées pour préserver la cohérence et la stabilité des impulsions générées. La génération de supercontinuum joue un rôle essentiel dans la physique des lasers femtosecondes à stabilisation de phase, en particulier pour la détection et la stabilisation de la fréquence de décalage de l'enveloppe porteuse, un élément clé de la métrologie des fréquences optiques. En outre, les sources SC à dispersion normale (ANDi) présentent un bruit de source très faible, ouvrant la voie à de nombreuses applications avancées en imagerie, en métrologie, et en photonique ultra-rapide. Par exemple, en microscopie hyperspectrale Raman, leur faible bruit permet une imagerie rapide et efficace, surpassant les lasers accordables. De même, en microscopie à champ proche à balayage spectral (SNOM), où les sources SC classiques sont trop bruyantes, le SC ANDi offre une haute résolution spatiale pour l'étude des interactions lumière-matière. Elles servent également en communication optique et en photonique quantique. En imagerie OCT, l'utilisation du SC ANDi a marqué un tournant en éliminant la limitation liée au bruit du SC, améliorant ainsi le contraste, la pénétration et la vitesse d'acquisition pour des applications médicales, telles que la détection précoce du cancer de la peau. En microscopie multiphotonique et cohérente (CARS), le SC ANDi permet de

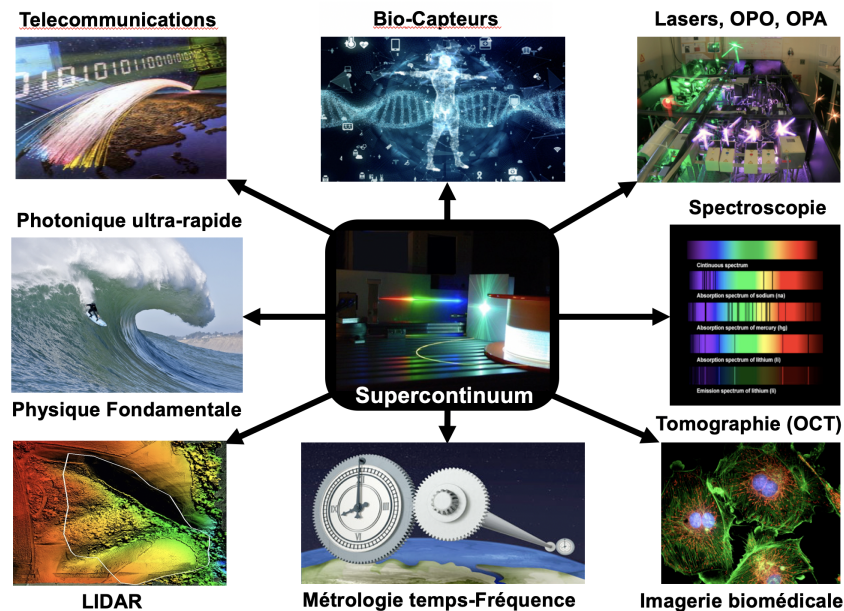


Figure 6 – Domaines d'application des sources lasers supercontinuum. (Source : laboratoire FEMTO-ST, CNRS, Université Marie et Louis Pasteur, Besançon)

générer des impulsions ultra-courtes et cohérentes, optimisant le rapport signal sur bruit et la résolution. Son couplage avec un modulateur spatial de lumière améliore encore le contrôle de la réponse non linéaire des échantillons, facilitant le développement de plateformes d'imagerie multimodale pour des applications biomédicales avancées.

Enfin, dans le domaine des lasers ultra-rapides, le SC joue un rôle clé dans l'amorçage des amplificateurs paramétriques optiques (OPA) [27], favorisant une grande accordabilité en longueur d'onde, la génération d'impulsions attosecondes cohérentes et de rayonnement XUV. Il améliore également la stabilité des amplificateurs à fibre opérant à $2\ \mu\text{m}$, ouvrant la voie à des avancées en métrologie de fréquence et en conversion non linéaire pour l'exploration du moyen infrarouge.

Les lasers supercontinuum sont essentiels dans diverses applications telles que :

- La spectroscopie,
- L'imagerie biomédicale,
- La tomographie par cohérence optique (OCT).
- Les télécommunications optiques,
- La métrologie optique,

7 Conclusion

Les travaux présentés dans cet article illustrent le dynamisme de la recherche sur la génération de supercontinuum (SC) dans les fibres optiques. Nous avons exploré les défis récents liés à l'extension des sources SC vers l'ultraviolet (UV) et le moyen-infrarouge (MIR), mettant en lumière des avancées majeures en imagerie biomédicale et spectroscopie moléculaire. La génération SC dans le MIR a particulièrement progressé, donnant naissance à des systèmes compacts et fiables basés sur des fibres fluorures-chalcogénures en cascade, capables de délivrer plusieurs watts entre 2 et $10\ \mu\text{m}$. De nouvelles perspectives émergent au-delà de $10\ \mu\text{m}$, notamment avec les fibres en verre de tellure. Tandis que les sources SC MIR gagnent en maturité, celles dédiées à l'UV restent en développement. Les fibres en silice optimisées pour

l'UV montrent un potentiel prometteur malgré des pertes encore élevées, tandis que les fibres à cœur creux remplies de gaz apparaissent comme la solution la plus efficace pour générer un SC jusqu'à 100 nm dans le proche UV.

Pour couvrir l'ensemble du spectre électromagnétique, de l'UV au térahertz, les lasers haute puissance à cycles courts et la génération de fréquence différentielle (DFG) constituent des approches prometteuses. Des avancées récentes ont démontré la faisabilité de peignes de fréquences ultra-large bande couvrant de 340 nm à 40 μm . Par ailleurs, la génération SC ultra-stable et cohérente via les fibres ANDi ouvre la voie à de nouvelles applications, en surmontant les limites imposées par le bruit et la complexité spectrale des sources à solitons.

L'optimisation des modèles numériques basés sur l'équation de Schrödinger non linéaire généralisée (GNLSE), intégrant des effets avancés (bruit quantique, absorption, interactions inter-modales), ainsi que le recours croissant à l'apprentissage automatique, promettent d'améliorer significativement les performances des sources SC. Enfin, la recherche sur les fibres optiques a fortement contribué au développement des circuits photoniques intégrés (PIC), notamment en verres infrarouges et matériaux CMOS compatibles comme le nitrure de silicium ou le germanium, ouvrant la voie à des sources SC intégrées sur puces photoniques.

Grâce à ces avancées, la technologie des lasers SC poursuit son essor et s'adapte continuellement à de nouvelles applications en spectroscopie, métrologie optique, et imagerie biomédicale, renforçant ainsi son rôle clé dans l'industrie laser et photonique.

Sigles, notations et symboles

Symbole	Description	Unité
γ	Coefficient non linéaire de la fibre optique	$\text{m}^{-1}\text{W}^{-1}$
A_{eff}	Aire effective modale	m^2
D	Dispersion de vitesse de groupe	$\text{ps}/\text{nm}/\text{km}$
β_2	Second ordre de dispersion	s^2/m
P	Puissance crête du laser	W
n_2	Indice non linéaire	m^2/W
α	Atténuation linéaire	m^{-1}

Pour en savoir plus

Laser supercontinuum à fibre optique : Principe et applications
Thibaut Sylvestre
Directeur de Recherche CNRS, Institut FEMTO-ST
Université Marie et Louis Pasteur, Besançon, FRANCE

A lire également dans nos bases de données :

LAZARE (S.) et MOTTAY (E.) Spectrométries laser en analyse et caractérisation. [P2685] (2007).

DHERBECOURT (J.B.), GODARD (A.), MELKONIAN (J.-M.), RAYBAUT M. -Sources paramétriques optiques – Fondements, mise en œuvre et applications. [E6445] (2015).

BIGOURD (D.) et FOURCADE-DUTIN (C.) - Sources paramétriques à base de fibres creuses. [IN410] (2023).

Sources bibliographiques

- [1] KUDLINSKI (A.) et MUSSOT (A.). – Sources supercontinuum à fibre optique - La révolution du laser blanc. Technique de l'ingénieur [IN 122] (2011).
- [2] DUBOIS (A.) - Tomographie par cohérence optique (OCT) - Technologie et applications biomédicales, Techniques de l'ingénieur [E4155] (2023).
- [3] AUGUSTE (J.-L.), BLONDY (J.-M.) et ROY (P.). – La fibre optique microstructurée air-silice. Techniques de l'ingénieur [RE 43] (2005).
- [4] SYLVESTRE (T.), GENIER (E.), GHOSH (A.N.), BOWEN (P.), GENTY (G.), TROLES (J.), MUSSOT (A.), PEACOCK (A.C.), KLIMCZAK (M.), HEIDT (A.M.), TRAVERS (J.C.), BANG (O.) et Dudley (J.M.). –Recent advances in supercontinuum generation in specialty optical fibers [Invited]. JOSA B 38, 12, F90-F103, (2021).
- [5] ALFANO (R.R.). –The Supercontinuum Laser Source : The Ultimate White Light. 3rd ed. New York : Springer (2016).
- [6] DUDLEY (J.M.) and TAYLOR (J.R.). –Supercontinuum Generation in Optical Fibers. Cambridge, England : Cambridge University Press (2010).
- [7] RUSSELL (P.St.J.) –Photonic crystal fibers. J. Lightwave. Technol., 24 (12), 4729–4749 (2006).
- [8] RANKA (J.K.), WINDELER (R.S.) et STENTZ (A.J.) –Visible continuum generation in air–silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm. Opt. Lett. 25(1), 25-27 (2000).
- [9] DUDLEY (J.M.), GENTY (G.) et COEN (S.). –Supercontinuum generation in photonic crystal fiber. Rev. Mod. Phys. 78 (4), 1135-1184 (2006).
- [10] GEORGES (T.), JOINDOT (M.) et JOINDOT (I.). – Solitons dans les fibres optiques Techniques de l'ingénieur [E1985] (2015).
- [11] AGRAWAL (G.). –Nonlinear fiber optics. Academic Press, 6th Edition, ISBN 9780128170427 (2019).
- [12] MUSSOT (A.), BEAUGEOIS (M.), M. BOUAZAOU (M.) et SYLVESTRE (T.) –Tailoring strong CW supercontinuum in photonic crystal fibers with two zero dispersion wavelengths. Optics Express 15, 11553-11563 (2007).
- [13] HEIDT (A.M.). –Pulse preserving flat-top supercontinuum generation in all-normal dispersion photonic crystal fibers. J. Opt. Soc. Am. B 27(3), 550-559 (2010).
- [14] GENIER (E.), GRELET (S.), ENGELSHOLM (R.D.), BOWEN (P.), MOSELUND (P.M.), BANG (O.), DUDLEY (J.M.) et SYLVESTRE (T.). –Ultra-flat, low-noise, and linearly

- polarized fiber supercontinuum source covering 670–1390 nm. *Opt. Lett.* 46, 1820-1823 (2021).
- [15] FANJOUX (G.), MARGUERON (S.), BEUGNOT (J.-C.) et SYLVESTRE (T.). –Supercontinuum generation by stimulated Raman–Kerr scattering in a liquid-core optical fiber. *J. Opt. Soc. Am. B* 34, 1677-1683 (2017).
 - [16] PETERSEN (C.R.), MOLLER (U.), KUBAT (I.), ZHOU (B.), DUPONT (S.), RAMSAY (J.), BENSON (T.), SUJECKI (S.), MONEIM (N.A.), TANG (Z.), FURNISS (D.), SEDDON (A.) et BANG (O.). –Mid-infrared supercontinuum covering the 1.4–13.3 μm molecular fingerprint region using ultra-high NA chalcogenide step-index fibre. *Nat. Photon.* 8, 830-834 (2014).
 - [17] LEMIERE (A.), BIZOT (R.), F. DESEVEDAVY (F.), GADRET (G.), JULES (J.-C.), MATHIEY (P.), AQUILINA (C.), BEJOT (P.), BILLARD (F.), FAUCHER (O.), KIBLER (B.) et SMEKTALA (F.). –1.7–18 μm mid-infrared supercontinuum generation in a dispersion-engineered step-index chalcogenide fiber. *Results Phys.* 26, 104397 (2021).
 - [18] VENCK (S.), ST-HILAIRE (F.), BRILLAND (L.), GHOSH (A.N.), CHAHAL (R.), CAILLAUD (C.), M. MENEGHETTI (M.), TROLES (J.), JOULAIN (F.), COZIC (S.), POULAIN (S.), HUSS (G.), ROCHETTE (M.), DUDLEY (J.M.) et SYLVESTRE (T.). –2–10 μm mid-infrared fiber-based supercontinuum laser source : experiment and simulation. *Laser Photonics Rev.* 14, 2000011 (2020).
 - [19] REN (H.), SHEN (L.), RUNGE (A.F.J.), HAWKINS (T.W.), BZLLATO (J.), GIBSON (U.) et PEACOCK (A.C.). –Low-loss silicon core fibre platform for mid-infrared nonlinear photonics. *Light Sci. Appl.* 8 (105), 1-10 (2019).
 - [20] TRAVERS (J.C.). –Blue extension of optical fibre supercontinuum generation. *J. Opt.* 12 (11), 113001 (2010).
 - [21] SYLVESTRE (T.), RAGUEH (A.R.), LEE (M.W.), STILLER (B.), FANJOUX (G.), BARVIAU (B.), MUSSOT (A.) et KUDLINSKI (A.). –Black-light continuum generation in a silica-core photonic crystal fiber. *Opt. Lett.* 37 (2), 130-132 (2012).
 - [22] POUDEL (C.) et KAMINSKI (C.F.). –Supercontinuum radiation in fluorescence microscopy and biomedical imaging applications". *J. Opt. Soc. Am. B* 36(2), A139 (2019).
 - [23] BELL (F.), ABDOLVAND (A.), CHANG (W.), TRAVERS (J.C.) et RUSSELL (P.S.J.). –Vacuum ultraviolet to infrared supercontinuum in hydrogen-filled photonic crystal fiber. *Optica* 2, 292–300 (2015).
 - [24] PERRET (S.), POUDEL (C.), GHOSH (A.N.), FANJOUX (G.), PROVINO (L.), TAUNAY (T.), MONTEVILLE (A.), LANDAIS (D.), KAMINSKI (C.F.), DUDLEY (J.M.) et SYLVESTRE (T.). –Silica-based photonic crystal fiber for the generation of broadband UV radiation," *OSA Continuum* 3, 31-42 (2020).
 - [25] LABRUYERE (A.), TONELLO (A.), COUDERC (V.), HUSS (G.), LEPROUX (P.) –Compact supercontinuum sources and their biomedical applications. *Optical Fiber Technology*, Volume 18, Issue 5, Pages 375-378 (2012).
 - [26] UDEM (T.), HOLZWARTH (R.), and HANSCH (T.W.). –Optical frequency metrology. *Nature* 416, 233 (2002).
 - [27] HUGONNOT (E.) – Amplification d'impulsions laser à dérive de fréquence. *Techniques de l'ingénieur [E6515]* (2015).

Annuaire

Constructeurs – Fournisseurs – Distributeurs

Sociétés de sources laser supercontinuum
LEUKOS Laser
NKT Photonics
YSL Photonics
Thorlabs
TOPTICA Photonics
FYLA Laser
Menlo Systems
Norblis
AdValue Photonics
Superlight Photonics

Tableau 1 – Principales entreprises proposant des lasers supercontinuum et des peignes de fréquences optiques.