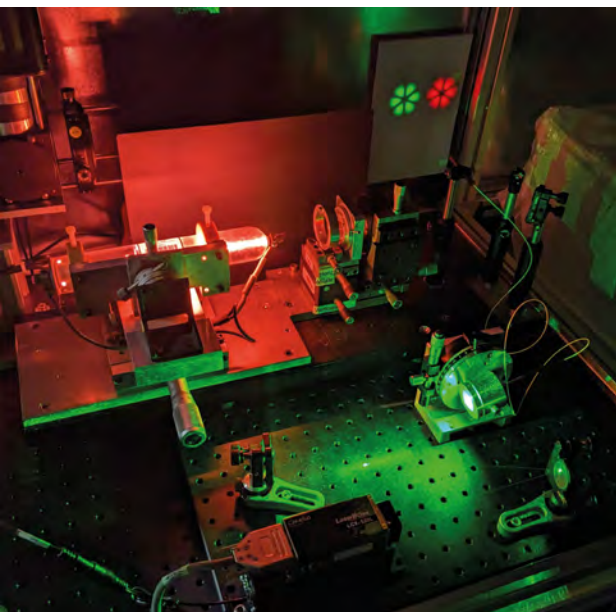


Des défilés de modes... dans un bus

Collectif Scientibus

Université de Limoges, Faculté des Sciences et Techniques, 123 avenue A. Thomas, Limoges, F 87060

*dominique.pagnoux@xlim.fr



Le « Scientibus » est un autobus transformé en un véritable laboratoire itinérant dans lequel le public peut participer à une grande quantité d'expériences scientifiques dont beaucoup relèvent de la photonique. Dans cet article, nous donnons l'exemple d'un enchaînement de démonstrations sur le thème de la propagation guidée dans les fibres optiques, en allant du phénomène de réflexion totale jusqu'à l'excitation modale sélective d'une fibre faiblement multimodale.

<https://doi.org/10.1051/phys/202311825>

Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation correcte de la publication originale.

En France comme dans beaucoup d'autres pays, on déplore depuis de nombreuses années une désaffection notoire du public, des jeunes en particulier, pour les sciences et les carrières scientifiques. Pour remédier à cette situation, il est nécessaire de revaloriser l'image des disciplines scientifiques, souvent jugées difficiles d'accès. Dans cette optique, un groupe de chercheurs et d'enseignants-chercheurs de l'université de Limoges et du CNRS s'est donné pour objectif de faire découvrir les aspects fascinants des sciences et de leurs applications à travers une collection d'expériences participatives, modernes et étonnantes, embarquées dans un bus transformé en une sorte de « mini Palais de la Découverte » itinérant (Fig. 1). Cet outil unique permet de transporter les expériences au plus près du public, dans les établissements scolaires ou

à l'occasion de manifestations de diffusion de la culture scientifique. Ainsi est né le Scientibus dont la devise pourrait être inspirée par Lagardère : « si tu ne viens pas à la Science, la Science ira à toi » !

Depuis son inauguration par Claude Cohen-Tannoudji il y a bientôt 20 ans, le Scientibus parcourt les routes dans un rayon de 100 km autour de son port d'attache à la Faculté des Sciences et Techniques de Limoges. Il lui arrive même de s'aventurer beaucoup plus loin (festival « I love Science » à Bruxelles, congrès « Optique 2022 » à Nice) ! Animé par un collectif composé d'une trentaine de chercheurs, enseignants-chercheurs, techniciens, ingénieurs et doctorants, le projet Scientibus assure chaque année une trentaine de journées d'animations scientifiques, et accueille environ 3500 visiteurs dont 2500 scolaires.

Concrètement, le Scientibus est divisé en deux ateliers auxquels s'ajoute un atelier extérieur déployé dans une salle voisine ou sous un barnum. Avec cette organisation, trois groupes de 7 à 10 visiteurs chacun peuvent être accueillis simultanément par trois animateurs, en compagnie desquels ils vont pouvoir découvrir quelques-unes des 80 expériences ou démonstrations proposées au catalogue du Scientibus. Celles-ci couvrent les principaux domaines des sciences dites « dures », en particulier la physique avec, dans cette discipline, un large éventail de démonstrations relatives à l'optique-photonique, parmi lesquelles : effets stroboscopiques, polarisation et photoélasticimétrie, UV et fluorescence, imagerie IR, synthèse de prothèses céramiques par prototypage laser, interférométrie à décalage, transmissions par fibres optiques...



Évidemment, pour fonctionner correctement au sein du Scientibus, toutes ces démonstrations doivent satisfaire des conditions techniques drastiques : compacité, rapidité et simplicité de mise en œuvre, robustesse des réglages pour résister aux vibrations lors des déplacements du bus ou en présence du public, fiabilité. De plus, parce que le Scientibus veut pouvoir s'adresser à tous les publics - des plus jeunes aux plus anciens, des néophytes aux spécialistes- les concepteurs doivent veiller à proposer des expériences de niveaux scientifiques variés, idéalement avec une certaine progressivité. Pour cet article, nous avons choisi de présenter les démonstrations relatives à la transmission de la lumière par fibre optique qui illustrent bien cette gradation.

De l'initiation au phénomène de guidage...

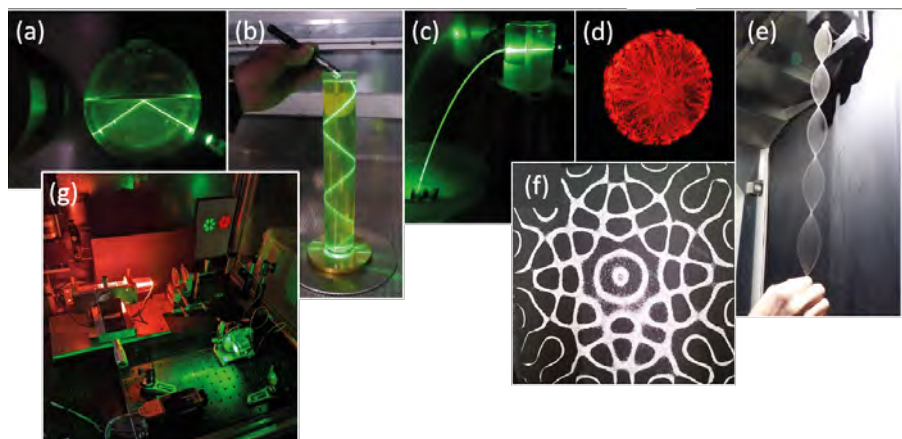
Pour les scolaires et le public non initié, on commence par l'observation de la réfraction et de la réflexion totale du faisceau d'un pointeur laser plus ou moins incliné, traversant une fiole de verre sphérique à moitié remplie d'eau colorée avec de la fluorescéine (Fig. 2a). Puis, en injectant le faisceau du pointeur dans un tube de verre rempli du même liquide, on réalise une première démonstration de guidage

Figure 1 : Arrivée du Scientibus au campus Saint Jean d'Angely à Nice, à l'occasion de la conférence « Optique Nice 2022 » en juillet 2022

de ce faisceau grâce aux réflexions totales successives aux interfaces tube air (Fig. 2b). Pour expliquer le phénomène, le public soupçonne souvent le tube de verre de jouer un rôle important. Aussi, pour prouver qu'il n'en est rien, on réalise la même démonstration dans un filet d'eau s'écoulant d'un réservoir (fontaine de Colladon) (Fig. 2c). À la suite de cette expérience, on montre une première exploitation pratique du phénomène de guidage avec le transport de lumière dans des fibres

plastiques à gros cœur pour application à l'éclairage déporté. On évoque aussi les guides d'images en mettant entre les mains des visiteurs de véritables laparoscopes, coloscopes et bronchoscopes. On revient ensuite sur les fibres élémentaires avec l'observation de la propagation de la lumière d'un laser HeNe injectée dans une longue fibre multimode 50/125µm en silice. Celle-ci est déployée depuis le système d'injection jusqu'à un tambour autour duquel elle fait quelques centaines de tours avant de réaliser un parcours sinueux au plafond du bus (observation des pertes aux courbures) jusqu'à un écran sur lequel le visiteur peut observer le speckle rouge émergent (Fig. 2d). À ce moment, il est facile de simuler la transmission à longue distance d'un signal numérique en hachant le faisceau du laser en entrée et en produisant des clignotements du speckle à la sortie. Et pour prouver que de l'information intelligible peut être transportée par un signal lumineux modulé, nous avons mis en place une démonstration de transmission de musique en espace libre entre une diode laser rouge modulée par la sortie analogique d'une tablette et un photodétecteur couplé à un haut-parleur. En interposant un obstacle sur le trajet

Figure 2 : Enchaînement des démonstrations sur le guidage des modes dans les fibres optiques présentées dans le Scientibus: (a) réflexion totale ; (b) réflexions multiples ; (c) fontaine de Colladon ; (d) speckle à la sortie d'une fibre 50/125 ; (e) corde de Melde ; (f) mode de la plaque de Chladni ; (g) les deux dispositifs de sélection modale permettant d'afficher sur un écran les modes du laser HeNe (mode rouge à droite) et de la fibre (mode vert à gauche).



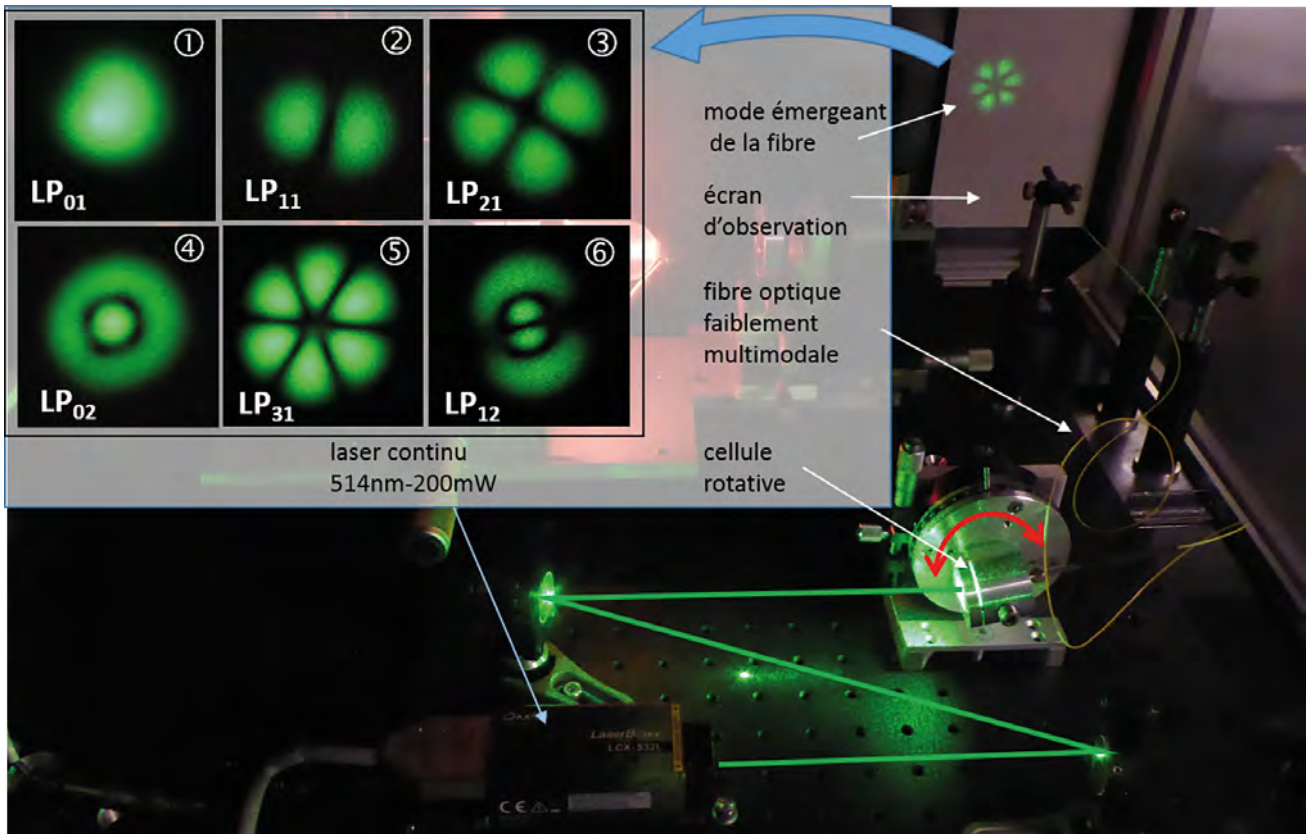


Figure 3 : Dispositif d'excitation modale sélective d'une fibre optique ; Encart : les modes excités, photographiés sur l'écran placé en sortie de fibre. Les nombres 1 à 6 indiquent l'ordre d'apparition des modes à mesure que l'angle entre le faisceau incident et la fibre est augmenté.

de la lumière, la main d'un visiteur par exemple, on interrompt la musique. Pour contourner ce problème, l'entrée et la sortie d'une longue fibre plastique à gros cœur sont basculées respectivement devant la diode laser et devant le détecteur pour rétablir la liaison. On peut alors dissenter à volonté sur les systèmes de transmissions par fibres optiques longues distances et haut débit.

... à la découverte des modes des fibres et des lasers

Pour un public plus averti, la séquence précédente peut être survolée voire complètement esquivée pour en venir directement à une série d'expériences un peu plus pointues concernant les modes de propagation dans les fibres multimodes. Le début de cette partie est naturellement l'observation sur l'écran du speckle émergent de la fibre multimode 50/125µm (Fig. 2d), avec son aspect tavelé changeant quand la fibre est

perturbée ou quand les conditions d'injection sont modifiées. Avant d'aller plus loin, il peut être utile de rappeler la notion de « mode de vibration », que l'on peut illustrer avec une corde de Melde qui est une ficelle tenue à une extrémité par un visiteur, plus ou moins tendue, et attachée à un vibreur à son autre extrémité. Avec une tension adéquate de la corde, un mode 1D s'établit, dont on observe facilement les nœuds et les ventres (Fig. 2e). En modifiant la tension, l'expérimentateur change le mode de vibration de la corde. Dans un deuxième temps, on produit une onde stationnaire 2D en excitant une plaque métallique horizontale avec un vibreur (plaque de Chladni). Dans ce cas, c'est en

modifiant la fréquence du vibreur que l'on change la nature des modes de vibration, ceux-ci étant visualisés en saupoudrant la plaque de sable fin (accumulation le long des nœuds) (Fig. 2f). Les notions indispensables étant maintenant introduites, on peut revenir au cas de la fibre optique cylindrique dans le cœur de laquelle l'onde lumineuse résonne spatialement pour produire des modes transverses de Laguerre-Gauss 2D. Des exemples de ces modes calculés par résolution des équations de Maxwell sont présentés sur une affiche, et le public comprend que le speckle observé résulte de la superposition de ces modes plus ou moins déphasés entre eux.

À ce stade, la découverte du phénomène de guidage a déjà bien progressé depuis la simple observation du phénomène de réflexion totale d'un rayon lumineux... mais il est possible d'aller encore plus loin ! Pour cela, deux nouvelles démonstrations installées dans le bus permettent de sélectionner, soit ●●●

dans une fibre optique soit dans un laser HeNe, des modes transverses purs et de les projeter sur un écran pour les observer à loisir. Le premier dispositif, inspiré par les travaux de S. Shaklan en 1991, permet de réaliser une excitation modale sélective

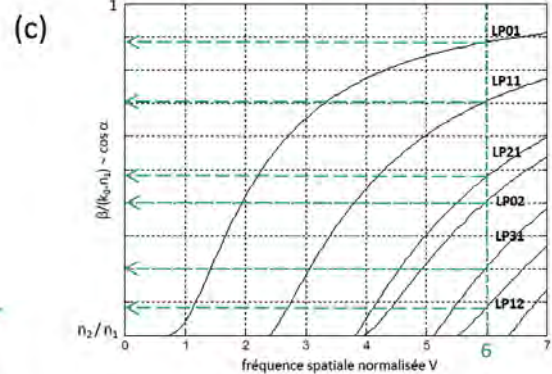
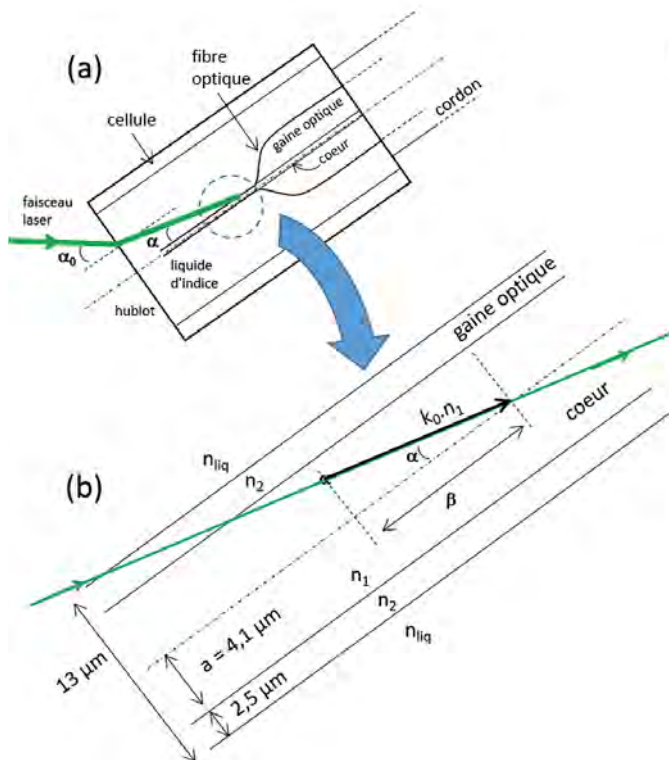
dans une fibre faiblement multimode dans le visible [1]. La fibre est préalablement amincie à une extrémité par attaque à l'acide fluorhydrique de sorte que l'épaisseur de gaine optique résiduelle ne soit plus que d'environ $2,5 \mu\text{m}$ (voir encart). La pointe

est ensuite insérée dans une cellule remplie de liquide d'indice et munie à l'avant d'un hublot perpendiculaire à l'axe de cette fibre. À l'arrière, la fibre est hermétiquement scellée à la cellule pour éviter toute fuite de liquide d'indice. À travers le hublot,

PRINCIPE DE L'EXCITATION MODALE SÉLECTIVE D'UNE FIBRE OPTIQUE PAR AJUSTEMENT DE L'INCLINAISON D'UN FAISCEAU INCIDENT LATÉRAL

Les paramètres optogéométriques de la fibre sont les indices du cœur et de la gaine optique, ainsi que le rayon du cœur, notés respectivement n_1 , n_2 et a . La Figure (a) montre le faisceau du laser adressé sur la fibre amincie à travers le hublot de la cellule remplie de liquide d'indice ($n = n_{liq} \sim n_2$). Le faisceau incident fait un angle α_0 avec la normale au hublot, et le faisceau réfracté fait un angle α avec l'axe de la fibre. La figure (b) est un zoom sur la pointe de la fibre où les réfractions du faisceau laser aux interfaces ne sont pas représentées du fait de la très grande proximité entre les indices n_1 , n_2 et n_{liq} . Le module du vecteur d'onde associé au faisceau dans le cœur est $k_0 \cdot n_1$ et la constante de propagation associée vaut $\beta \sim k_0 \cdot n_1 \cdot \cos \alpha$ (si on néglige

les déphasages de Goos-Hänchen). D'un autre côté, par résolution de l'équation de dispersion dans les fibres cylindriques, on peut tracer les courbes de dispersion associées aux différents modes transverses (Figure (c)). Pour la fibre que nous utilisons ($a = 4,1 \mu\text{m}$, ouverture numérique $ON = 0,12$), la fréquence spatiale normalisée est $V = k_0 \cdot a \cdot ON \sim 6$ à la longueur d'onde du laser (532nm). Pour chaque mode LP_{mn} , on peut lire sur la courbe correspondante sa constante de propagation réduite $\beta_{mn} / (k_0 \cdot n_1) \sim \cos \alpha_{mn}$ et en déduire la valeur de l'angle α_{mn} associé. Ainsi, lorsque l'angle α du faisceau adressé dans le cœur de la fibre correspond à l'angle α_{mn} , le mode LP_{mn} pur est excité dans la fibre. L'angle α_0 est relié à α_{mn} par la relation de la réfraction de Snell-Descartes.



le faisceau d'un laser vert (Oxxius LCX-532-L, 532 nm, 200 mW) faisant un petit angle α avec l'axe de la fibre est adressé sur le côté de la pointe, pour induire un couplage frustré de la lumière dans le cœur. L'angle d'incidence est ajusté en modifiant l'inclinaison de la cellule. Lorsque l'inclinaison du rayon dans le cœur correspond à celle du vecteur d'onde associé à un mode transverse, on excite sélectivement ce mode (voir l'encart). En l'absence de couplage, celui-ci émerge, pur, à la sortie de la fibre et s'affiche sur un écran. En modifiant petit à petit l'angle de la cellule, on obtient donc un véritable défilé de modes sur l'écran. Avec notre fibre (fibre SMF28, diamètre de cœur = 8,2 μm , ON = 0,12, longueur = 1 m, diamètre de la pointe = 13 μm), nous pouvons observer une succession de 6 modes transverses linéairement polarisés (LP) à 532 nm, du mode fondamental au mode LP_{1,2} en faisant varier l'inclinaison de la cellule sur une plage de 4° (Fig. 3).

Le deuxième dispositif est fondé sur un filtrage spatial intracavité dans un laser He-Ne spécialement conçu. Celui-ci est constitué d'un tube de large diamètre intérieur, fermé d'un côté par un miroir scellé et de l'autre par une fenêtre de Brewster (fabricant Melles Griot), la cavité étant elle-même fermée par un miroir de sortie éloigné d'une dizaine de centimètres de la fenêtre de Brewster. Le faisceau émis est étendu à l'aide d'une lentille de courte focale ($f = 8 \text{ mm}$) placée en sortie du laser, avant d'être adressé sur un écran pour son observation (diamètre du spot sur l'écran = 8 cm). Du fait de son grand diamètre intérieur, ce laser est fortement multimode transverse. L'intervalle entre la fenêtre de Brewster et le miroir de sortie permet d'insérer des obstacles diffractants qui agissent sur la forme du faisceau. Dans notre cas, ces obstacles sont deux fils métalliques fins ($\phi = 50 \mu\text{m}$), placés l'un devant l'autre dans des plans P et P' perpendiculaires au faisceau, et pouvant être

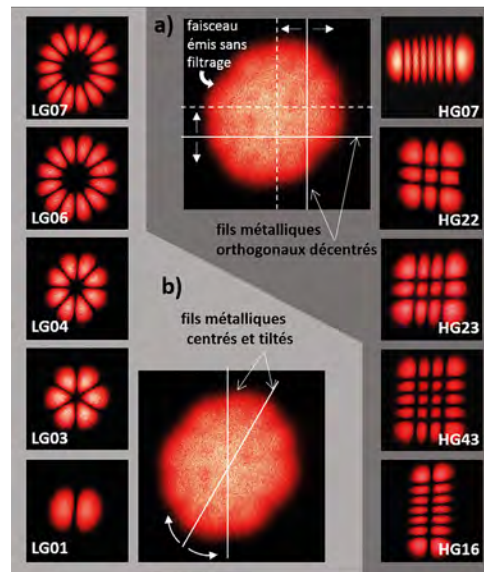


Figure 5 : Modes sélectionnés par filtrage intra-cavité dans un laser HeNe effectué à l'aide de deux fils métalliques fins. a) Modes de Hermite-Gauss (HG) sélectionnés par décalage vertical ou horizontal des fils maintenus orthogonaux; b) Modes de Laguerre-Gauss (LG) sélectionnés par ajustement de l'angle entre les fils se croisant sur l'axe.

translatés ou pivotés dans leurs plans respectifs, indépendamment l'un de l'autre. Leur rôle est d'imposer des lignes de zéros (= lieux d'annulation) dans le champ transverse oscillant dans la cavité. De ce fait, ils sélectionnent, dans la collection des modes Hermite-Gaussiens (HG) ou Laguerre-Gaussiens (LG) susceptibles d'osciller (modes transverses auto-transformés de Fourier), le mode d'ordre le plus bas présentant ces lignes de zéros. Ainsi, avec les deux fils perpendiculaires entre eux et hors d'axe, on sélectionnera un mode HG TEM_{p,q} (motif rectangulaire à p lignes noires dans une direction et q lignes noires dans la direction perpendiculaire) [2] (Fig. 4a). Et avec les deux fils positionnés sur l'axe du faisceau avec un angle de π/m entre eux, on sélectionnera le mode LG TEM_{0,m} (rosace de lumière à 2m lobes)[3,4] (Fig. 4b). Dans la famille des modes HG, ce laser peut émettre n'importe quel mode TEM_{p,q} pur, avec $(p+q) \leq 7$.

Dans la famille des modes LG, le mode d'ordre le plus élevé accessible est le mode TEM_{0,7} (14 lobes). L'ordre des modes accessibles est borné essentiellement par la dimension transverse du tube.

Les deux dispositifs décrits ci-dessus, sont installés côte à côte dans le bus (Fig. 2g) et les modes qu'ils produisent sont adressés sur le même écran, ce qui permet, entre autre, de mettre en évidence la parfaite ressemblance entre les modes LG TEM_{0q} du laser et les modes LP_{q1} de la fibre ($1 \leq q \leq 3$).

Ces deux dernières démonstrations sont particulièrement intéressantes pour des étudiant(e)s de licence ou de master en photonique pour lesquelles elles présentent un caractère pédagogique évident. Mais elles fascinent également le grand public du fait de leur fort impact visuel et de leur rendu esthétique.

Conclusion

Cet article met en lumière le Scientibus, un laboratoire itinérant conçu par des chercheurs et enseignants-chercheurs de l'Université de Limoges pour diffuser la culture scientifique en direction d'un très large public. À travers l'exemple du guidage de la lumière dans les fibres optiques, nous montrons comment une sélection d'expériences et de démonstrations appropriées permet une compréhension graduelle des concepts mis en jeu.

L'opération Scientibus bénéficie du soutien de nombreux partenaires cités en page d'accueil de son site internet (<https://scientibus.unilim.fr/>). ●

RÉFÉRENCES

- [1] S. Shaklan, *Opt. Lett.* **30**, 4379 (1991)
- [2] S.-C. Chu et al., *Opt. Express* **7**, 7128 (2012)
- [3] P. Facq, F. de Fornel and F. Jean, *Elect. Lett.* **20**, 613 (1984)
- [4] P. Faugeras et al., *Opt. Commun.* **90**, 35 (1992)