

QUELQUES APPORTS DU LASER EN CHIMIE THÉORIQUE ET INDUSTRIELLE

Sandrine Steydli

Parties des programmes de physique-chimie associées

– Programme de la spécialité physique-chimie de terminale générale :

https://cache.media.education.gouv.fr/file/SPE8_MENJ_25_7_2019/92/9/spe249_annexe_1158929.pdf

Partie « Ondes & signaux » / 2. Former des images, décrire la lumière par un flux de photons

– Programme de physique-chimie en BST « Systèmes Photoniques » partie « Optique ondulatoire : propagation libre d'une onde »

– Programme de physique-chimie en bac pro « Signaux : comment transmettre une information ? – Choisir une source lumineuse »

– Programme de physique-chimie et mathématiques de première STI2D : Ondes et information

Mots-clés : laser – femtochimie – industrie

INTRODUCTION

Nous sommes aujourd'hui très familiers avec la lumière laser et ses utilisations : du pointeur à diode laser que l'on peut aisément se procurer dans le commerce au lecteur de code-barres des caisses de supermarchés, en passant par l'épilation ou la chirurgie laser... cette lumière extraordinaire a pris une place grandissante dans notre quotidien.

Mise à l'honneur par un nouveau prix Nobel cette année¹, le rayonnement laser et la compréhension de son interaction avec la matière a permis de nombreuses avancées en chimie fondamentale, mais également de multiples applications technologiques et industrielles.

En quoi le laser est-il devenu indispensable aux chimistes théoriciens tout comme aux industriels et quelles nouvelles perspectives peut-il encore leur apporter ?

LE LASER², UNE SOURCE DE LUMIÈRE SI PARTICULIÈRE

Le principe de fonctionnement du laser repose sur l'émission stimulée, découverte en 1917 par Albert Einstein (Figure 1).

Ce phénomène quantique a été mis en pratique par Theodore Maiman en 1960 avec le premier laser à rubis.

Pour construire une source laser, on doit disposer d'un milieu amplificateur auquel on apporte de l'énergie par pompage, afin que les entités qui le constituent se trouvent majoritairement dans un état excité.

1. Le prix Nobel de physique 2022 a été attribué au Français Alain Aspect, à l'Américain John F. Clauser et à l'Autrichien Anton Zeilinger pour leurs travaux sur l'intrication quantique.

2. LASER est l'acronyme de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (amplification de la lumière par émission stimulée de radiation).

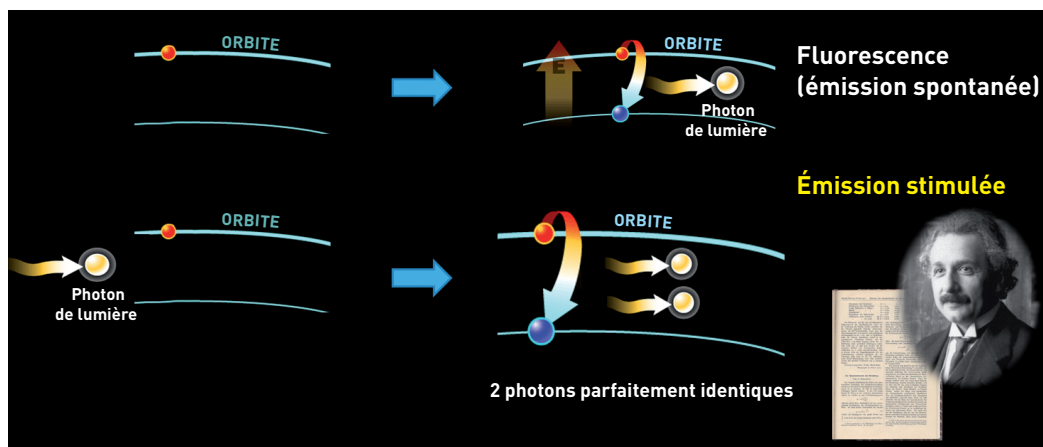


Figure 1 – Après absorption d'un photon de longueur d'onde adaptée, l'électron se trouve dans un état excité et deux phénomènes d'émission de lumière sont possibles : la fluorescence ou l'émission stimulée. En haut : l'électron peut se désexciter de manière spontanée et aléatoire vers un niveau d'énergie inférieure en émettant un photon. En bas : si on envoie un photon sur l'atome excité, on déclenche l'émission d'un deuxième photon de même longueur d'onde et en phase avec le premier.

Ainsi, l'émission stimulée peut avoir lieu et générer un flux de photons tous identiques, qui présentent la même direction, la même énergie (et donc la même longueur d'onde), et qui ont également tous la même phase (Figure 2)

À la sortie du dispositif, le faisceau laser obtenu est de ce fait très directif, monochromatique et très cohérent. Ces trois propriétés, qui sont synthétisées dans la Figure 3, font toute la spécificité du rayonnement laser.

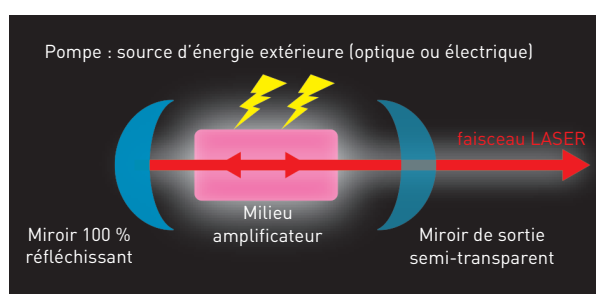


Figure 2 – Principe de fonctionnement d'un laser.

Lumière « classique »	Lumière LASER
<p>Plusieurs couleurs • La lumière émise est composée de toutes les couleurs de l'arc-en-ciel (et même au-delà)</p>	<p>Monochromatique • La lumière laser est (le plus souvent) composée d'une seule longueur d'onde</p>
<p>Plusieurs directions • Les ondes lumineuses se déplacent dans toutes les directions de l'espace</p>	<p>Directionnel • Le faisceau est étroit et diverge peu, dirigé dans une seule direction</p>
<p>Plusieurs phases • Les différentes ondes sont émises à des moments différents. Elles sont totalement indépendantes les unes des autres</p>	<p>Cohérent • Les différentes ondes sont « en phase ». C'est cette propriété qui rend les interférences possibles avec un laser</p>

Figure 3 – Comparatif entre la lumière naturelle et le laser. Source : S.Forget.

Dans l'élaboration de la source, la chimie a déjà un rôle à jouer puisqu'on peut obtenir des lasers aux propriétés très différentes selon le choix du milieu amplificateur et la nature de ses atomes.

On peut également utiliser des molécules de colorants que les chimistes savent manipuler aisément pour modifier leurs niveaux d'énergie. Les lasers organiques ainsi mis au point sont en général peu puissants, mais on peut en sélectionner la longueur d'onde et donc, la couleur à l'envi (Figure 4).

The figure is divided into two parts. On the left, a diagram shows the energy levels of a dye molecule (S₀, S₁, S₂, T₁) and the pumping process (Pompe optique ou électrique) leading to a laser beam (Faisceau laser). On the right, a photograph shows a complex optical setup with a laser beam and various lenses and mirrors.

Figure 4 – Les lasers organiques utilisent des molécules complexes de colorants qui permettent une plus grande variabilité des couleurs et des applications.

LE LASER POUR EXPLORER LA MATIÈRE ET COMPRENDRE LES TRANSFORMATIONS CHIMIQUES

La chimie a pour objectif de comprendre la constitution des atomes et des molécules, ainsi que leurs interactions. Parmi les obstacles à surmonter, on peut citer les dimensions extrêmement faibles de ces objets d'étude, leur très grand nombre, mais également le fait qu'elles soient constamment en mouvement !

Vers des temps de pose de plus en plus courts

Pour étudier un mouvement à notre échelle, on peut utiliser la technique relativement simple de la chronophotographie : on prend en photo l'objet à intervalles de temps réguliers et on peut alors reconstituer le « film » en faisant défiler les images obtenues (Figure 5).

On peut alors accéder à plus de précision et observer des détails invisibles à l'œil nu en augmentant la vitesse de prise de vue. Une caméra à 27 000 images par seconde permet par exemple de visualiser les mouvements d'un fluide en balistique comme le montre la photo de la Figure 6.

Pour l'étude de déplacements plus rapides, l'enjeu sera donc d'avoir un « mode rafale » vraiment plus perfectionné : puisque le temps caractéristique du mouvement d'un atome est la femtoseconde, soit 10^{-15} secondes, il nous faut disposer d'un capteur à 1 million de milliards d'images par seconde !

Ce gap technologique a été rendu possible grâce au laser femtoseconde et au développement de la femtochimie³.

Principe de la femtochimie

La mise en œuvre de la femtochimie nécessite l'utilisation de deux faisceaux laser. Tout d'abord, le laser-pompe émet une première impulsion lumineuse qui déclenche le phénomène à étudier (transformation chimique). Puis une seconde impulsion, décalée de quelques femtosecondes seulement par rapport à la première, est émise par le laser-sonde⁴ et permet de « scanner » l'état du milieu à cet instant.

En faisant varier le décalage temporel entre pompe et sonde, on dispose ainsi de plusieurs « clichés » qui permettent d'identifier la formation de certains intermédiaires réactionnels, et au final, de reconstituer le déroulement du mécanisme réactionnel (Figure 7).

La femtochimie a donc permis une grande avancée dans la compréhension de ce qui se cache derrière ces « boîtes noires » auxquelles s'apparentent parfois les réactions chimiques (Figure 8).

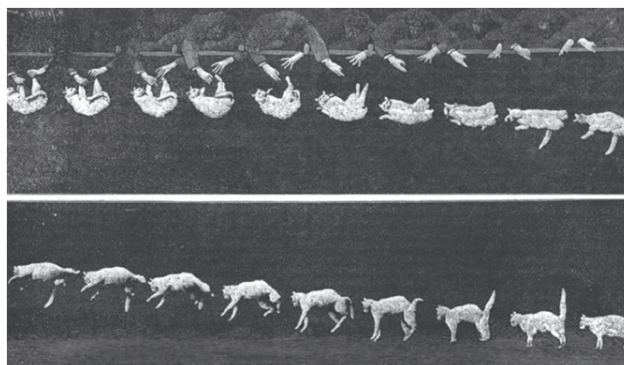


Figure 5 – Chronophotographie du retournement d'un chat à 24 images par seconde.

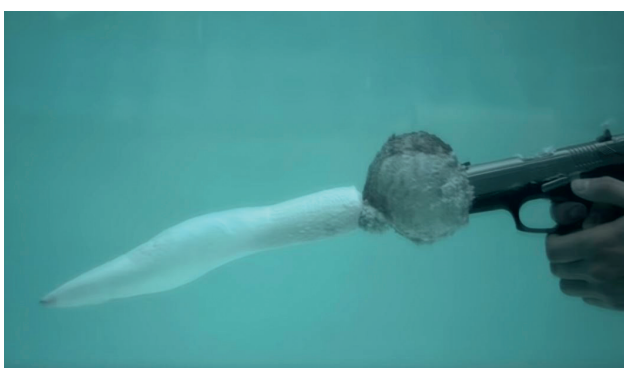


Figure 6 – Tir d'arme à feu filmé sous l'eau avec une caméra de 27 000 images par seconde.

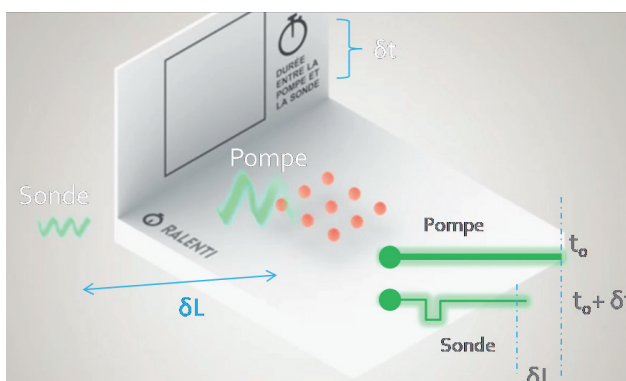


Figure 7 – Le principe de la technique pompe-sonde expliqué en vidéo sur le site [toutestquantique.fr](https://youtu.be/mFKmmR5Hh5s)
Source : <https://youtu.be/mFKmmR5Hh5s>

3. La femtochimie, inventée par Ahmed Zewail, lui valut un prix Nobel en 1999.

4. Du fait de la très grande valeur de la vitesse de la lumière (3×10^8 m.s⁻¹), cet infime décalage temporel est relativement simple à obtenir avec une différence de marche de quelques micromètres entre le faisceau laser pompe et le faisceau laser sonde.

Un laser pour découper

La découpe laser est l'une des premières applications du laser dans l'industrie. Elle permet un usinage à vitesse élevée, sans contact et sans usure d'outil. Son principe repose sur l'absorption en surface du rayonnement par le matériau, qui permet d'élever localement la température jusqu'à la fusion ou la vaporisation. Le choix de la puissance du laser utilisé varie en fonction du matériau à découper et de son épaisseur.

Dans le cas des métaux, on choisit la longueur d'onde du faisceau laser de telle sorte que la couche superficielle du matériau absorbe le rayonnement et se mette à fondre. On déplace alors le faisceau par rapport au métal pour maintenir l'état de fusion et obtenir la découpe du matériau (Figure 9).

Pour certains métaux comme le fer, la réaction de fusion est exothermique et permet de récupérer une énergie jusqu'à quatre fois supérieures à l'énergie incidente du faisceau laser, ce qui accélère le procédé (Figure 10).

En ce qui concerne la découpe du verre, la longueur d'onde du laser est également un paramètre à ajuster (Figure 11). L'absorption partielle du rayonnement en surface crée un échauffement localisé, puis un gradient de température qui génère des contraintes, fragilisant le matériau jusqu'à générer une fissure. Par la suite, le déplacement du faisceau à vitesse relativement élevée (quelques mètres par minute) propage la fissure et permet la découpe. Le choix de la vitesse de déplacement est capital, notamment pour le verre trempé qui se brise en mille morceaux sous l'effet d'un choc.

Depuis le développement des lasers femtosecondes, on accède à des puissances surfaciques suffisantes pour vaporiser directement la matière, l'ioniser, l'éjecter sans effets thermiques. Les trous ainsi formés sont extrêmement nets et permettent un usinage des pièces bien plus fin par la technique du timbre-poste : on réalise une succession de petits trous les uns à la suite des autres pour faire une découpe à l'échelle du nanomètre. En plus de l'industrie, cette technique est également utilisée en chirurgie ophtalmique pour corriger la myopie ou réaliser des opérations de la cataracte de manière plus performante.

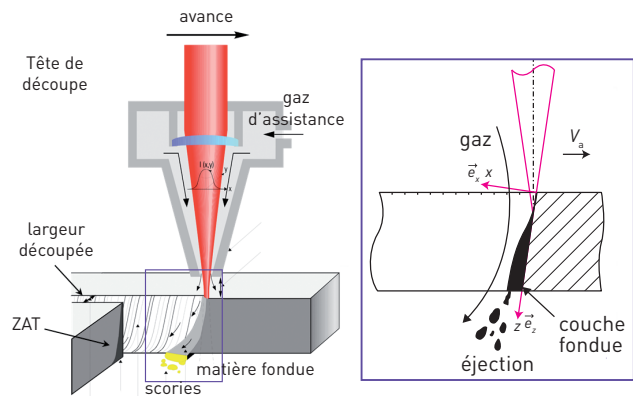
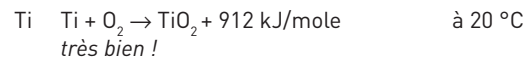
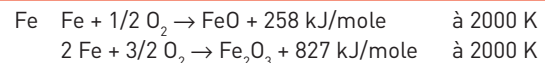


Figure 9 – Découpe d'un métal au laser. La couche superficielle du métal absorbe l'énergie du laser et fond localement. Cette matière fondue est chassée sous le support ajouré par de l'air à haute pression et le déplacement de la tête de découpe le long du métal permet sa découpe.

Métaux



inox pas beaucoup d'énergie libérée (passivation)

Figure 10 – Avec des matériaux contenant du fer (Fe) ou du titane (Ti), il est possible d'utiliser des réactions chimiques exothermiques qui permettent d'obtenir une énergie allant jusqu'à quatre fois l'énergie du faisceau laser. Ainsi le phénomène de découpe est-il renforcé et rendu plus rapide.

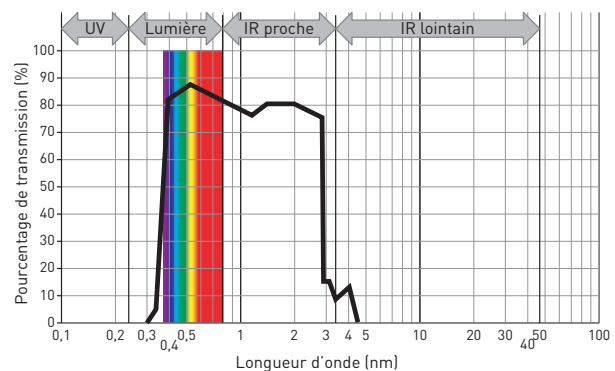


Figure 11 – La connaissance de la transmission du matériau à découper permet de choisir la longueur d'onde de travail du laser, de telle sorte qu'il soit absorbé suffisamment dans le volume pour chauffer et progresser dans le matériau. Ici des longueurs d'onde comprises entre 800 et 1100 nm conviennent bien.

Un laser pour souder

L'assemblage thermoplastique⁶ est un autre exemple d'application du laser dans l'industrie. Ici aussi il est question d'absorption sélective du faisceau laser : on accole deux matériaux thermoplastiques et on les irradie avec un faisceau laser qui est transmis par le premier matériau, mais absorbé en surface par le second. Il se crée ainsi un échauffement localisé à l'interface, qui se diffuse ensuite vers le bas et vers le haut et aboutit à une soudure après refroidissement (Figure 12).

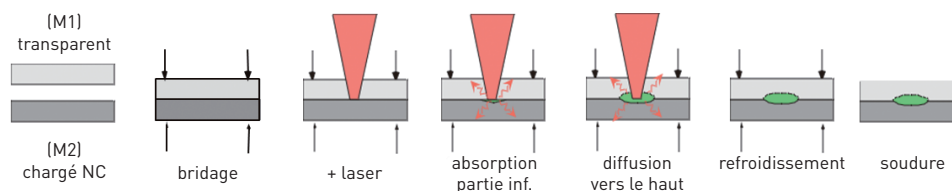


Figure 12 – L'assemblage des thermoplastiques est possible si le premier matériau est transparent et le deuxième est opaque au rayonnement laser incident. De ce fait, l'énergie du faisceau n'est absorbée que par la surface du second matériau. La chaleur se diffuse ensuite dans les deux matériaux et il se crée une soudure après refroidissement.

CONCLUSION

Depuis son invention, le laser est devenu un outil capital en sciences, permettant à des scientifiques de tous horizons d'obtenir pas moins de quatorze prix Nobel, dont deux en chimie. La possibilité de générer un faisceau monochromatique dont on peut ajuster la longueur d'onde selon les besoins, ainsi que la concentration de l'énergie de la source dans l'espace et dans le temps, sont autant d'atouts pour les chimistes théoriciens comme pour les industriels. Le passage à des lasers femtosecondes a permis aux uns de progresser dans la compréhension des mécanismes réactionnels, et aux autres d'agir sur la matière pour l'usiner de plus en plus finement et de plus en plus rapidement.

Les lasers attosecondes concentrent aujourd'hui l'énergie sur des durées mille fois plus faibles, et s'ils restent pour le moment cantonnés aux laboratoires de recherche, il y a fort à parier que les industriels suivent de près leurs avancées et se prêtent à rêver aux nouveaux champs de possibles qu'offrirait – offrira ? – leur généralisation dans l'industrie.

SOURCES PRINCIPALES

La chimie à la lumière du laser : un intérêt réciproque (Sébastien Forget)

https://www.mediachimie.org/sites/default/files/Lumiere_p119.pdf

Le laser en contexte industriel : une palette d'applications étonnantes (Thierry Engel)

https://www.mediachimie.org/sites/default/files/Lumiere_p229.pdf

Sandrine Steydli est professeure agrégée de physique-chimie

Comité éditorial : Danièle Olivier, Jean-Claude Bernier, Grégory Syoen

6. Thermoplastique : un matériau thermoplastique a la propriété de se déformer sous l'effet de la chaleur pour ensuite durcir en refroidissant. Ce processus est réversible. *A contrario*, un matériau thermodurcissable se solidifie de manière irréversible lorsqu'il est chauffé.