

arbustes absorbent beaucoup plus d'énergie solaire que la neige blanche, suffisamment pour provoquer localement un réchauffement et accélérer la fonte de la neige au printemps ; cela a pour effet d'avancer la saison de croissance végétale et de stimuler les arbustes, qui deviennent encore plus grands.

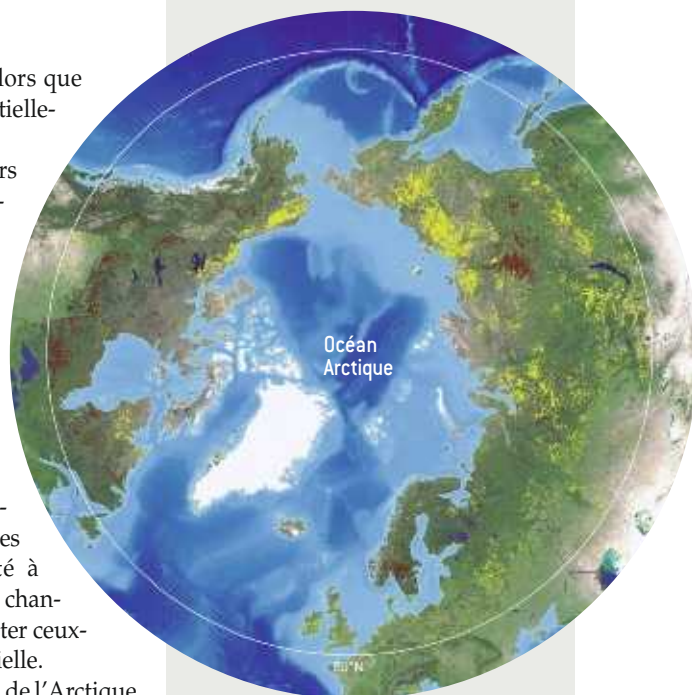
Les effets rétroactifs ne sont pas indépendants les uns des autres, ni des mécanismes de croissance estivale, de sorte que leur effet global est difficile à prévoir. Par exemple, les épaisses congères qui se forment près des arbustes devraient en principe mettre plus de temps à fondre que la neige plus mince des alentours. L'effet de fonte dû à l'absorption d'énergie par les branches des arbustes peut-il surpasser l'inhibition de la fonte due à l'épaisseur de la neige ? Ou bien est-ce l'inverse, ce qui freinerait la croissance de la végétation ?

En été, les ombres et les litières de feuilles ont aussi des effets antagonistes. L'ombre due à la canopée des grands arbustes abaisse les températures du sol, ce qui freine l'action microbienne stimulée par les congères en hiver, et ainsi la

croissance des arbustes, alors que les litières stimulent potentiellement cette croissance.

De nombreux chercheurs tentent de modéliser ces différents effets afin de mieux prévoir les transformations de la toundra et de la taïga. Certains paramètres clés restent inconnus, par exemple l'évolution de la quantité de neige qui tombera dans les régions arctiques. Les seuls modèles informatiques ne permettront pas de répondre à ces questions. Notre capacité à mesurer physiquement les changements en cours et à projeter ceux-ci dans l'avenir sera essentielle.

Comment la végétation de l'Arctique évoluera-t-elle ? À quelle vitesse ? Les écosystèmes concernés sont si complexes qu'il sera difficile d'obtenir un modèle prédictif fiable. Mais si nous ne nous attelons pas à la tâche dès maintenant, nous serons incapables d'anticiper les conséquences de ces évolutions.



6. CETTE CARTE DE L'ARCTIQUE a été établie d'après des données satellitaires. Les zones couvertes d'arbustes se sont agrandies (*en vert clair*), alors que la taïga s'est asséchée et comprend moins d'arbres (*en brun*).

Scott Goetz/Woods Hole Research Center



Research

- Salon européen des carrières de la recherche
- Europäische Messe für Forschung und Karriere
- European research career fair



Paris

19 novembre 2010
November 19, 2010

- **60 exposants**
Entreprises, centres et laboratoires de recherches, campus européens
- **60 exhibitors**
Companies, Research centres and laboratories, European campuses
- **5 conférences**
5 conferences

L'événement européen de votre carrière

The European event dedicated to your career

- **Recrutement / Recruitment**
- **Conseils / Advice**

Pré-inscription et informations sur:
Registration and information online:

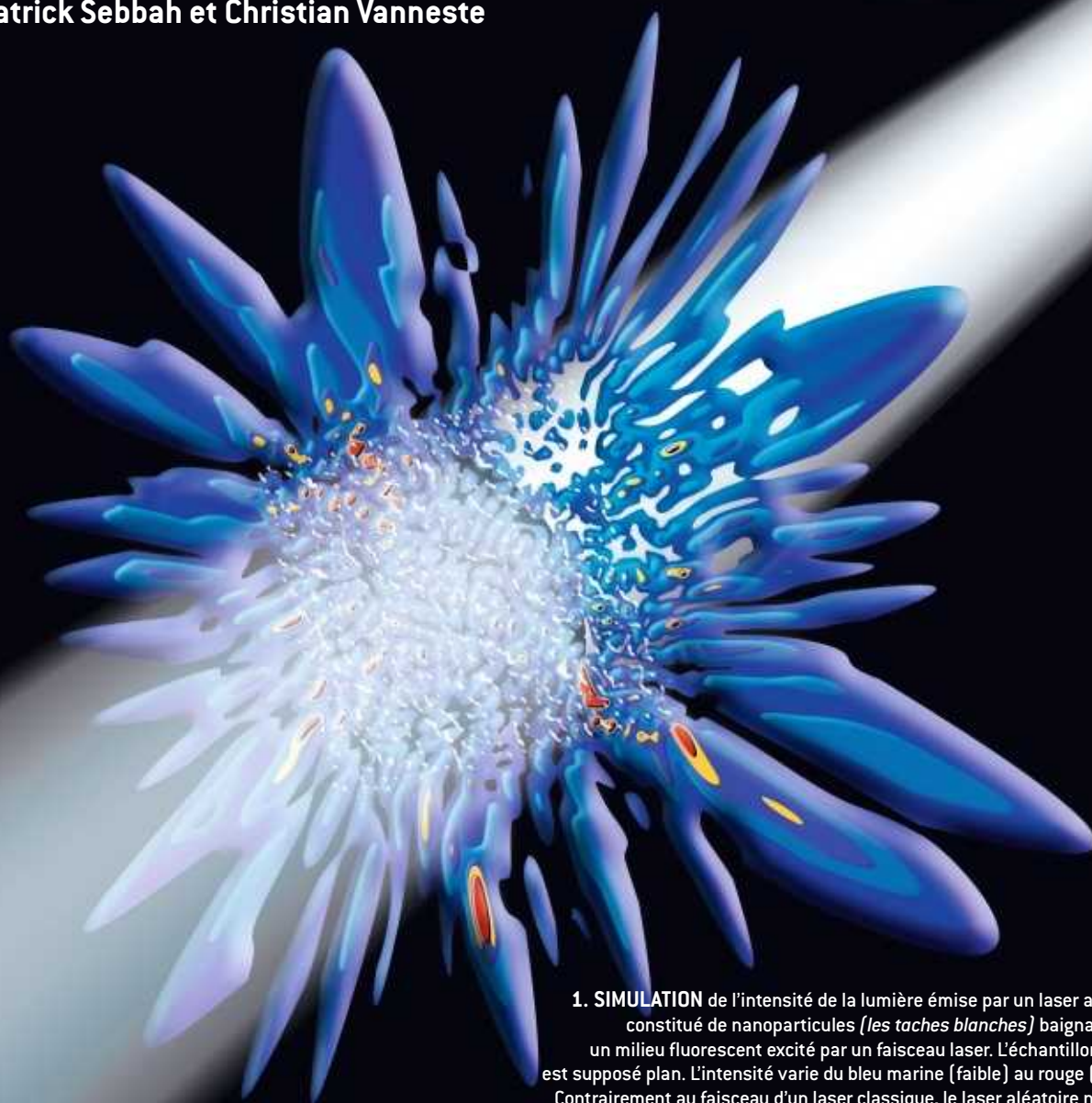
www.ResearchCareerFair.com



Physique

Le laser aléatoire : un **vrai** laser ?

Patrick Sebbah et Christian Vanneste



1. SIMULATION de l'intensité de la lumière émise par un laser aléatoire constitué de nanoparticules (*les taches blanches*) baignant dans un milieu fluorescent excité par un faisceau laser. L'échantillon, carré, est supposé plan. L'intensité varie du bleu marine (faible) au rouge (haute). Contrairement au faisceau d'un laser classique, le laser aléatoire n'est pas directionnel. Il dépend néanmoins de la géométrie du système, émettant par exemple dans un plan lorsque l'échantillon est bidimensionnel.

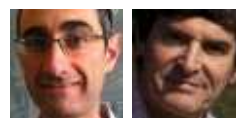
N és il y a tout juste 50 ans, les lasers ont envahi notre quotidien. Ils gravent et lisent nos DVD, impriment nos documents, découpent ou soudent les matériaux, réparent ou brûlent les tissus malades, transportent nos messages à travers les réseaux de fibres optiques... Autant de choses que la lumière ordinaire, celle d'une ampoule ou celle du Soleil, ne peut pas faire. Le secret du laser réside, d'une part, dans sa pureté spectrale : la couleur d'un faisceau laser est couramment un milliard de fois plus pure que celle d'une ampoule ; il réside, d'autre part, dans la remarquable directivité de son faisceau, qui fait la magie des spectacles laser et le rend indispensable en télémétrie, par exemple.

Tous les lasers conventionnels fonctionnent selon le même principe : un milieu « actif », constitué d'un gaz, d'un liquide ou d'un solide, amplifie la lumière au sein d'une cavité optique formée en général de deux miroirs se faisant face. Cette cavité est essentielle, car, en forçant la lumière à

La possibilité de concevoir un laser « sans miroir » ouvre des perspectives intéressantes. Par exemple, les lasers aléatoires pourraient se révéler très utiles dans l'ultraviolet, domaine spectral où il est difficile de fabriquer des miroirs. Autre enjeu important : comprendre le rôle du désordre dans les structures à cristaux photoniques souvent utilisées dans les micro-lasers. Les cristaux photoniques sont des structures périodiques minuscules qui modifient les propriétés de propagation de la lumière. Grâce à cette périodicité, ils constituent une sorte de cage qui force la lumière à effectuer des trajets dans le milieu amplificateur, à l'instar d'une cavité optique. Toutefois, il est difficile de fabriquer des structures parfaitement périodiques. L'émission due au désordre résiduel s'apparente à la problématique du laser aléatoire, on utilise le savoir acquis sur ces lasers pour comprendre l'effet du désordre.

À ce jour, de nombreux pays, en particulier asiatiques, explorent les applica-

LES AUTEURS



Patrick SEBBAH et Christian VANNESTE sont chercheurs CNRS au Laboratoire de physique de la matière condensée, unité mixte de recherche CNRS-Université de Nice-Sophia Antipolis.

Des milieux diffusants et désordonnés peuvent engendrer un effet laser. Ces nouveaux lasers suscitent l'intérêt tant des chercheurs que du monde industriel.

effectuer des allers-retours dans le milieu actif, elle confère au faisceau laser ses caractéristiques. Dès lors, est-il possible d'obtenir un effet analogue sans cavité ? Oui, ont démontré plusieurs groupes – d'un point de vue théorique dans les années 1960, puis expérimentalement dans les années 1990 : on peut produire une émission laser en l'absence de cavité optique, à partir de systèmes diffusants tels que des poudres semi-conductrices ou des matériaux organiques.

Dans ces milieux, la lumière ne se propage plus en ligne droite, mais suit une marche aléatoire (en zigzag) qui lui permet d'y séjourner plus longtemps avant de s'en échapper. Une nouvelle classe de lasers est née, où le milieu diffusant remplace la cavité optique du laser. Appelées « poudres laser », puis « lasers sans miroirs » ou encore « peintures laser », ces sources lumineuses ont finalement pris le nom de « lasers aléatoires ». Depuis, l'effet « laser aléatoire » a été observé dans tout le spectre lumineux et démontré dans de nombreux systèmes (voir les figures 3 à 7) : nanocristaux, opales dopées, fibres optiques, nanopiliers, cristaux photoniques aléatoires, voire des tissus organiques comme le blanc de poulet !

tions potentielles des lasers aléatoires : peintures laser, marquage, fabrication simplifiée de sources laser ultracompactes, détection de tumeurs... D'un point de vue plus fondamental, l'effet « laser aléatoire » soulève aussi des questions importantes comme la nature du champ laser dans ces systèmes sans cavité – a-t-il les mêmes caractéristiques que le champ laser classique ? –, à tel point que la théorie du laser a dû être récemment dépoussiérée pour inclure ce nouveau type de « laser ouvert ».

Qu'est-ce qu'un laser ?

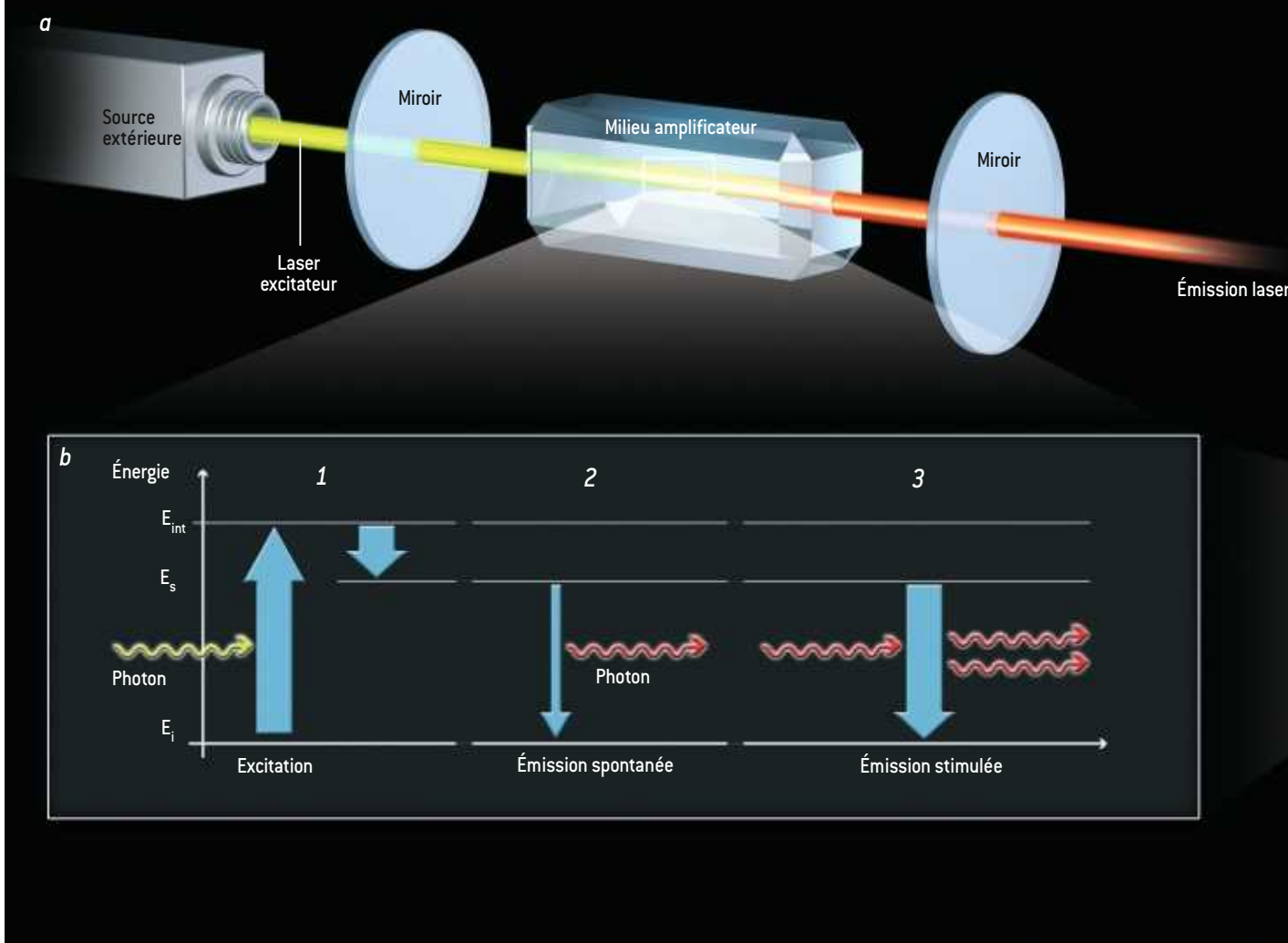
Dans un laser classique, les deux propriétés importantes de la lumière laser – sa pureté spectrale et la directivité de son émission – résultent de l'association du milieu actif et de la cavité optique (voir la figure 2). Comment, alors, obtenir une émission laser sans cavité ? Pour le comprendre, examinons ces deux propriétés du laser et la façon dont elles sont obtenues dans un laser classique.

Le milieu actif est constitué d'atomes portés dans un état d'énergie supérieur par excitation optique ou électrique (voir

L'ESSENTIEL

- ✓ L'effet « laser aléatoire » repose sur l'association d'un milieu actif, amplificateur de lumière, à un milieu diffusant ouvert, et non à une cavité optique, comme dans un laser classique.
- ✓ Malgré l'absence de cavité, la lumière émise par les lasers aléatoires a toutes les caractéristiques d'une émission laser, hormis sa directivité.
- ✓ Plus maniables, ces nouveaux lasers offrent des perspectives en médecine et dans le domaine non visible du spectre lumineux.
- ✓ Les fondements de la physique des lasers doivent être revisités.

Jonathan Andreasen et Bernard Gayral



Bruno Bourgeois

Émission spontanée, émission stimulée

Le cœur du laser est constitué d'un ensemble d'atomes sous forme solide, liquide ou gazeuse qui constitue le milieu actif. Ces atomes sont généralement identiques et, parmi tous leurs états énergétiques possibles, une paire d'états i et s , d'énergies respectives E_i et E_s , se révèle plus favorable que les autres pour l'émission laser. Une fois excités, c'est-à-dire portés dans l'état d'énergie supérieure, les atomes amplifient, par le processus d'émission stimulée, les photons qui les traversent (voir la figure 2).

Dans ce processus, un photon d'énergie $E_s - E_i$ incident qui frappe un atome excité dans l'état s provoque ou « stimule » la désexcitation de cet atome dans l'état i ; cet atome émet un photon identique au photon incident. On obtient ainsi deux photons ayant la même direc-

tion et la même énergie $E_s - E_i$ (ou même longueur d'onde). Ceux-ci à leur tour pourront provoquer la désexcitation d'autres atomes excités dans l'état s , créant ainsi en cascade un faisceau de photons identiques.

Pourquoi a-t-on de l'émission spontanée dans le cas des sources incohérentes et de l'émission stimulée dans le cas des lasers, alors qu'initialement, on se trouve dans les deux cas en présence d'une population d'atomes excités ? La réponse est que les deux processus d'émission spontanée et stimulée sont toujours à l'œuvre, mais avec des poids différents selon les situations. L'émission stimulée entre deux niveaux s et i domine lorsque le nombre d'atomes excités dans l'état s est supérieur au nombre d'atomes dans l'état i , situation désignée sous le nom d'inversion

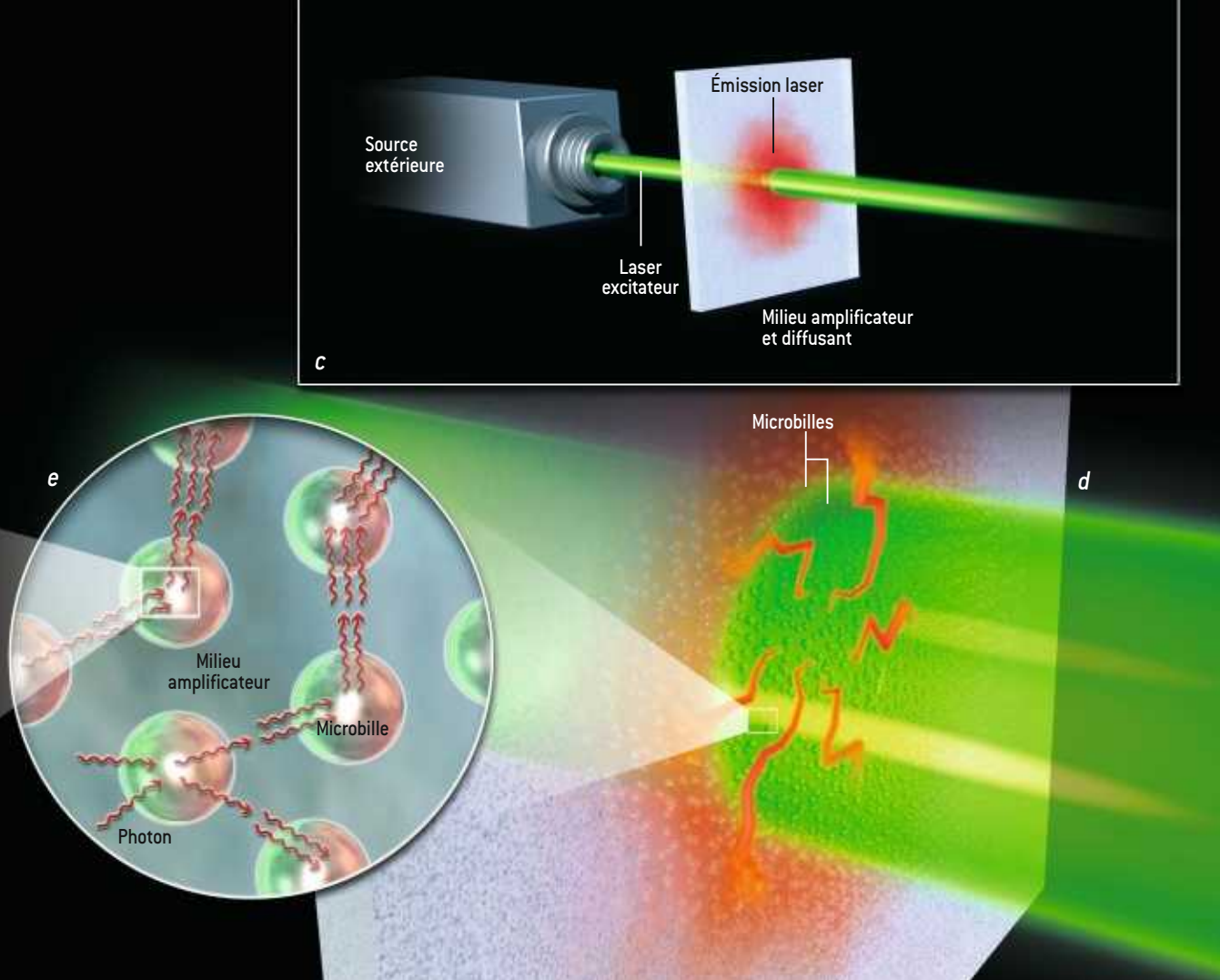
de population. Le mécanisme d'excitation des sources ordinaires est souvent d'origine thermique et ne peut conduire à une inversion de population.

Dans les lasers, on utilise un mécanisme d'excitation optique, électrique ou chimique qui porte les atomes dans l'état d'énergie supérieur E_s . Le milieu ainsi excité amplifie toute onde dont la fréquence correspond à l'énergie de photon $E_s - E_i$. Il peut être décrit par une courbe d'amplification (courbe de gain) en forme de cloche centrée sur cette fréquence, dont la largeur est liée à l'incertitude avec laquelle est définie l'énergie du photon émis. Le rapport de la largeur de la courbe et de la valeur de la fréquence varie de $1/10^6$ à $1/100$ selon les matériaux, ce qui fait d'un tel milieu un amplificateur à bande étroite.

l'encadré page 68). Lorsqu'un atome se désexcite, il émet un grain de lumière ou photon. Le milieu actif amplifie *de façon cohérente* les photons émis spontanément par les atomes : un tel photon arrivant sur un atome excité provoque – « stimule » – la désexcitation de cet atome, qui émet un photon identique au photon incident. On obtient ainsi deux photons ayant la même direction, la même longueur d'onde et la même phase. Ceux-ci à leur tour pourront provoquer la désexcitation d'autres atomes excités, créant en cascade un faisceau de photons identiques.

Ce phénomène d'émission stimulée diffère du processus à l'œuvre dans les sources de lumière ordinaires. Dans ces dernières, les atomes se désexcitent spontanément et indépendamment les uns des autres en émettant chacun un photon de direction et de longueur d'onde arbitraires. La lumière totale émise est alors la superposition de chacune de ces impulsions individuelles aléatoires, c'est-à-dire *incohérente*.

Mais le milieu actif ne fait pas un laser à lui tout seul. Sans la cavité optique qui l'entoure, il n'est qu'un simple amplificateur de photons. Habituellement formée



de deux miroirs parallèles, la cavité laser qui contient ce milieu est essentielle, car elle confine la lumière et favorise l'amplification du faisceau.

La cavité : un élément essentiel

C'est aussi la cavité qui confère au faisceau laser ses principales caractéristiques : sa longueur d'onde précise et sa directivité. Comme dans un résonateur acoustique (une cloche, un tuyau d'orgue ou une corde vibrante, voir l'encadré page 70), les fréquences de résonance de la cavité optique sont des multiples d'une fréquence fondamentale inversement proportionnelle à la longueur de la cavité, c'est-à-dire à la distance entre les deux miroirs.

Le rôle du milieu actif est de fournir le gain nécessaire à l'excitation de ces résonances – ou modes vibratoires du champ lumineux – en amplifiant suffisamment l'émission de photons dont la longueur d'onde correspond aux fréquences de résonance de la cavité. Une seule ou plusieurs de ces résonances pourront donner lieu à l'oscillation laser. Si une seule

d'entre elles est excitée, l'émission laser – dite alors monochromatique – présentera une très grande pureté spectrale correspondant à la fréquence de cette résonance. Même si plusieurs résonances sont simultanément excitées, cette pureté spectrale restera meilleure que celle des sources thermiques. La propriété associée à cette pureté spectrale est la *cohérence temporelle* : la fréquence d'oscillation de l'onde est tellement pure que le faisceau peut interférer avec lui-même sur de très longues distances, c'est-à-dire produire une alternance de franges brillantes et sombres bien définies.

La direction du faisceau laser est quant à elle fixée par l'axe des miroirs. La propriété qui se traduit par cette directivité du faisceau est la *cohérence spatiale* du laser ; elle aussi dépend de résonances provoquées par la géométrie de la cavité, mais cette fois dans les plans perpendiculaires à l'axe de la cavité et non le long de cet axe (voir l'encadré page 70).

L'effet laser est un phénomène à seuil. Pour que l'émission laser s'établisse, le gain du milieu amplificateur doit être supérieur aux pertes dans la cavité. Ces pertes peuvent être liées à l'extraction du faisceau

2. COMPARAISON d'un laser classique (a) et d'un laser aléatoire (c). Dans les deux cas, une source extérieure (ici un laser, en vert) excite les atomes d'un milieu actif, les faisant passer d'un état d'énergie E_i à un état d'énergie E_s (via un état intermédiaire E_{int} , b1). En se désexcitant spontanément (b2) ou non (b3), un atome émet un photon, qui peut rencontrer un autre atome excité et provoquer sa désexcitation. Cet atome émet alors un photon identique au photon incident (b3), qui pourra à son tour stimuler l'émission d'autres photons. Pour optimiser ce processus d'amplification, il faut allonger au maximum le parcours des photons dans le milieu amplificateur. Dans un laser classique, deux miroirs jouent ce rôle en obligeant les photons à effectuer des allers-retours (a). Dans un laser aléatoire, le rôle est tenu par un milieu diffusant, ici des microbilles immergées dans le milieu actif (c). Diffusés par les microbilles, les photons restent plus longtemps dans le milieu actif, qui les amplifie avant qu'ils ne s'échappent (d, e). L'émission laser (en rouge) n'est alors pas directionnelle, mais dépend de la géométrie de l'échantillon.

LES MODES VIBRATOIRES D'UNE CAVITÉ

La cavité laser formée par les deux miroirs parallèles est l'analogue optique d'une cavité acoustique telle qu'une corde vibrante fixée à ses deux extrémités. On sait que la mise en mouvement d'une telle corde se traduit par une superposition de modes de vibration. Qu'est-ce qu'un mode de vibration ? C'est une résonance naturelle de la corde. Si on excite celle-ci par une source monochromatique (de fréquence unique), la corde vibre à la fréquence de la source avec une amplitude qui dépend de la fréquence. Pour certaines valeurs de cette dernière, la réponse de la corde est particulièrement forte, avec une amplitude de vibration considérable par rapport à l'amplitude moyenne observée pour une fréquence quelconque.

La corde vibre préférentiellement à ces fréquences de résonance plutôt qu'à une fréquence quelconque. Il en est de même pour une cavité laser, où l'amplitude du champ lumineux joue l'équivalent de l'amplitude de vibration de la corde. Dans le cas de la corde, les fréquences de résonance sont des multiples d'une fréquence fondamentale qui est inversement proportionnelle à la longueur de la corde (a). Il en est de même pour les fréquences de résonance de la cavité laser, qui sont des multiples d'une fréquence fondamentale inversement proportionnelle à la longueur de

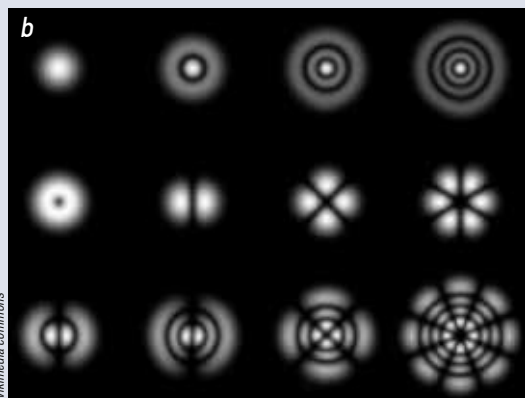
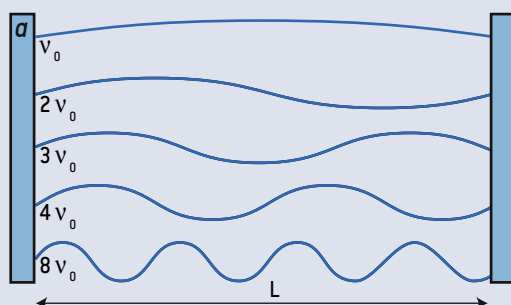
la cavité, soit à la distance entre les deux miroirs.

Cette fréquence fondamentale est aussi la différence des fréquences de deux résonances voisines. Plus la cavité est longue, plus cette différence est faible. Pour une cavité de longueur un mètre (laser à gaz), cette différence vaut 150 mégahertz, alors que pour une cavité de l'ordre de 100 micromètres (laser à semi-conducteur), elle est 10 000 fois plus élevée. Généralement, la différence des fréquences de deux résonances voisines est plus faible que la largeur du spectre de photons émis par le milieu amplificateur du laser. Plusieurs résonances peuvent ainsi être favorisées dans la cavité, ce qui conduit à un laser à plusieurs modes.

Ces résonances le long de la cavité sont nommées modes longitudinaux. Si l'analogie avec la corde vibrante permet de comprendre leur structure, elle ne peut décrire les variations transverses du champ, celles qui se produisent dans toute section perpendiculaire

à l'axe de la cavité. Liées à la section finie de la cavité, ces variations se traduisent par des modes transverses, caractérisés par leur profil spatial dans une telle section (b). Parmi ceux-ci, le premier (*en haut à gauche*) est celui dont les pertes par diffraction sur les bords des miroirs sont les plus faibles. Ce mode est en général caractérisé par un haut degré de corrélation de l'amplitude et de la phase des ondes dans une section transverse du faisceau. Désignée sous le nom de cohérence spatiale, cette propriété se traduit par la directivité du faisceau laser.

Le meilleur faisceau possible sera donc celui qui n'excitera qu'un unique mode longitudinal, et ce dans le premier mode transverse, ce qui lui assurera respectivement cohérence temporelle et cohérence spatiale. Soulignons que c'est la cavité qui confère au faisceau laser ses propriétés. Le rôle du milieu atomique n'est que de fournir le gain nécessaire à l'excitation des modes de cavité.



Comme les modes de vibration d'une corde de longueur L , les modes longitudinaux d'une onde lumineuse dans une cavité de longueur L sont des vibrations à des fréquences multiples d'une fréquence fondamentale ν_0 inversement proportionnelle à L (a). Les modes transverses d'une onde lumineuse dans une cavité (b) sont liés à la section finie de la cavité.

hors de la cavité (un des miroirs n'est pas parfaitement réfléchissant pour laisser sortir le faisceau laser), à la diffraction due à la taille finie des miroirs, à l'absorption ou à la diffusion sur des particules ou des obstacles présents dans la cavité. Cela se traduit par l'existence d'un seuil d'excitation à partir duquel l'émission laser se déclenche. Dans de nombreux lasers, le gain du milieu amplificateur est faible. Pour minimiser les pertes, on utilise des miroirs de sortie à fort pouvoir réfléchissant, de telle sorte qu'une très faible fraction du faisceau soit extraite de la cavité.

Ces considérations soulignent une préoccupation permanente des fabricants de lasers : pour améliorer les performances d'un laser, il faut la meilleure cavité possible en termes de minimisation des pertes. En particulier, toute impureté ou particule diffusante présente dans le milieu actif est nuisible au fonctionnement du laser.

La découverte du laser aléatoire

Si le rôle de la cavité dans un laser classique est si essentiel, comment un effet laser a-t-il pu être obtenu en l'absence de miroirs ? C'est pourtant bien ce qu'ont observé la physicienne Hui Cao et son groupe à l'Université Northwestern, à Chicago, en 1999, avec une poudre d'oxyde de zinc (voir la figure 3). D'autres équipes ont suivi avec divers systèmes actifs constitués de particules diffusantes.

Émise dès la fin des années 1960 par le physicien russe Vladilen Letokhov, l'idée d'un laser sans miroirs, fondé sur l'amplification de la lumière diffuse, est née dans le contexte des masers interstellaires. Des faisceaux micro-ondes intenses sont émis et amplifiés par les nuages de gaz qui entourent les étoiles en fin de vie. La diffusion possible des micro-ondes dans ces gaz, de même que celle des photons dans les poudres, allonge le chemin parcouru dans le milieu amplificateur, un peu comme le fait la cavité d'un laser classique. Ici, cependant, le milieu est complètement ouvert et la lumière finit par s'échapper librement par les bords.

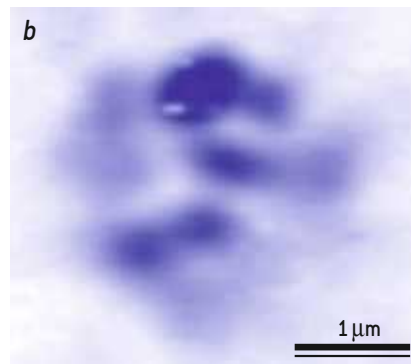
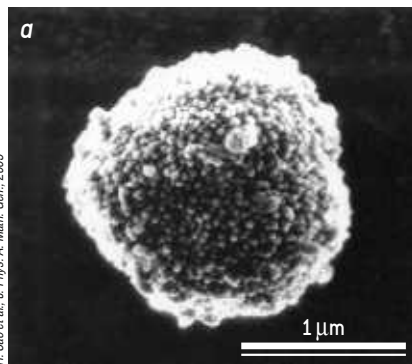
Par diffusion, les photons explorent tout le volume du milieu actif et la probabilité d'engendrer un nouveau photon par émission stimulée croît donc avec le volume. En revanche, les pertes sont proportionnelles à la surface qui entoure ce volume. Lorsque la taille du système augmente, le volume

croît plus vite que la surface. Il existe donc une taille critique au-delà de laquelle chaque photon parvient à en engendrer un autre avant de s'échapper du milieu. Cela déclenche une réaction en chaîne qui crée un nombre croissant de photons.

Les premières démonstrations expérimentales ont été réalisées dans des poudres de cristaux et dans des suspensions d'oxyde de titane (principal composant de la peinture blanche) ou dans une solution de colorant organique à fort gain. À chaque fois, la signature était la même : au-dessus d'un seuil d'excitation bien défini, on observait un rétrécissement spectral de l'émission lumineuse. En quelque sorte, le spectre d'émission du milieu actif se resserrait autour d'une fréquence, autrement dit d'une couleur particulière. Cependant, l'émission ne présentait pas les raies spectrales fines d'un laser conventionnel. L'effet observé semblait plutôt s'apparenter au phénomène d'amplification d'émission spontanée, observé par exemple lors de l'amorçage des lasers classiques, lorsque les résonances de la cavité n'ont pas encore été excitées : un photon spontanément émis par le milieu actif est amplifié par ce milieu, préférentiellement à la fréquence où le gain du milieu est maximal. Les observations expérimentales furent d'ailleurs qualifiées d'effet laser « avec rétroaction non résonante ». Et pour cause, en l'absence de cavité, les notions de résonance le long de l'axe ou perpendiculairement à celui-ci n'avaient *a priori* pas lieu d'être.

L'observation, en 1999, de raies laser étroites comparables à celles d'un laser classique dans des poudres d'oxyde de zinc excitées optiquement fut donc une surprise (voir la figure 3). Elle remettait en cause la compréhension acquise jusqu'alors : l'apparition de raies étroites signifiait que des résonances du système avaient été excitées. Mais de quelles résonances s'agissait-il en l'absence de cavité ? Les toutes premières interprétations s'orientèrent vers l'existence de résonances localisées, à l'intérieur du système désordonné. Pourquoi localisées ? Tout simplement parce qu'en étant localisées loin des bords, les résonances n'entraîneraient que de faibles fuites de lumière vers l'extérieur – suffisamment faibles pour que les résonances jouent un rôle similaire aux modes vibratoires d'une cavité classique à deux miroirs.

Comment, cependant, de telles résonances peuvent-elles apparaître dans ces systèmes diffusifs ouverts ? En fait, un tel



cas existe : il s'agit des systèmes diffusifs dans le régime de localisation d'Anderson. En 1958, l'Américain Philip Anderson a prédit qu'en présence de désordre spatial, la conduction électronique d'un métal pouvait s'annuler et le rendre isolant, ce qui lui a valu le prix Nobel en 1977.

Ce phénomène très général s'applique à tout type d'onde, en particulier la lumière : dans les systèmes très diffusants, la lumière est piégée dans une région finie de l'espace et ne se propage plus. Une telle région est caractérisée par sa taille, appelée longueur de localisation. Cette longueur diminue lorsque le système devient de plus en plus diffusant, par exemple lorsque l'on utilise des particules d'indice de réfraction de plus en plus élevé. Si la longueur de localisation est supérieure à la taille du système étudié, la lumière s'échappe par les bords du système avant de pouvoir être piégée par le désordre. Mais si la longueur de localisation est inférieure à la taille du système, la lumière ne peut plus s'échapper du système. Il existe alors, dans ce régime, des résonances similaires à celles d'une cavité à deux miroirs, mais de structures spatiales très différentes (voir la figure 8).

Des modes vibratoires sans cavité

La présence de telles résonances dans les systèmes diffusifs à gain pourrait expliquer l'apparition d'un spectre de raies étroites correspondant à l'excitation laser de ces modes. Un tel régime reste cependant difficile à atteindre en optique, car il exige des milieux très diffusants. L'analyse des échantillons utilisés dans les expériences de Hui Cao et dans d'autres expériences similaires a en outre montré que l'on se trouvait loin du régime de localisation d'Anderson. L'excitation de résonances localisées n'était donc pas à l'origine des raies laser observées. Face à cette énigme,

3. UN MICROLASER ALÉATOIRE constitué d'un agrégat d'environ 20 000 nanoparticules d'oxyde de zinc, observé en microscopie électronique (a). L'excitation optique des nanoparticules conduit à l'émission laser de l'agrégat dans l'ultraviolet (b).

✓ BIBLIOGRAPHIE

Ad Lagendijk et al., *Fifty years of Anderson localization*, *Physics Today*, vol. 62, pp. 24-29, 2009.

Hakan Türeci et al., *Strong interactions in multimode random lasers*, *Science*, vol. 320, pp. 643-646, 2008.

Randal Polson et Valy Vardeny, *Random lasing in human tissues*, *Applied Physics Letters*, vol. 85, pp. 1289-1291, 2004.

Hui Cao, *Lasing in random media*, *Waves in Random Media*, vol. 13, pp. R1-R39, 2003.

Hui Cao et al., *Random laser action in semiconductor powder*, *Physical Review Letters*, vol. 82, pp. 2278-2281, 1999.

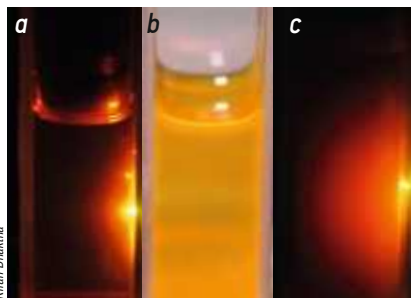
différentes hypothèses ont été avancées, comme l'existence de résonances accidentellement localisées, même loin du régime d'Anderson, ou encore l'amplification, le long de chemins de diffusion anormalement longs, de certains photons « chanceux ».

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).

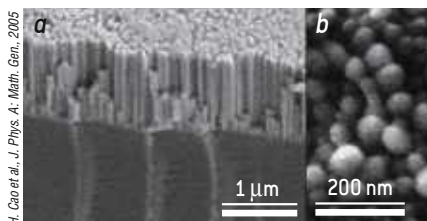
Une théorie englobant tous les lasers

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.

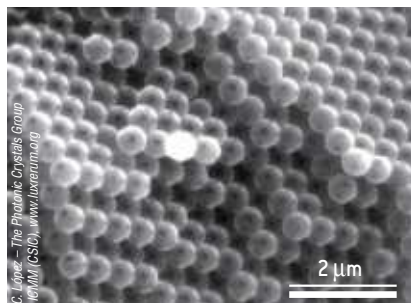
Cette approche leur a permis de proposer une nouvelle description, plus générale, des modes vibratoires laser, qui englobe le cas conventionnel des lasers à cavité, mais s'étend aussi aux nouvelles sources laser fortement ouvertes telles que les micro-disques (voir la figure 8a), les lasers distribués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



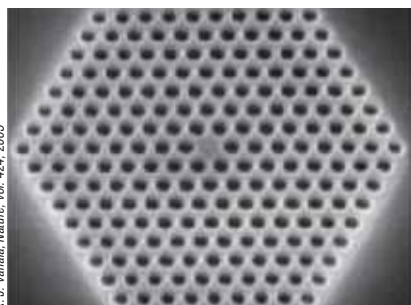
4. LASER ALÉATOIRE À COLORANT : le milieu aléatoire est une suspension de nanoparticules d'oxyde de titane dans un colorant [b]. Un faisceau laser vert excite le colorant qui réémet dans le rouge [c]. Sans les nanoparticules [a], il n'y a pas d'émission laser.



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 ...

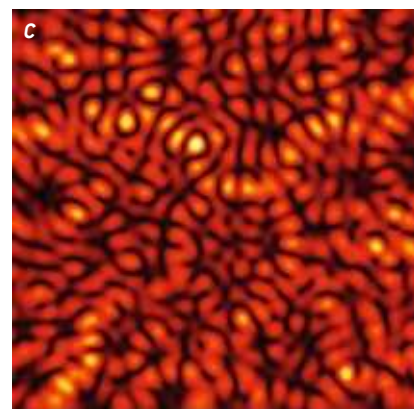
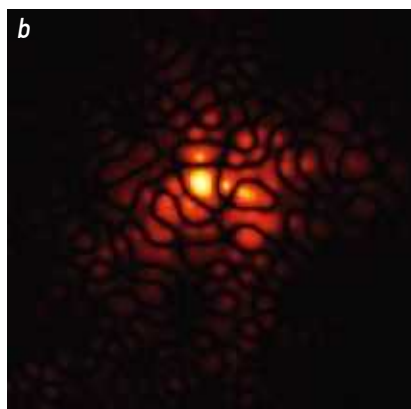
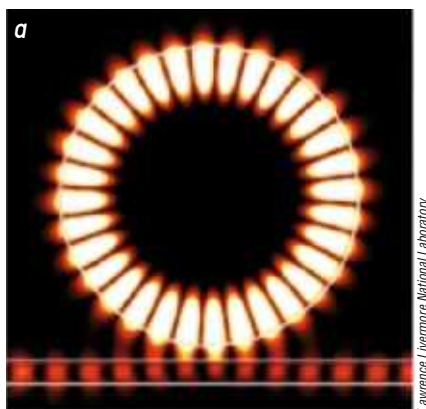
Qu'en est-il des propriétés de l'émission laser en l'absence de cavité ? Un laser aléatoire conserve une bonne cohérence temporelle, mais perd sa directivité. En effet, l'émission ne se fait plus selon une direction bien définie, mais dans toutes les directions de manière aléatoire. Cette perte de directivité 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



Lawrence 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. ■

Les esclaves des tombes néolithiques

A. Testart, Ch. Jeunesse, L. Baray et B. Boulestin

Les Européens d'il y a quelque 6 000 ans inhumait souvent plusieurs personnes en même temps. L'analyse de leurs tombes suggère qu'une ou plusieurs personnes dépendantes d'un personnage principal, sans doute ses esclaves, l'accompagnaient dans la mort.

L'ESSENTIEL

✓ Dans une large partie de l'Europe, on commence il y a quelque 6 000 ans à inhumier dans des tombes en fosses circulaires.

✓ Certaines de ces tombes contiennent plusieurs défunts enterrés simultanément.

✓ Tandis qu'un de ces défunts est enterré dans la position mortuaire alors conventionnelle, les autres semblent avoir été jetés là dans des positions aberrantes.

✓ La répétition de cette situation suggèrent que ces défunts secondaires accompagnaient dans la mort un défunt principal.

Benoît Clarys

