

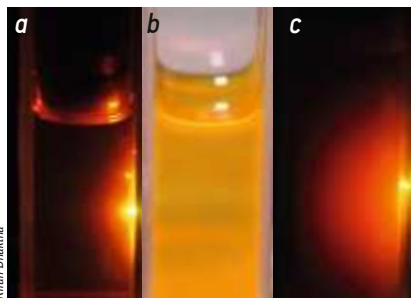
différentes hypothèses ont été avancées, comme l'existence de résonances accidentellement localisées, même loin du régime d'Anderson, ou encore l'amplification, le long de chemins de diffusion anormalement longs, de certains photons « chanceux ».

Aujourd'hui, l'origine de ces raies laser semble comprise pour une bonne part à la suite de travaux numériques et théoriques récents. On s'est d'abord aperçu que même loin du régime de localisation d'Anderson, les systèmes diffusifs ouverts, et donc très fuyants, possédaient des résonances. Malgré leur très mauvaise qualité liée à leurs fortes pertes vers l'extérieur, ces résonances peuvent être excitées en présence de gain : ici, l'histoire se répète, il suffit que le gain devienne supérieur aux pertes pour que l'on observe l'oscillation laser, qui se traduit par la présence de raies étroites dans le spectre d'émission. Cela évidemment au prix d'une excitation externe très intense. Cependant, les modes vibratoires excités sont très différents des modes bien connus des cavités ou des résonances localisées (voir la figure 8c).

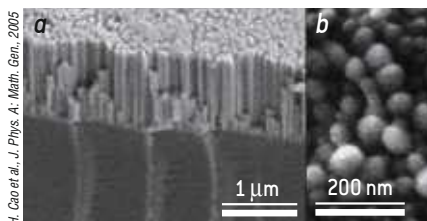
Une théorie englobant tous les lasers

Dans un laser traditionnel, il est admis que les modes laser sont simplement les modes de la cavité excités par le gain. Cette hypothèse est à la base de la compréhension théorique du laser jusqu'à aujourd'hui. Elle repose sur la condition que les pertes de la cavité sont faibles, ce qui est raisonnable dans de nombreux cas. Mais cette condition ne tient plus dans le cas des lasers aléatoires. Tout récemment, Douglas Stone, Hakan Türeci et leurs collaborateurs à l'Université de Yale ont proposé une théorie qui, contrairement à la théorie standard, ne s'appuie pas *a priori* sur les modes d'une cavité : au lieu de considérer les modes d'une cavité comme une des données du problème, ils ont supposé qu'il existait des modes vibratoires, mais inconnus, à déterminer de toutes pièces avec pour seules données les caractéristiques du système diffusant à gain.

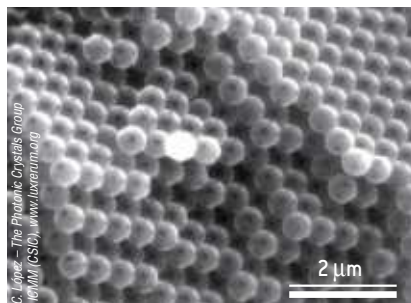
Cette approche leur a permis de proposer une nouvelle description, plus générale, des modes vibratoires laser, qui englobe le cas conventionnel des lasers à cavité, mais s'étend aussi aux nouvelles sources laser fortement ouvertes telles que les micro-disques (voir la figure 8a), les lasers distribués (où un réseau est gravé dans la région active pour forcer l'émission à une longueur



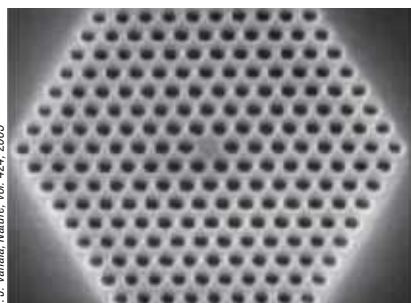
4. LASER ALÉATOIRE À COLORANT : le milieu aléatoire est une suspension de nanoparticules d'oxyde de titane dans un colorant [b]. Un faisceau laser vert excite le colorant qui réémet dans le rouge [c]. Sans les nanoparticules [a], il n'y a pas d'émission laser.



5. LASERS ALÉATOIRES À SEMI-CONDUCTEURS : des nanopiliers d'oxyde de zinc sur un substrat de saphir [a] ou une poudre de nanocristaux d'oxyde de zinc [b] servent à la fois de milieu actif grâce à leurs propriétés électriques, et de milieu diffusant par leur géométrie.



6. LASER ALÉATOIRE dans une structure d'opale : un réseau interconnecté de sphères d'air entourées de coquilles de silicium joue le rôle du milieu diffusant. Ce réseau est infiltré par un colorant – le milieu actif.



7. LASER À CRISTAL PHOTONIQUE : une membrane semi-conductrice percée périodiquement est excitée par le dessus. L'effet laser est attendu dans le plan de la membrane. Ce laser devient un laser aléatoire quand on introduit un désordre sur la position des trous ou sur leur forme.

d'onde particulière, déterminée par le pas du réseau) ou les lasers aléatoires ...

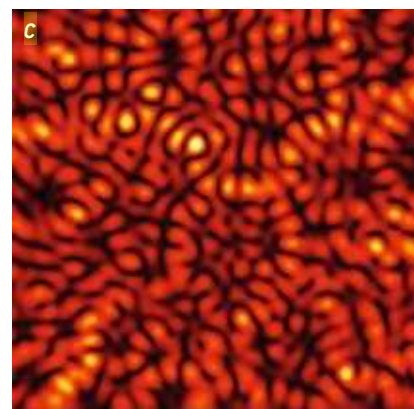
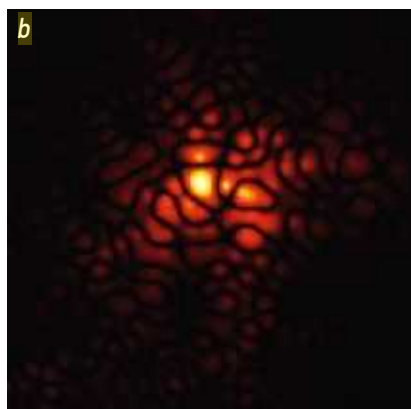
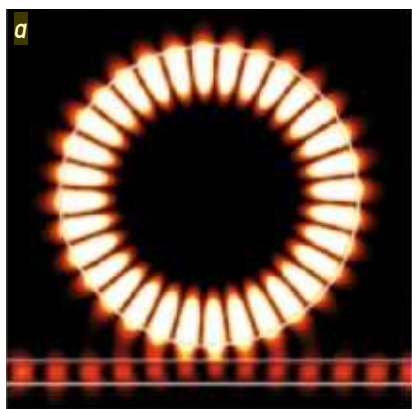
Qu'en est-il des propriétés de l'émission laser en l'absence de cavité ? Un laser aléatoire conserve une bonne cohérence temporelle, mais perd sa directivité. En effet, l'émission ne se fait plus selon une direction bien définie, mais dans toutes les directions de manière aléatoire. Cette perte de directivité provient de la structure complexe des modes laser et de leur couplage avec l'extérieur (voir la figure 1). En revanche, la cohérence temporelle est conservée : si un seul mode vibratoire est excité, la lumière sera à peu près aussi monochromatique que celle d'un laser classique.

En pratique, un laser aléatoire a énormément de modes, car leur nombre augmente avec le volume (contrairement à un laser conventionnel, dont le nombre de modes est plus faible, car il augmente comme la longueur de la cavité). Il est donc difficile de n'exciter qu'un seul mode, sauf dans des structures de taille micrométrique. Le laser aléatoire présente ainsi une cohérence temporelle moyenne, à l'instar des lasers traditionnels multimodes.

Une propriété originale du laser aléatoire est que l'émission dépend de la localisation spatiale de l'excitation externe. Dans la majorité des systèmes étudiés jusqu'à maintenant, l'excitation est optique : on illumine l'échantillon au moyen d'un faisceau laser externe suffisamment intense. Il suffit de déplacer légèrement ce faisceau sur l'échantillon pour que d'autres résonances soient excitées et que le spectre de l'émission laser change en conséquence.

Une autre propriété distingue la lumière laser de celle émise par une source classique : la statistique des photons, qui mesure leur tendance à être émis plus ou moins régulièrement dans le temps. Les photons d'une source classique ont tendance à être émis groupés en « paquets », alors que l'émission des photons laser est plus régulière. En conséquence, l'intensité lumineuse d'une source classique est beaucoup plus fluctuante que celle d'un laser. Pour en avoir le cœur net, plusieurs groupes ont mesuré la statistique des photons émis par un laser aléatoire et ont ainsi vérifié que le laser aléatoire se comporte comme un laser classique.

Même si les lasers aléatoires ont un avantage sur les lasers conventionnels, car ils sont beaucoup plus faciles à réaliser et donc moins chers, il est encore trop tôt pour identifier le rôle qu'ils vont jouer dans notre vie de tous les jours. Cependant, on a vu



Laurence Livermore National Laboratory

LPIC, CNRS - Université de Nice

LPIC, CNRS - Université de Nice

dans quelle mesure ils se distinguent des lasers classiques et c'est là qu'il faut aller chercher les applications futures. La cohérence temporelle de l'émission d'un laser conventionnel dépend des caractéristiques de la cavité optique. Cela peut représenter un sérieux désavantage dans certaines applications, lorsque par exemple une grande précision spectrale est requise. En revanche, avec un laser aléatoire, la longueur d'onde d'émission n'est plus sensible à l'alignement d'une cavité, et sa sensibilité aux effets thermiques ou aux vibrations mécaniques peut être fortement réduite.

D'autre part, la perte de cohérence spatiale dans les lasers aléatoires peut s'avérer très utile. Parce qu'ils émettent et sont donc visibles dans toutes les directions, les lasers aléatoires pourraient être très efficaces dans les dispositifs d'affichage. Cette propriété leur a d'ailleurs valu la dénomination de peinture laser. Évidemment, la longueur d'onde émise par un laser aléatoire est imprévisible. Elle dépend de façon complexe de la configuration du désordre dans la zone d'excitation. Cela peut cependant devenir un atout dans les dispositifs de codage ou d'identification. Ainsi, la Société *Spectra Systems Corp.* conçoit et distribue un système de codes-barres photoniques multicolores spécialement conçu pour le tri en environnement difficile.

L'utilisation des lasers aléatoires est aussi proposée pour le dépistage de certains cancers. Zeev Vally Vardeny et son équipe, à l'Université de l'Utah, ont récemment montré que l'injection d'un colorant dans des tissus biologiques, en particulier humains, donne lieu à un effet laser aléatoire plus intense dans une tumeur que dans un tissu sain, à cause de la plus grande hétérogénéité de la tumeur.

Les lasers aléatoires pourraient aussi présenter un intérêt pour la réalisation

de lasers dans les domaines ultraviolet et X, pour lesquels il n'existe pas de bons miroirs, comme dans le domaine visible. Cette difficulté serait levée si l'on parvenait à construire des lasers aléatoires – qui ne nécessitent pas de miroirs – dans ces domaines. Ainsi, les poudres d'oxyde de zinc sont particulièrement étudiées, car elles sont très efficaces dans l'ultraviolet (voir la figure 3).

Enfin, nous l'avons évoqué, l'étude fondamentale de l'effet laser aléatoire trouve un intérêt particulier dans le domaine des cristaux photoniques (voir la figure 7). Le cristal parfait n'existe pas et le désordre est inévitable. D'où l'intérêt croissant des scientifiques pour comprendre le rôle du désordre et, si possible, plutôt que de repousser à tout prix les limites technologiques pour l'éviter, en faire plutôt son allié.

Principal obstacle : l'excitation du milieu actif

À l'heure actuelle, ces applications ne sont que potentielles, car plusieurs obstacles restent à franchir. Le plus sérieux est celui de l'excitation du milieu actif. Tout d'abord, les pertes par les fuites vers l'extérieur étant beaucoup plus importantes que dans une cavité traditionnelle, les seuils d'excitation à atteindre pour obtenir un effet laser peuvent être élevés.

Par ailleurs, le faisceau d'excitation est lui-même diffusé par le milieu désordonné et pénètre donc difficilement dans l'échantillon ; l'excitation du milieu en est d'autant moins efficace et nécessite donc des intensités d'excitation plus élevées. Le futur du laser aléatoire sera probablement de le confiner au moins partiellement sous forme de couche mince ou de guide d'onde.

8. TROIS MODES LASER illustrés pour trois systèmes bidimensionnels différents (simulations numériques). L'un est une cavité microdisque (a), où un microdisque diélectrique sert à la fois de cavité et de milieu amplificateur ; le faisceau est piégé dans le microdisque et, pour en récupérer une partie, on appose une fibre optique le long du disque, qui sert de guide à la lumière (en bas). Les deux autres systèmes sont des milieux remplis de particules (non représentées) très diffusantes (b), ou peu diffusantes (c). Dans le premier cas (a), le mode se caractérise par ses motifs réguliers. Dans le deuxième (b), le mode est spatialement localisé par le désordre [seuil bas]. Dans le troisième (c), le mode laser est étendu et les fuites aux bords sont importantes [seuil élevé].

Nous effectuons actuellement des recherches dans ce sens en imposant au système une géométrie soit bidimensionnelle – membrane semi-conductrice de 150 nanomètres suspendue dans l'air –, soit unidimensionnelle – colorant et nanoparticules dans des tuyaux micrométriques. L'excitation électrique à l'aide d'électrodes, comme dans les lasers à semi-conducteurs, est aussi une alternative qui stimule plusieurs études dans cette direction.

Un autre obstacle réside dans la difficulté à obtenir des lasers aléatoires plus performants. Dans l'espoir d'étendre les applications possibles du laser aléatoire, plusieurs groupes tentent ainsi d'améliorer sa pureté spectrale.

Le laser aléatoire est encore jeune et sa compréhension reste incomplète, malgré les nombreux progrès de ces dix dernières années. On peut néanmoins s'attendre à l'émergence de certaines applications dans les années à venir. Quant à la question : est-ce un vrai laser ? La réponse est oui, même si certaines de ses propriétés d'émission le distinguent d'un laser classique. ■