

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.

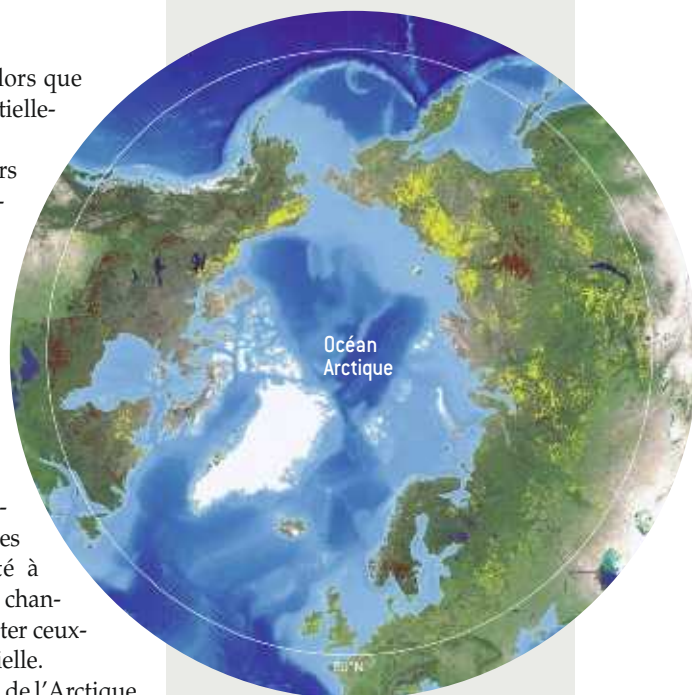
Les effets rétroactifs ne sont pas indépendants les uns des autres, ni des mécanismes de croissance estivale, de sorte que leur effet global est difficile à prévoir. Par exemple, les épaisses congères qui se forment près des arbustes devraient en principe mettre plus de temps à fondre que la neige plus 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:

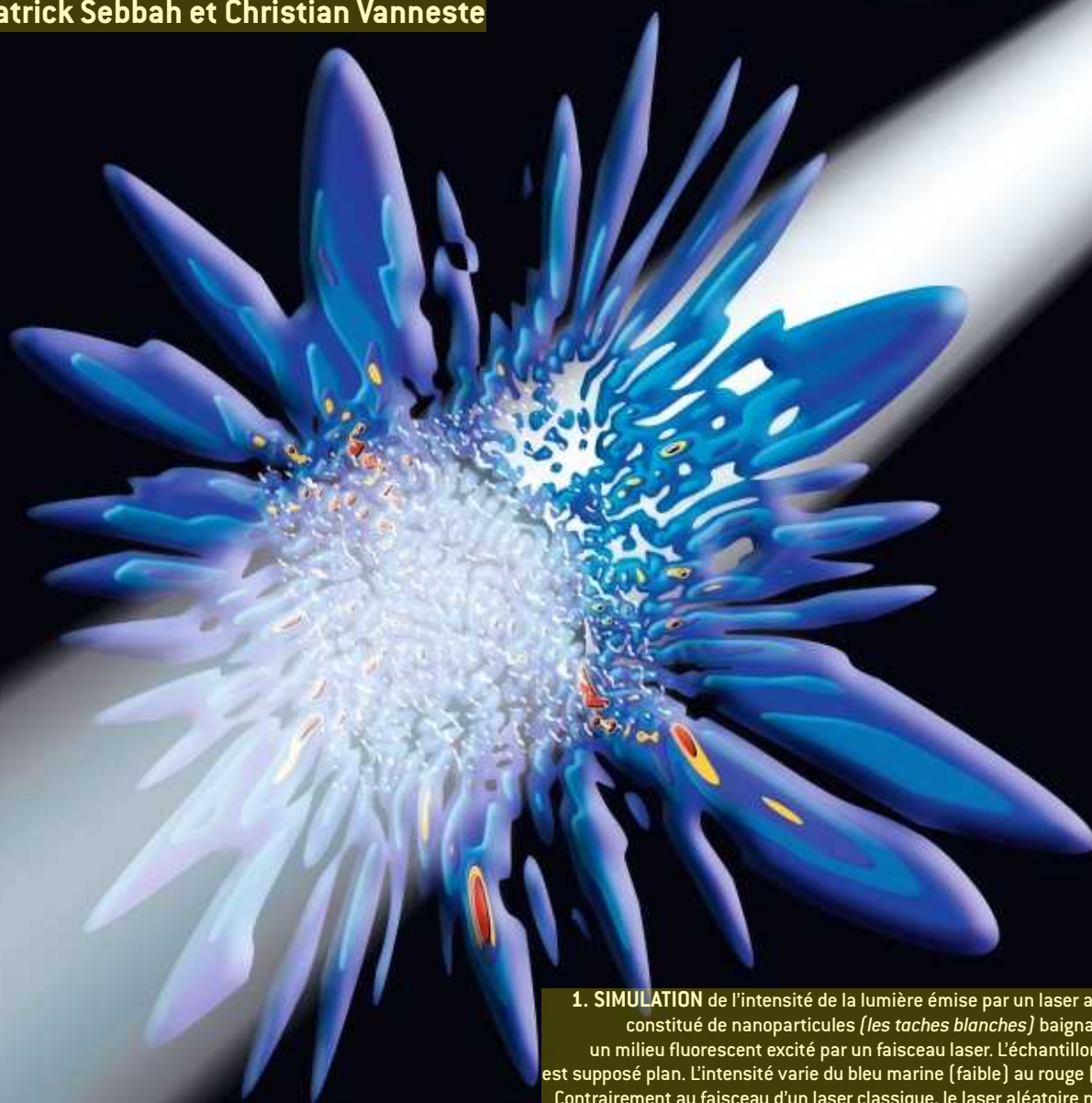
www.ResearchCareerFair.com



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.

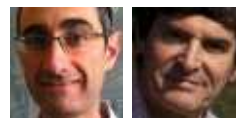
N és il y a tout juste 50 ans, les lasers ont envahi notre quotidien. Ils gravent et lisent nos DVD, impriment nos documents, découpent ou soudent les matériaux, réparent ou brûlent les tissus malades, transportent nos messages à travers les réseaux de fibres optiques... Autant de choses que la lumière 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'apparentant 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 ?

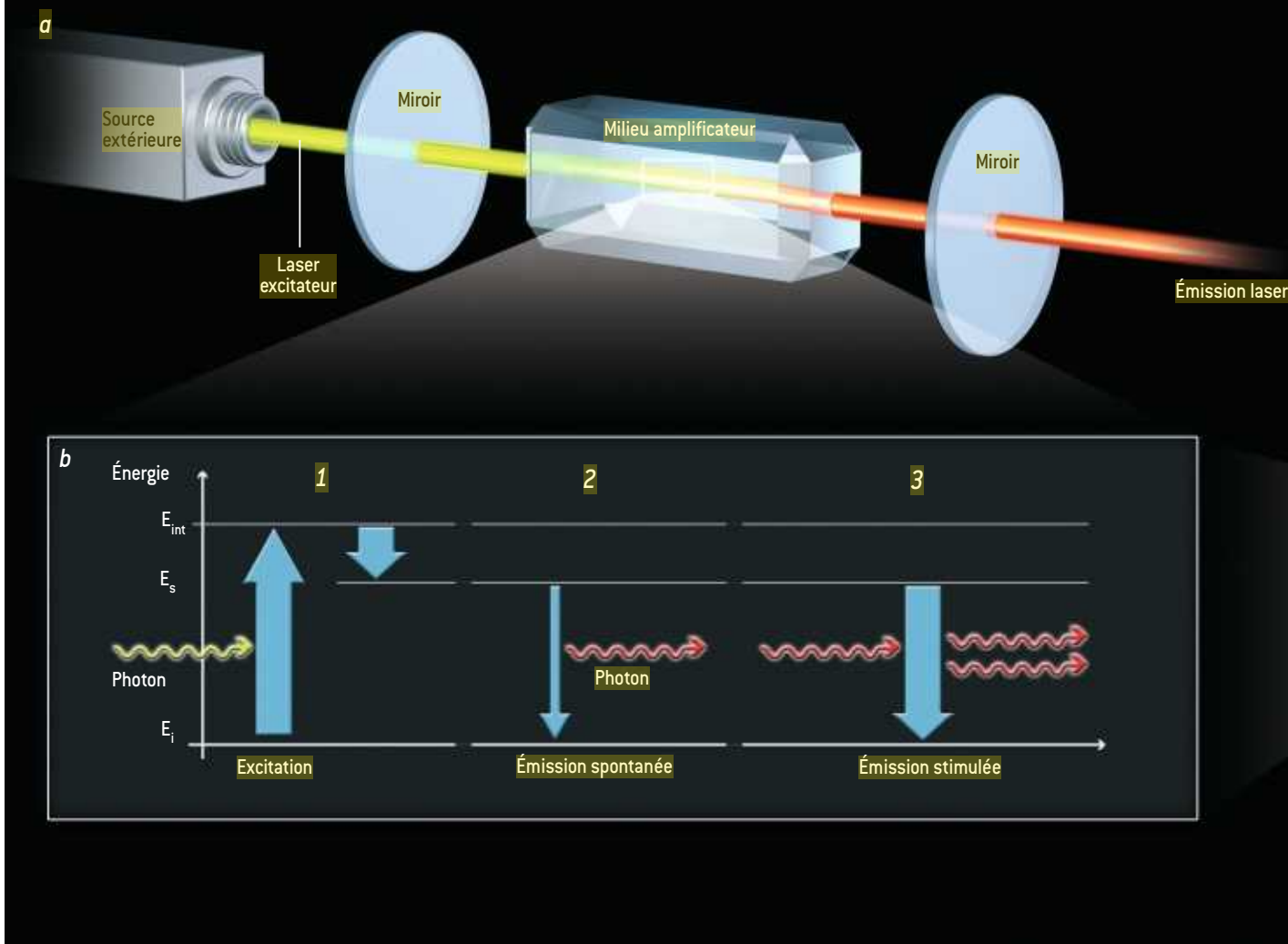
Dans un laser classique, les deux propriétés importantes de la lumière laser – sa pureté spectrale et la directivité de son émission – résultent de l'association du milieu actif et de la cavité optique (voir la figure 2). Comment, alors, obtenir une émission laser sans cavité ? Pour le comprendre, examinons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