

La chimie à la lumière du laser : un intérêt réciproque

Sébastien Forget est maître de conférences à l'Université Sorbonne Paris-Nord, et chercheur au Laboratoire de Physique des Lasers. Il est spécialiste des lasers, et particulièrement de la physique des émetteurs de lumière organiques (OLED et lasers).

1 Introduction sur le laser

Le laser, une lumière particulière

La lumière des lasers est une lumière essentiellement artificielle : les lasers ont été créés par l'homme, ils n'existent pas

dans la nature¹. Ses propriétés sont très particulières : le laser émet un faisceau directif avec une lumière pure qu'on appelle une lumière

1. Il est néanmoins à noter que le phénomène au cœur des lasers, l'émission stimulée amplifiée, peut se trouver dans certains nuages stellaires.

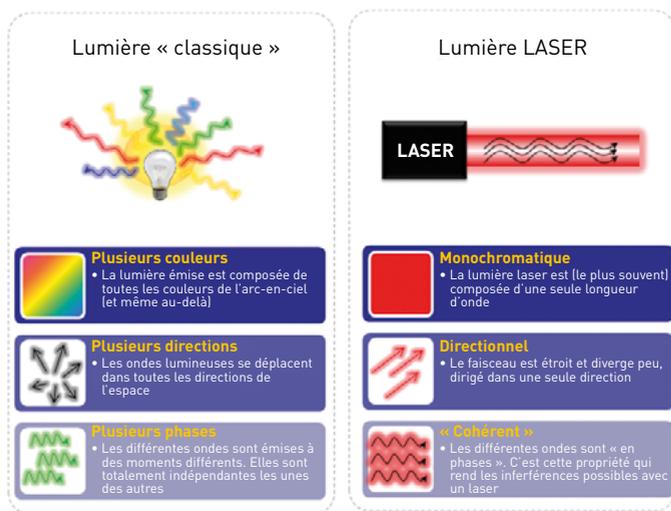


Figure 1

Différences et spécificités entre la lumière naturelle et le laser. La lumière émise par un laser est cohérente, directive et monochromatique.

Source : S. Forget.

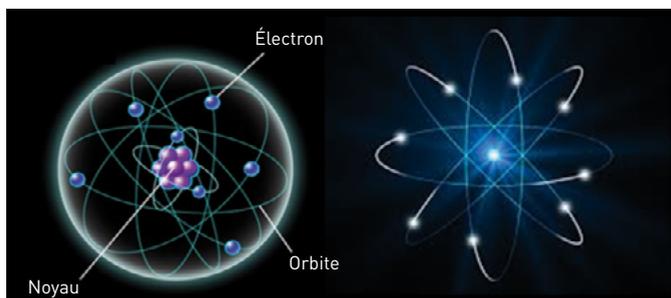


Figure 2

Un modèle très simplifié de l'atome.

« cohérente ». Plus précisément, cette lumière est la plupart du temps monochromatique, c'est-à-dire d'une seule couleur ; elle est directionnelle, donc d'une seule direction, et elle est « cohérente », ce qui veut dire que tous les photons du rayon laser ont une relation de phase entre eux, ils sont « liés » temporellement. Ces propriétés ont des conséquences très intéressantes (Figure 1), dont on peut citer deux principales :

- on peut focaliser la lumière sur une toute petite surface, la concentrer dans l'espace ;
- on peut faire des impulsions très courtes, c'est-à-dire concentrer la lumière dans le temps.

Ces deux aspects sont utiles, notamment pour l'étude de la chimie. On dit souvent que les lasers sont très puissants, mais ce n'est pas forcément vrai. En revanche, on peut concentrer cette puissance dans l'espace et dans le temps, et ainsi atteindre des « densités de puissance » (en Joules par seconde et par cm^2) colossales.

2 La chimie pour les lasers

2.1. Le principe du laser, une description simplifiée

Soit un atome dans son « état fondamental » (Figure 2), c'est-à-dire au repos. Que se passe-t-il lorsqu'il reçoit un photon d'une longueur d'onde appropriée ?

L'atome l'absorbe et passe dans un état qu'on appelle « état excité » (Figure 3) : c'est

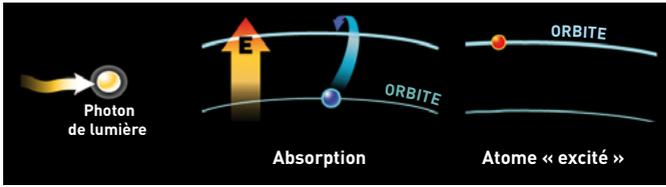


Figure 3

Comment la lumière permet l'excitation des électrons.

l'absorption de la lumière. L'atome placé dans un état excité évolue. Il peut redescendre naturellement dans l'état fondamental : c'est l'émission spontanée (la lumière que l'on observe classiquement avec les lampes habituelles).

Mais il peut se passer un autre phénomène, découvert par Albert Einstein en 1917, qui est l'émission stimulée. L'idée est la suivante : quand l'atome est dans son état excité (il a déjà absorbé un photon A), et, avant qu'il ne se désexcite, on lui envoie un deuxième photon B. Ce deuxième photon n'est pas absorbé mais stimule la désexcitation de l'atome, qui va donc redescendre en émettant un autre photon, C,

rigoureusement identique au photon B. On a donc affaire à l'émission de deux photons identiques : une sorte de photocopieuse à photon (**Figure 5**). C'est la base de l'effet laser.

Évidemment, cette expérience n'est pas réalisée avec un seul atome, mais avec des milliers et des milliers d'atomes qui constituent le milieu actif ; de surcroît, on place ce milieu entre deux miroirs pour multiplier le phénomène. Le « premier » photon en crée deux, qui vont en créer quatre, qui vont en créer huit, etc. À la fin, on a créé un ensemble de photons (un rayon) tous identiques : même phase, même direction, même couleur. Si on les fait sortir du milieu, on obtient un « rayon laser », et donc l'objet

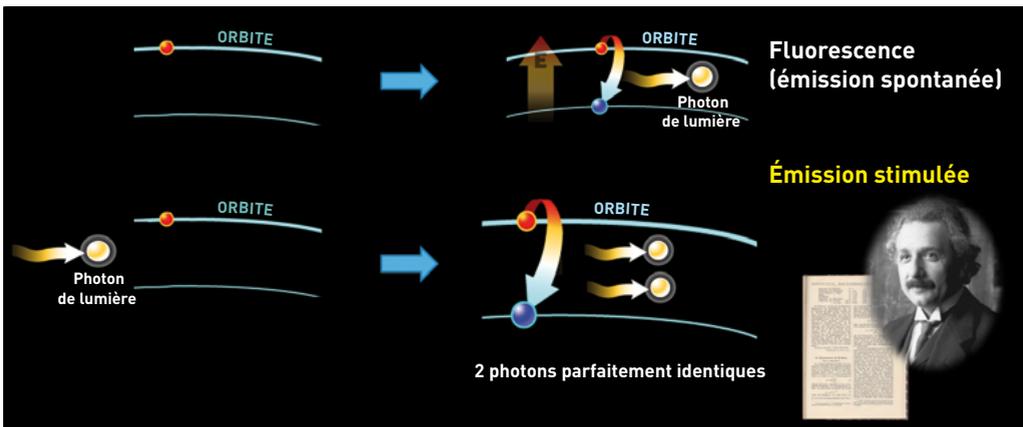
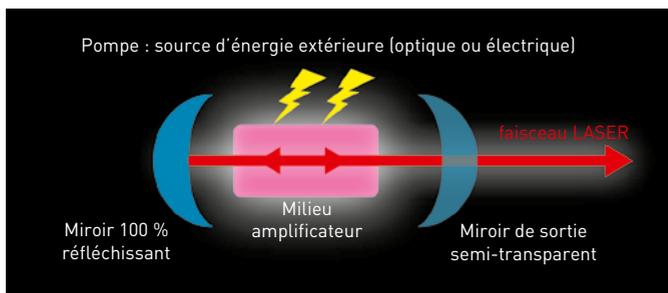


Figure 4

Les deux phénomènes possibles lors de l'excitation d'un électron : la fluorescence (en haut) et l'émission stimulée (en bas), découverte par Albert Einstein.

Figure 5

Fonctionnement d'un laser grâce aux miroirs.



laser dont on connaît tous des exemples (Figure 5).

Les propriétés spécifiques d'un laser dépendent de l'atome présent dans le milieu actif choisi. C'est ce choix qui détermine presque toutes les propriétés du laser (avec le choix des miroirs). Inversement, on choisit l'atome actif en fonction des propriétés d'usage pour lesquelles on souhaite utiliser le laser. Le choix de l'atome est pratiquement illimité, on peut utiliser à peu près tout ce que la nature offrir. On peut utiliser des gaz : cela va donner des lasers très fins spectralement, par exemple. On peut utiliser des lasers à solides, souvent plus pratiques ; on peut utiliser des lasers émettant dans le visible, dans l'infrarouge, des semi-conducteurs (les diodes lasers)... On peut aussi, à la place des atomes individuels, utiliser des molécules, comme les molécules de colorants, qui vont permettre un large choix de longueurs d'onde, donc de couleurs, etc. Tout vient du milieu amplificateur utilisé.

2.2. Petit retour historique

Le laser a été inventé en 1960 par Theodore Maiman (Figure 6), un physicien qui avait bien compris comment fonctionnaient les matériaux

qu'il utilisait, en particulier le rubis, un cristal d'alumine (Al_2O_3) contenant du chrome, grâce à des collaborations très fortes entre les spectroscopistes² et les physico-chimistes.

Dans les mois suivants, beaucoup d'autres lasers, à gaz, à liquide, etc., ont aussi été réalisés. Depuis, il y a eu bien des progrès, mais les bases étaient jetées.

2.3. Le laser est-il une arme ?

Dès l'origine du laser, s'était posée la question « est-ce qu'avec un laser on peut faire une arme ? ». C'était peut-être de la science-fiction : le « rayon de la mort » (HG Wells, Buck Rogers...) est dans les esprits depuis longtemps, à la mode à l'époque, et en 1963, juste trois ans après l'invention du laser, James Bond est déjà menacé par un laser dans *Goldfinger* !

En fait, loin de la science-fiction, la réponse est qu'on peut effectivement faire des armes avec le laser. On met au point pour cela un laser



Figure 6

En 1960, le physicien Theodore Maiman inventait le laser.

2. Les « spectroscopistes » travaillent dans le domaine de la spectroscopie, c'est-à-dire l'étude des spectres (lumineux, sonores...).

chimique en utilisant un mélange de fluor et d'hydrogène. La réaction entre ces deux gaz donne du fluorure d'hydrogène (HF) à l'état excité ; on place le milieu entre deux miroirs, et cela fait notre laser. La puissance de ces lasers peut atteindre 2 mégaWatts en continu, ce sont les plus puissants du monde. Le rayonnement émis, de longueur d'onde infrarouge, est absorbé par l'atmosphère et ne peut donc se propager. Pour contourner cette difficulté, on remplace l'hydrogène par sa forme isotopique, ^2H (le deutérium, D). Les américains ont utilisé ce laser ; ils l'ont mis dans un avion, comme indiqué sur la **Figure 7**, où l'on voit le nez de l'avion qui tire le laser pouvant détruire des satellites ou des missiles ennemis si nécessaire.

En fait, les expériences utilisant ce laser, réalisées dans les années 1990, ont été arrêtées car on s'est rendu compte que pour avoir la puissance destructrice, il fallait consommer plusieurs kilos d'hydrogène et de fluor en

permanence, par seconde, soit une énorme bombe volante peu maîtrisable. La vérité est que parmi toutes les applications du laser, l'utilisation de celui-ci comme une arme est sans doute finalement une des moins pertinentes !

2.4. Impact scientifique et applications du laser

D'autres types de lasers chimiques sont beaucoup plus pacifiques, à savoir les lasers organiques. Ces lasers sont basés sur les propriétés optiques de molécules organiques, comme la chimie sait en faire et en étudier (**Figure 8**). On place un milieu conditionnant de telles molécules entre deux miroirs et on en sort rayonnement très intéressant parce que de longueur d'onde ajustable (**Encart : « La chimie et les lasers à colorants »**).

Les applications des lasers sont nombreuses en physique appliquée, pour la fusion par exemple ou dans l'industrie. Ils sont de plus en plus employés en médecine notamment. Pour apprécier l'importance

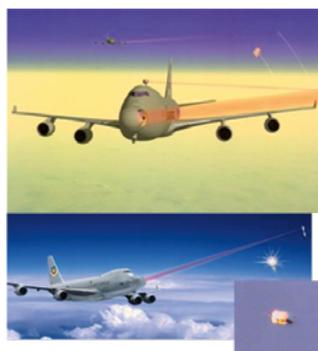


Figure 7

L'avion à arme laser, l'un des exemples de militarisation du laser.

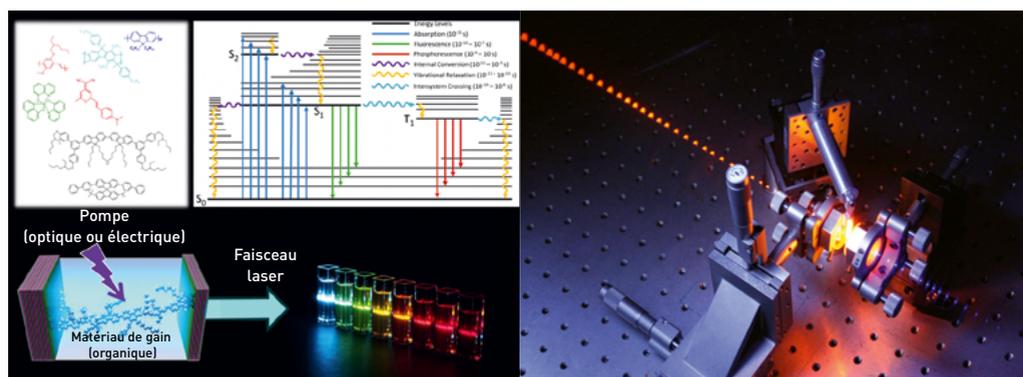


Figure 8

Les lasers organiques : plus de complexité pour une plus grande variabilité des couleurs et des applications.

LA CHIMIE ET LES LASERS À COLORANTS

Les chimistes savent réaliser toutes sortes de molécules organiques. On peut en faire des centaines, des milliers, on peut modifier un petit cycle carboné, introduire des substituants, varier les compositions en atomes de façon infinie !

Une molécule organique peut exister dans une multitude de niveaux d'énergie. On a des niveaux de vibration de la molécule, on a des niveaux de rotation de la molécule, on a quantité de niveaux d'énergie électronique (niveaux singulets¹, niveaux triplets², etc.), suivant les orbitales occupées par les électrons de la molécule. Cela permet en particulier de concevoir et réaliser des lasers dans n'importe quelle couleur du spectre visible. Selon les applications, on peut cibler une longueur d'onde particulière ; pour certaines utilisations, on pourra faire des petits lasers compacts et aisément manipulables. Cependant, ces lasers ne pas puissants parce que les molécules organiques se détruisent facilement.

1. Niveau singulet : état stable où l'atome a tous ses électrons appariés.
2. Niveau triplet : état instable et réactif dû à la présence d'électrons célibataires.

Tableau 1

Le laser, un domaine capital des sciences d'aujourd'hui, comme en témoigne la liste des prix Nobel en rapport avec cette technologie.

1964 : Alexander Prokhorov, Chales Townes, Nicolay Basov : principe du « maser-laser »
1966 : Alfred Kastler : pompage optique
1971 : Dennis Gabor : holographie
1981 : Nicolaas Bloembergen et Arthur Schawlow : spectroscopie laser
1989 : Normam Ramsey : horloges atomiques
1997 : S. Chu, C. Cohen-Tannoudji et W. Phillips : refroidissement d'atomes par laser
1999 : Ahmed Zewail (chimie) : femtochimie
2000 : Zhores Alferov, Herbert Kroemer : diodes laser à hétérostructures
2001 : Eric Cornell, Wolfgang Ketterle et Carl Wieman : condensation de Bose-Einstein
2005 : Theodor Hänsch : métrologie laser (peignes de fréquence)
2012 : Serge Haroche, David Wineland : optique quantique
2014 : D. Hell (chimie) : microscopie STED
2018 : A. Ashkin, G. Mourou, D. Strickland : pinces optiques et lasers ultra-brefs

du laser, en particulier en recherche fondamentale, le **Tableau 1** donne la liste des prix Nobel en lien avec le laser, qui sont nombreux, jusqu'à celui de Gérard Mourou et Donna Strickland en 2019 sur les lasers ultra-brefs. Deux de ces prix Nobel sont des prix Nobel de chimie.

3 Les lasers pour la chimie

3.1. Pourquoi utiliser des lasers en chimie ?

La chimie est, selon le dictionnaire Larousse, la « *partie des sciences physiques qui étudie la constitution atomique et moléculaire de la matière et les interactions spécifiques de ses constituants* ». Ce sont pour ces thématiques que le laser va jouer un rôle, pour décrypter comment se passent les réactions chimiques, comment est constituée une molécule, etc.

On examinera, dans l'ordre :

- 1 comment le laser peut servir à observer des molécules ;
- 2 comment il peut servir à agir sur une réaction ;
- 3 comment il peut modifier de la matière, la créer, la détruire.

3.2. Les lasers pour observer l'infiniment petit, en espace et en temps

Selon Ahmed Zewail, prix Nobel de chimie 1999, l'un des principaux objectifs des chimistes est de comprendre l'alchimie qui conduit à la construction et à la brisure de molécules. Les réactions chimiques sont souvent vues

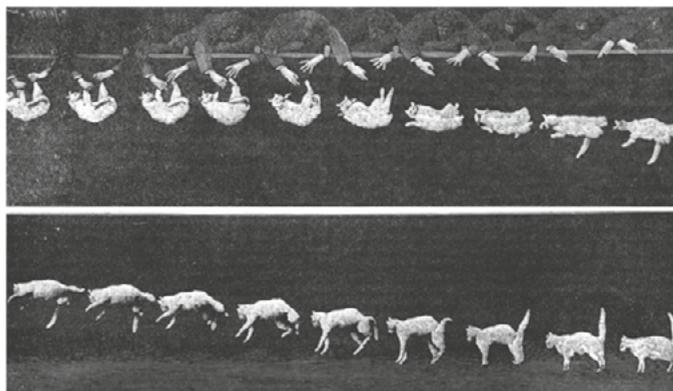


Figure 11

Comment étudier un mouvement complexe ? La photographie au secours de l'étude de la chute d'un chat par Étienne-Jules Marrey.

Source : Marrey É.-J. (1894). *Nature*, 1119.

Cette exploration des échelles spatiales se fait de façon courante avec des techniques optiques (microscopes divers et variés). Mais il y a également lieu d'explorer les échelles temporelles : on va devoir étudier des choses qui vont de la seconde à la femtoseconde (10^{-15} seconde). Un exemple à l'échelle macroscopique : l'analyse de la chute d'un chat. On la réalise en prenant des photos, comme l'illustre la **Figure 11**, publiée en 1894 par Étienne-Jules Marrey, un physicien et physiologiste français. Sa série d'une vingtaine de photos montre comment on peut voir le chat tomber petit à petit. Aujourd'hui, on utiliserait une caméra classique,

à vingt-quatre images par seconde, qui permettrait de voir le chat se retourner, même de voir vraiment la torsion de sa colonne vertébrale !

Pour des phénomènes très rapides, on peut maintenant (si on a de l'argent) utiliser des caméras à plusieurs milliers d'images par seconde, qui permettent grâce à des super ralentis de voir par exemple des phénomènes hydrodynamiques complètement invisibles à l'œil nu, comme ce qui se passe quand on tire une balle de pistolet dans l'eau (**Figure 12**).

Les progrès réalisés en passant de vingt-quatre images par seconde à 27 000 images par seconde sont extraordinaires et ouvrent de toutes nouvelles possibilités. Mais pour la chimie, on est immensément loin de ce qui serait nécessaire.

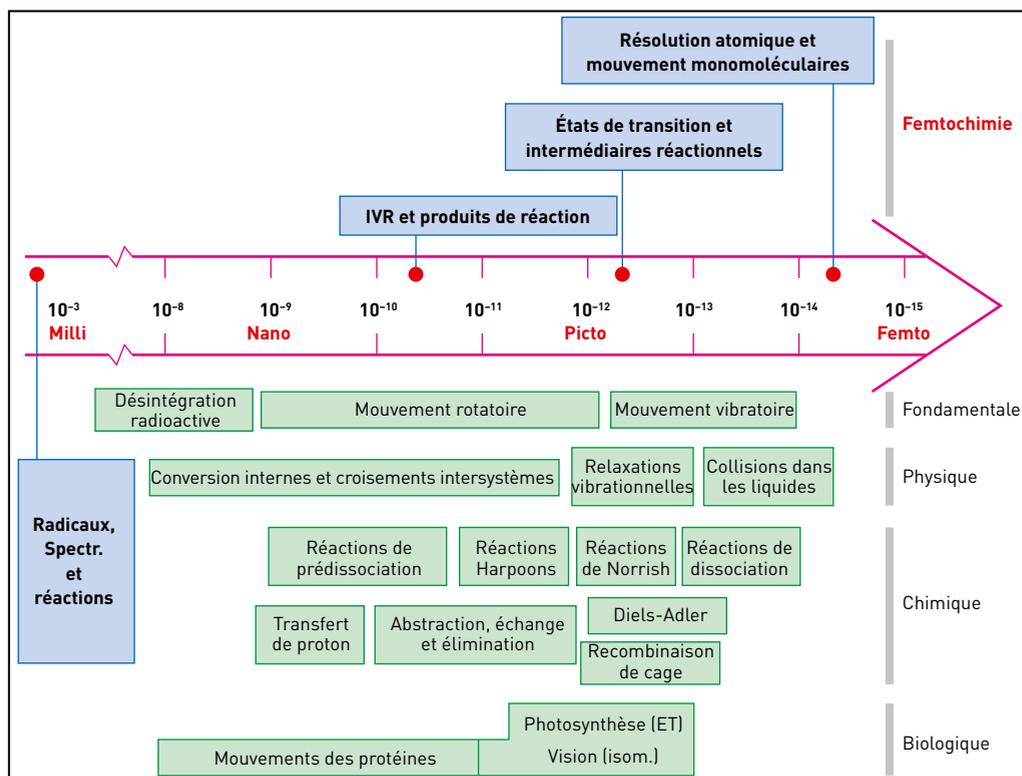
Pour comprendre vraiment comment bouge l'atome, il faut descendre à l'échelle de la femtoseconde, soit 10^{-15} seconde, ou 0,000000000000001 seconde. Les réactions chimiques se passent effectivement dans ces échelles de temps : 10^{-15} ,

Figure 12

Des caméras 27 000 images/secondes rendant l'invisible visible (*Underwater Bullets at 27,000 fps - The Slow Mo Guys*).

Source : <https://youtu.be/OubvTOHWTms>





10^{-14} , 10^{-13} . Les vibrations des atomes des molécules, les collisions, la photosynthèse, etc., se passent aussi dans ce domaine temporel (Figure 13). On a donc été amenés à développer des systèmes capables d'émettre de la lumière avec des temps aussi courts ; cela a donné naissance à ce qu'on appelle la « femtochimie », développée par Ahmed Zewail (Figure 14).

Le principe de la femtochimie et sa réalisation sont relativement simples. On conditionne les molécules dans un jet moléculaire, et on envoie sur le jet deux faisceaux laser. Un premier va exciter la molécule, et, peu de temps après, un deuxième laser envoie une impulsion (l'impulsion sonde) pour photographier l'état de

la molécule, fournissant une information dépendante de l'intervalle entre pompe et sonde (mesures résolues en temps). En faisant varier le délai entre excitation et exploration, on construit un film qui décrit le mécanisme réactionnel (Encart : « Le principe de la femtochimie en vidéo »)

3.3. Une application à l'étude du mécanisme de la vision

L'étude du mécanisme de la vision *via* le rétinale donne une belle illustration de la puissance de ces techniques nouvelles « résolues en temps ». La Figure 16 résume le fonctionnement de la vision. La rétine est située au fond de l'œil (Figure 16A) ; elle contient des cellules photosensibles,

Figure 13

Échelles de temps, de la milliseconde à la femtoseconde, changements physiques, chimiques et biologiques. Les échelles de temps des réactions chimiques ou la nécessité de mettre la femtochimie en œuvre.



Figure 14

Ahmed Zewail, père de la femtochimie et prix Nobel de chimie en 1999.

LE PRINCIPE DE LA FEMTOCHIMIE EN VIDÉO

La vidéo permet des présentations pédagogiques hors pair, en particulier pour les phénomènes dynamiques qui sont l'essence même de la chimie (voir : <https://youtu.be/mFKmmR5Hh5s>).

La femtochimie s'appuie sur le conditionnement des molécules sous forme de jets moléculaires. Un « laser pompe » marque le milieu moléculaire par une brève impulsion ; une impulsion créée par le « laser sonde » vient mesurer l'évolution du système en fonction du temps. On obtient un film de l'évolution du système moléculaire, de l'origine de la réaction à sa fin (Figure 15).

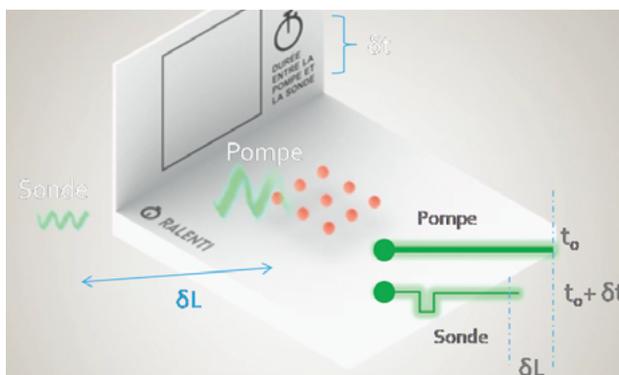


Figure 15

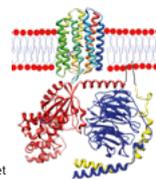
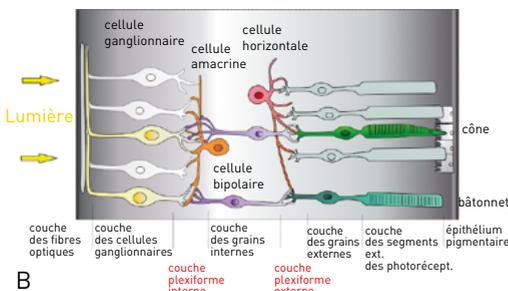
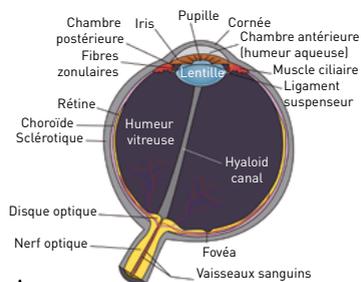
Comment la technique pompe-sonde fonctionne-t-elle ?

Source : <https://youtu.be/mFKmmR5Hh5s>

Petit point technique : comment procède-t-on pour faire un écart de quelques femtosecondes entre deux impulsions lasers ? Ce n'est pas difficile : la vitesse de la lumière étant $3 \cdot 10^8$ mètres par seconde, en 10 femtosecondes la lumière parcourt trois microns (10^{-6} mètre). Donc il suffit de faire parcourir à la pompe et à la sonde des chemins différents, ici on met un petit détour de 3 microns, et on a un décalage à la fin de 10 femtosecondes. Pour faire 20 femtosecondes on fait 6 microns de décalage, etc. Cela se fait aisément en optique avec des miroirs.

Figure 16

- A) L'œil et sa rétine au fond ;
- B) les cellules composant la rétine ;
- C) la rhodopsine.



des cônes pour la vision de jour et des bâtonnets pour la vision de nuit (**Figure 16B**) ; à l'intérieur de ces bâtonnets se trouvent les protéines « rhodopsines⁵ » (**Figure 16C**), avec leurs structures en hélices alpha⁶ ; à l'intérieur de ces protéines se trouve la molécule « rétinale » (**Figure 17**), qui est une variante de la vitamine A. Le rétinale présente une configuration *cis*⁷ et une configuration *trans*, et c'est en passant de l'une à l'autre que le mécanisme de la vision est initié : quand un photon arrive, il la fait basculer (**Figure 17A** : forme *trans*, **Figure 17B** : forme *cis*).

Ce phénomène de transition *cis/trans* du rétinale a été étudié par la technique pompe-sonde mise en œuvre avec un rayonnement X. Les résultats ont fait l'objet d'une vidéo de ce phénomène, qui se passe en quelques femtosecondes et sur quelques dixièmes d'Angströms.

L'échelle de la femtoseconde est bien adaptée pour voir les atomes et les molécules. Mais qu'en est-il quand on veut étudier les électrons, si essentiels pour la chimie ? La réponse est que la femtoseconde est alors insuffisante, les électrons étant beaucoup trop mobiles.

5. Rhodopsine : protéine produite dans l'œil, elle est aussi appelée « pourpre rétinien ».

6. Hélice alpha : structure en hélice particulière observée dans les protéines.

7. Configuration *cis/trans* : configuration géométrique d'une molécule dans laquelle les groupes prioritaires sont du même côté d'une double liaison carbone/carbone (*cis*) ou de deux côtés inverses de la double liaison (*trans*).

Il faut descendre encore un étage et aller à l'attoseconde, c'est-à-dire à 10^{-18} seconde (**Figure 18**), la plus courte durée jamais atteinte. Pour se rendre compte de la brièveté d'une attoseconde, on peut retenir la phrase suivante : « *il y a autant d'attosecondes dans une seconde que de secondes depuis le début de l'univers* ».

On atteint ces durées également grâce au laser ; le record actuel est autour de 43 attosecondes, ce qui ouvre des perspectives pour l'observation des phénomènes électroniques.

3.4. Le laser pour agir sur les molécules et les réactions chimiques

La lumière agit sur les molécules ; l'expérience quotidienne de la conservation des produits le montre, et la lumière laser le fait de façon toute particulière (**Figure 19**).

L'objectif du chimiste est souvent de maximiser la formation d'un produit ou d'en minimiser la formation d'un autre. Il obtient ses résultats en agissant sur les paramètres extérieurs de la réaction chimique, le pH, la température, la pression, etc., et en observant. C'est une façon relativement passive de faire les choses ; agir avec la lumière est plus actif. Utiliser un laser comme source lumineuse est particulièrement intéressant. L'objectif typique est de casser une liaison spécifique au sein d'une molécule (sans toucher aux autres) afin de comprendre les phénomènes ou d'optimiser des réactions.

Irradier le système par un rayonnement « normal »,

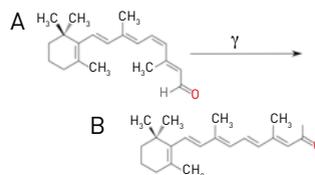


Figure 17

La molécule de rétinale, initiatrice du mécanisme de la vision, est au cœur des rhodopsines.



Figure 18

L'attoseconde, les plus courtes durées jamais atteintes par l'homme.

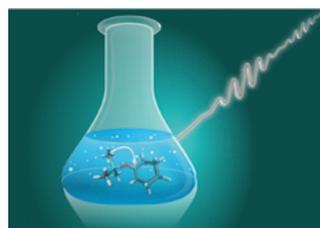


Figure 19

Des lasers pour agir sur la matière ?

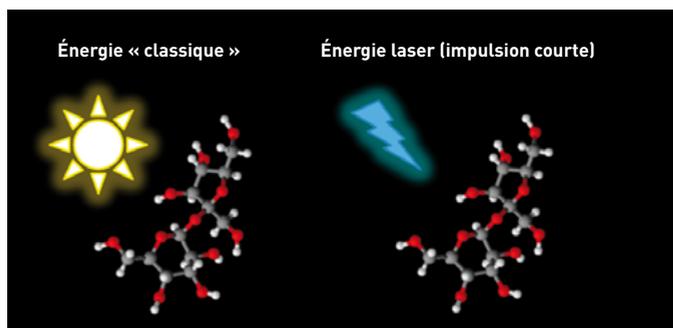


Figure 20

Contrôler des réactions chimiques par laser ? Avec l'énergie classique, l'énergie se répartit très rapidement sur toute la molécule, alors que le laser permet « cibler » une liaison particulière (une fréquence = une liaison) et la casser.

donc polychromatique, est susceptible d'affecter toutes les liaisons ; on ne va pas pouvoir choisir la liaison visée. Le résultat recherché, l'excitation spécifique d'une liaison déterminée, ne sera donc pas atteint. Les liaisons les plus fragiles seront cassées plus tôt. Un laser permet de sélectionner une liaison précise, en choisissant la fréquence de la lumière égale à la fréquence de vibration de la liaison à casser. Si en plus on apporte l'énergie lumineuse pendant un temps très court, elle n'a pas le temps de se dissiper et cassera la liaison ciblée avec efficacité (Figure 20).

3.5. Le laser pour modifier la matière

Un laser peut permettre de concentrer la lumière pour obtenir des densités d'énergie lumineuse très importantes. En effet, même avec une quantité d'énergie modeste (quelques Joules par exemple), on a vu qu'il était possible de la délivrer sur de très petites durées, ce



Figure 21

Les prix Nobel Gérard Mourou et Donna Strickland pour la réalisation de l'amplification à dérive de fréquence (CPA).

qui conduit à des puissances (en Watts, c'est-à-dire un nombre de Joules par seconde) tout à fait colossales. La cohérence du faisceau lumineux permet ensuite la focalisation du faisceau sur de très petites surfaces (de l'ordre de la longueur d'onde) : la densité de puissance (Watts par m²) peut alors atteindre des chiffres difficilement imaginables. C'est au point que, dans les années 1980, on n'arrivait pas à créer de tels faisceaux sans détruire les miroirs ou les lentilles nécessaires. C'est grâce à « l'amplification à dérive de fréquence » que cela a été rendu possible. Cette technique a été inventée par Gérard Mourou et Donna Strickland (Figure 21), lauréats du prix Nobel de physique en 2019.

La Figure 22 donne l'évolution de la densité de puissance des lasers depuis leur invention. On voit l'effet de la technique de l'amplification à dérive de fréquence (CPA, « *chirped pulse amplification* »), qui a permis d'augmenter la pente de la courbe du progrès et le passage

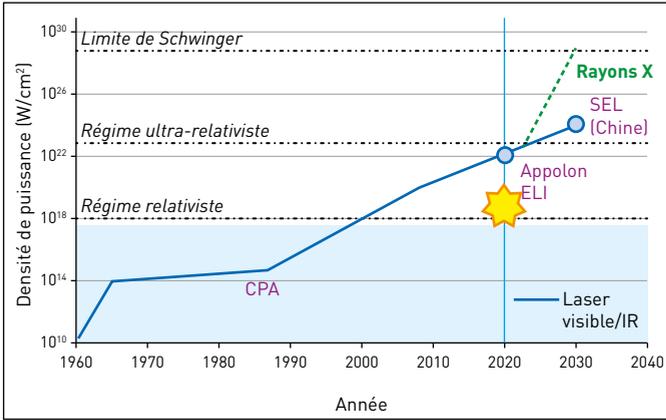


Figure 22

Augmentation de la densité de puissance des lasers depuis leur invention (la « limite de Schwinger » est la valeur qui correspondrait à une création de matière).

au régime relativiste – celui où l'on est capable d'accélérer des électrons à une vitesse proche de celle de la lumière. Avec les lasers Apollon en France et ELI en Europe de l'Est, on est aujourd'hui presque au « régime ultra-relativiste », ce qui veut dire que ce sont des protons ou des neutrons que l'on peut accélérer à une vitesse proche de celle de la lumière.

Les chiffres atteints sont colossaux (Tableau 2), au-delà du méga, du giga, du téra (10^{12}), on a déjà atteint le pétaWatt (10^{15} Watts), puis l'exaWatt (10^{18} Watts) par cm^2 . Les installations actuelles

visent le zettaWatt par cm^2 , et à plus long terme le yottaWatt par cm^2 .

Ces puissances lumineuses permettent de tester l'électrodynamique quantique, de faire des accélérateurs de particules qui, au lieu d'être des installations de 27 km de diamètre comme le CERN, ne dépasseraient pas la dimension du mètre. Avec ces puissances, on peut faire de la physique vraiment fondamentale, mais aussi des choses un peu plus appliquées dans des domaines variés. Pour illustrer cela, nous nous tournons vers l'ophtalmologie.

Tableau 2

Des chiffres de densité énergétique absolument colossaux.

10^n	Préfixe français	Symbole	Depuis	Nombre décimal	Désignation (échelle longue)
10^{24}	yotta	Y	1991	1 000 000 000 000 000 000 000 000	Quadrillon
10^{21}	zetta	Z	1991	1 000 000 000 000 000 000 000	Trilliard
10^{18}	exa	E	1975	1 000 000 000 000 000 000	Trillion
10^{15}	péta	P	1975	1 000 000 000 000 000	Billard
10^{12}	téra	T	1960	1 000 000 000 000	Billion
10^9	giga	G	1960	1 000 000 000	Milliard
10^5	méga	M	1960	1 000 000	Million
10^3	kilo	k	1795	1 000	Millier

3.6. Un exemple concret : le laser et l'ophtalmologie

Le physicien français Gérard Mourou raconte l'anecdote suivante : dans les années 1980, un étudiant qui travaillait avec ses lasers femtoseconde a pris un faisceau laser dans l'œil. Il s'est précipité chez l'ophtalmologiste, qui lui regarde le fond d'œil et s'exclame « *c'est incroyable, je n'ai jamais observé un trou aussi net dans un œil !* ».

Cela illustre l'effet de la densité de puissance sur l'interaction entre le laser et la matière. Un laser classique chauffe et fait fondre la matière, cela produit des trous irréguliers. Un laser femtoseconde a une puissance suffisante pour vaporiser directement la matière, l'ioniser, l'éjecter sans effets

thermiques. Les trous sont « parfaits ».

On peut ainsi faire de l'usinage nanométrique et micro-métrique, qui permet une découpe selon la technique du timbre-poste : on réalise une série de petits trous les uns à côté des autres pour faire une découpe à l'échelle du nanomètre. Cela est utilisé en ophtalmologie pour corriger la myopie ou pour les opérations de la cataracte. Ces opérations aujourd'hui très banales sont devenues possibles grâce aux lasers, et en particulier aux lasers femtosecondes. Auparavant, les techniques employées étaient plus mécaniques et moins performantes en ce qui concerne les taux de réussite et les complications postopératoires.

Les lasers, pour les physiciens ou pour les chimistes ?

En conclusion, nous proposons de méditer cette phrase du physicien Edward Teller, incidemment inventeur de la bombe H : « *Les lasers ont été découverts par les mauvaises personnes, à savoir les physiciens. Le résultat c'est que les chimistes ne s'en sont pas emparés comme ils auraient pu* ».

Il poursuivait en glorifiant les chimistes : « *Chaque laser commence avec de la physique ou de la chimie mais devient de la chimie stricto sensu à un moment ou à un autre* ». Les seules personnes qui peuvent faire des vrais progrès au domaine sont les chimistes... Nous lui laisserons la responsabilité de ses opinions !