

CHIMIE ET LASER

Éric Bausson

Parties des programmes de physique-chimie associées :

- Programme de physique-chimie de la **première générale**
Partie « Ondes et signaux »
- Programme de la spécialité physique-chimie de la **terminale générale**
Partie « Constitution et transformations de la matière »
- Programme de physique-chimie et mathématiques de la **première STI2D**
Parties « Énergie » et « Ondes et information »

MOTS-CLÉS : laser, applications, mesures, matière, énergie, femtochimie.

INTRODUCTION

Dans un précédent dossier « Chimie et lumière » que vous pouvez retrouver sur le site www.mediachimie.org, nous avons vu quelques interactions entre la lumière et la matière permettant la conversion d'énergie chimique en énergie de rayonnement et réciproquement.

La lumière mise en jeu dans ce premier dossier, qu'elle soit d'origine solaire ou non, présente un spectre polychromatique.

Dans ce nouveau dossier, nous allons nous intéresser à une source de lumière très particulière, celle des lasers.

Une conférence du colloque « Chimie et lumière » du 26/02/2020, intitulée « La chimie à la lumière : un intérêt réciproque », présentée par Sébastien Forget, est le fil conducteur de ce dossier où chimie et laser sont intimement liés.



Puissance des lasers © Pavel -Shutterstock

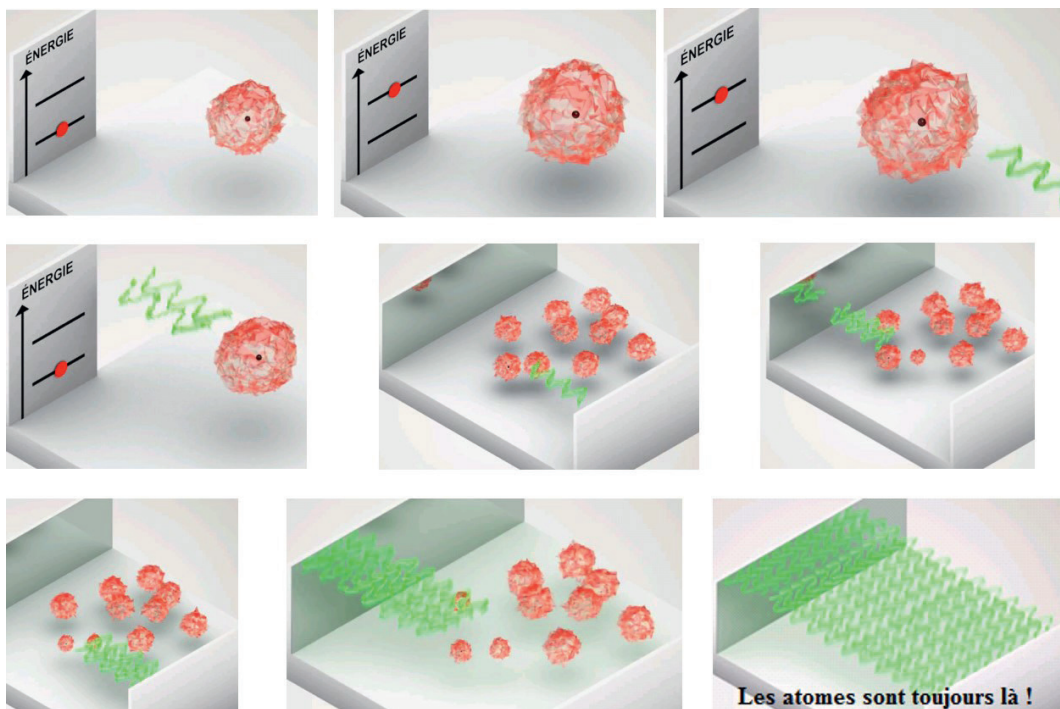
PARTIE A : La chimie pour le laser

Tout d'abord, l'acronyme « LASER » signifie « *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* » ou si vous préférez : « Amplification Lumineuse par Émission Stimulée de Rayonnement ». Le principe de l'émission stimulée de photons a été découvert en 1917 par Albert Einstein. Le premier laser a été inventé en 1960 par le physicien Théodore H. Maiman en utilisant du rubis (ci-contre), un cristal d'oxyde d'aluminium Al_2O_3 dopé au chrome avec des ions Cr^{3+} entre 0,04 et 0,05 % en masse. La couleur du rayon laser obtenu, située dans le rouge avec pour longueur d'onde 0,6943 micromètre, correspond ici à la différence d'énergie entre le niveau excité utilisé et l'état au repos des ions chrome Cr^{3+} présents.



Theodore H. Maiman
© Britanica

Une animation sur le laser, issue du site www.toutestquantique.fr, présentée dans la conférence de M. Forget, retrace les points essentiels de la création d'un faisceau laser comme celui inventé en 1960 avec du rubis solide. Ci-après, vous trouverez quelques copies d'écran de cette animation prises dans l'ordre chronologique. Les points clés sont explicités ensuite.



En excitant un atome, dont le nuage électronique est illustré ici en rouge, son énergie passe à un niveau plus élevé. Si un photon, illustré en vert, est dirigé vers lui, il retombe à un niveau d'énergie plus bas (il se désexcite). Il émet alors un photon strictement identique au photon incident. Dans un laser, les atomes placés entre deux miroirs, initialement dans leur état fondamental, sont excités (inversion de population). Par le jeu des réflexions sur les miroirs, d'autres atomes excités sont désexcités et émettent toujours des photons identiques. Le nombre de photons croît et ils ont tous la même énergie. Au niveau de la sortie, le miroir est semi-transparent. Quand l'intensité est suffisante, le faisceau laser peut sortir de la cavité.

Il s'agit d'une lumière monochromatique, très directive avec une concentration d'énergie dans un faible espace.

La chimie des matériaux intervient dans la nature des faisceaux laser produits donnant des propriétés très différentes.

Suivant la nature des matériaux utilisés pour l'émission stimulée de photons, nous avons trois types de laser :

- Les lasers à solide comme celui inventé en 1960 avec du rubis que nous venons d'aborder. Il en existe une multitude, comme celui contenant du grenat d'aluminium et d'yttrium ($Y_3Al_5O_{12}$) émettant principalement à 1 064 nm.
- Les lasers à gaz (hélium-néon, argon, dioxyde de carbone, etc.) :

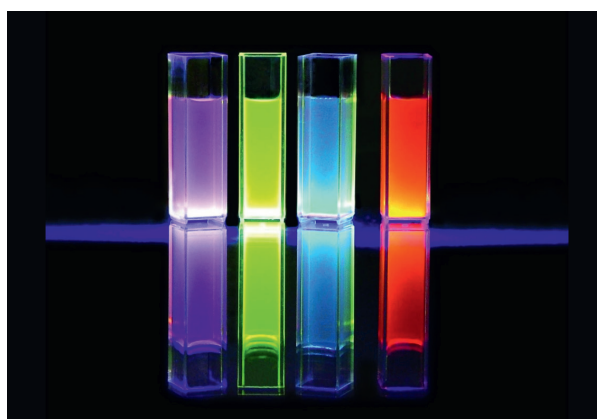
Les gaz sont portés dans l'état excité de façon directe par collision avec des électrons ou de façon indirecte par collision avec d'autres gaz, eux-mêmes excités électriquement. Les lasers à gaz couvrent tout le spectre de lumière, de l'infrarouge à l'ultraviolet, en émettant des raies très fines. Les lasers à CO_2 ont un rendement plus efficace que les autres, permettant par exemple en industrie de traiter des matériaux en surface, de les graver ou de les découper et d'effectuer des soudures. Ils sont aussi utilisés en chirurgie dermatologique et esthétique.



Découpe au laser – © Laser Tubes Normandie

- Les lasers à colorants :

Ils utilisent des molécules organiques diluées dans un solvant (éthylène glycol, méthanol, etc.) émettant en général dans le visible. Ces molécules organiques possèdent une multitude de niveaux d'énergie, la plupart du temps tellement serrés qu'on parle plutôt de bande d'énergie d'une cinquantaine à une centaine de nanomètres. Le mélange des lasers à colorant se dégrade dans le temps et doit être changé régulièrement. Ils sont très utilisés en recherche fondamentale et peu en industrie pour le moment.



Lasers à colorants

Activité 1

1 Dans un laser, quelles particules atomiques sont concernées par les transitions énergétiques ?

- protons électrons neutrons

2 Lorsqu'un photon est émis par un atome, que fait ce dernier ?

- il absorbe de l'énergie il cède de l'énergie

3 Dans un laser, quelles sont les propriétés des photons émis ?

- Ils ont la même fréquence. Ils n'ont pas la même fréquence.
 Ils sont en opposition de phase. Ils sont en phase.

4 Quelle énergie, exprimée en eV, est portée par un photon du laser au rubis inventé en 1960 ?

Données :

$$1,00 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J} \quad c = 3,00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1} \quad h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

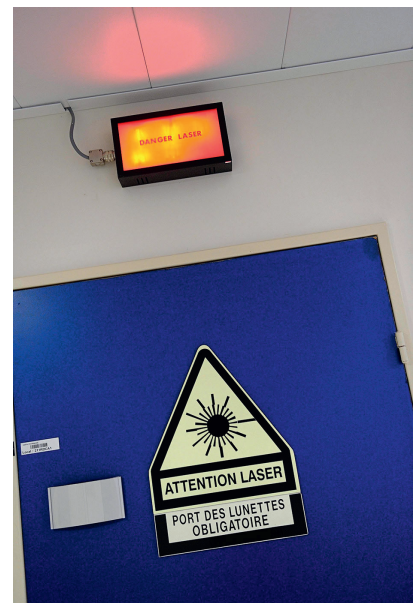
.....

Effets des lasers sur la santé

Le risque lié à l'utilisation du laser dépend du cheminement du faisceau dans le local où il est produit et de ses possibilités de réflexion et de diffusion. D'où l'intérêt de ne pas l'entourer de surfaces lisses et brillantes.

L'œil est l'organe le plus susceptible de subir des lésions causées par un faisceau laser. Le risque de lésions dépend de la puissance et de la longueur d'onde du faisceau laser. La fermeture réflexe des paupières n'est pas suffisante pour protéger les yeux de lésions éventuelles.

Source : I.N.R.S.



PARTIE B : Les lasers pour la chimie

L'étude de la matière à l'échelle des femtosecondes débuta dans les années 1980 aux laboratoires Bell (États-Unis) et de Palaiseau (France) avec des impulsions optiques femtosecondes délivrées par des lasers à colorants.



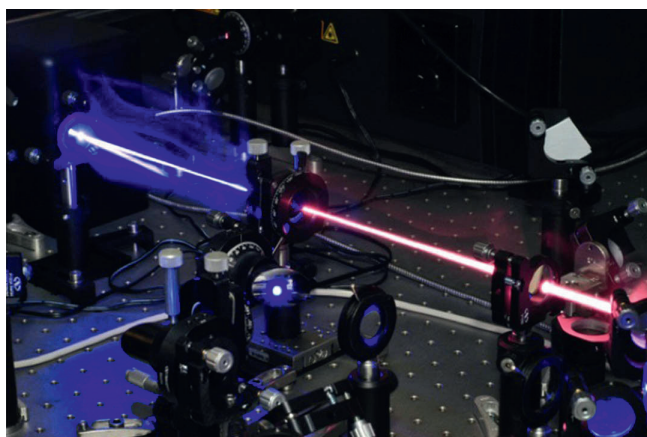
Remise du Nobel à Ahmed H. Zewail ©Nobelprize.org

En 1999, le chimiste égypto-américain Ahmed H. Zewail reçut le prix Nobel de Chimie. Ces travaux débutèrent en 1985 par l'étude des premières étapes de la rupture par la lumière du cyanure d'iode (ICN) entre les atomes I et C. Cette étude fut menée grâce à des impulsions ultra brèves délivrées par certains lasers, dits « femtosecondes (10^{-15} s) ».

Pour mettre en œuvre la « femtochimie », on utilise la technique « pompe-sonde », illustrée ci-après, avec deux faisceaux laser de même durée :

- celui d'un laser-pompe émettant une première impulsion lumineuse qui déclenche des événements chimiques (dissociation de molécules, éjections d'électrons ou d'ions, changement de l'architecture moléculaire, etc.) ;
- celui d'un laser-sonde émettant une seconde impulsion moins intense, décalée de quelques femtosecondes seulement par rapport à la première, qui permet de connaître l'état du milieu à cet instant.

En répétant ceci et en faisant varier le décalage temporel entre le laser-pompe et le laser-sonde, on dispose ainsi d'informations permettant de détecter par la suite certains intermédiaires réactionnels, de durées de vie très courtes, et ainsi de reconstituer chronologiquement le mécanisme réactionnel.



Dispositif laser-pompe / laser-sonde © toutestquantique.fr

Activité 2

Les lasers pulsés émettent des impulsions de durée Δt et de fréquence f réglables. Un laser pulsé est dit « femtoseconde » si la durée est de l'ordre d'une à quelques centaines de femtosecondes. Contrairement aux lasers continus qui produisent un rayonnement monochromatique, les lasers pulsés émettent un rayonnement polychromatique dans une bande de fréquence de largeur Δf assez fin. Les énergies des impulsions femtosecondes peuvent paraître faibles mais leur brièveté fait que la puissance instantanée du laser durant une impulsion peut atteindre plusieurs gigawatts dans l'industrie.

- 1 Calculer l'énergie délivrée par un laser pulsé de 1,0 GW pendant 100 femtosecondes.

.....

- 2 En considérant que tous les photons ont ici la même fréquence, valant 350 THz, calculer le nombre de photons nécessaires pour une seule impulsion.

Données :

$$1 \text{ G} = 1 \times 10^9 \quad 1 \text{ T} = 1 \times 10^{12} \quad h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

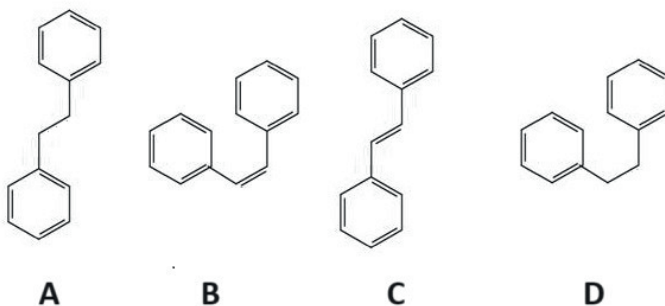
.....

Activité 3

On n'arrête pas le progrès, car après le laser femtoseconde, est apparu le laser attoseconde* (mille attosecondes valant une femtoseconde). Celui-ci permet de localiser les électrons sur des durées très brèves.

En partant d'une forme du stilbène où initialement les deux cycles benzéniques sont de part et d'autre de la double liaison centrale de cette molécule, on peut « voir » grâce à un laser attoseconde une délocalisation temporaire des électrons permettant le passage de la liaison double centrale à une liaison simple. On obtient finalement une autre forme du stilbène non superposable à la forme initiale.

Placer les quatre illustrations ci-dessous dans l'ordre chronologique.



Ordre chronologique :

* Les physiciens Pierre Agostini, Ferenc Krausz et Anne L'Huillier sont les lauréats du prix Nobel de physique 2023 pour leurs travaux de physique attoseconde (un milliardième de milliardième de seconde) et les impulsions laser ultrabrèves qui en découlent.

Les applications de la femtochimie ne se limitent pas à l'étude des mécanismes réactionnels (états de transition et dynamique des liaisons chimiques).

La femtochimie permet entre autres :

- de développer de nouveaux (nano)matériaux avec des propriétés spécifiques ;
- d'optimiser les cellules photovoltaïques en étudiant les processus photochimiques ;
- d'aider au développement de catalyseurs photochimiques ;
- de comprendre les processus qui influencent la qualité de l'air et le climat.

CONCLUSION

Les interactions entre les lasers et la chimie sont de nos jours très importantes et sources d'un très grand nombre de prix Nobel, soulignant ainsi les avancées scientifiques associées majeures.

La femtochimie, en permettant une observation et une manipulation des réactions chimiques à des échelles de temps extrêmement courtes, ouvre la voie à de nombreuses innovations scientifiques et technologiques. Mais la recherche n'en est pas restée là car les observations peuvent se faire à l'échelle de l'attoseconde (10^{-18} s), permettant d'étudier des molécules et le comportement des électrons dans la matière. Sera-t-il possible de diminuer encore l'échelle de temps des observations ?

Pour aller plus loin

- [Le laser en contexte industriel : une palette d'applications étonnantes](#) – Thierry Engel – colloque « [Chimie et lumière](#) » du 26/02/2020
- [Nouvelles techniques d'imagerie laser](#) – Mireille Blanchard-Desce – Mediachimie
- [Communiqué de presse](#) concernant l'attribution du prix Nobel de Chimie en 1999 à Ahmed H. Zewail
- [Un prix Nobel de Physique avec une petite molécule chimique](#) (article sur le prix Nobel de physique 2023) – Mediachimie
- [Livret pédagogique sur le laser](#) – C.E.A.
- [Impulsions lasers femtoseconde et attoseconde](#) – C.E.A.

Quelques questions autour de « [Chimie et lumière](#) » pour le Grand oral

- Quels traitements de surface peut-on effectuer avec un laser ?
- Comment le laser permet-il de mieux comprendre un mécanisme réactionnel ?
- Comment fonctionne un laser à colorants ?

Activité 1

1. Des électrons.
2. Il cède de l'énergie.
3. Ils ont la même fréquence et ils sont en phase.

$$4. E = \frac{h \times c}{\lambda}$$

avec $\lambda = 0,6943$ micromètre = $0,6943 \times 10^{-6}$ m

$$\text{donc } E = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{0,6943 \times 10^{-6}} \text{ J}$$

Or $1,00 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$ donc $E = 1,79 \text{ eV}$

Activité 2

1. Calculer l'énergie délivrée par un laser pulsé de $1,0 \text{ GW}$ pendant 100 femtosecondes.

Sachant que $E = P \times \Delta t$

$$\text{alors } E = 1,0 \times 10^9 \times 100 \times 10^{-15} = 1,0 \times 10^{-4} \text{ J} = 0,10 \text{ mJ}$$

Il s'agit bien d'une faible énergie comme indiqué dans l'énoncé.

2. En considérant que tous les photons ont ici la même fréquence, valant 350 THz , calculer le nombre de photons nécessaires pour une impulsion.

Comme on suppose que tous les photons ont la même fréquence, alors ils ont aussi la même énergie E_{photon} .

$$\text{Or } E_{\text{photon}} = h \times f \text{ avec } f = 350 \text{ THz} = 350 \times 10^{12} \text{ Hz.}$$

Donc le nombre N de photons vaut :

$$N = \frac{E}{E_{\text{photon}}} = \frac{1,0 \times 10^{-4}}{6,63 \times 10^{-34} \times 350 \times 10^{12}} = 4,3 \times 10^{14}$$

Activité 3

L'ordre chronologique est d'après l'énoncé : C - A - D - B