

# Toujours plus court : des impulsions lumineuses attosecondes

Les impulsions laser « femtoseconde » sont devenues routinières dans de nombreux domaines de la physique. Elles sont exploitées en particulier pour suivre le mouvement des atomes dans les molécules. Les impulsions les plus brèves émises par les lasers incorporant les derniers perfectionnements ont des durées un peu inférieures à 4 femtosecondes, soit  $4 \cdot 10^{-15}$ s. Une nouvelle source basée sur la génération d'harmoniques élevées a récemment permis de franchir la barrière de la femtoseconde, ouvrant ainsi à la recherche le champ de l'atmosphère (1 attoseconde =  $10^{-18}$ s) qui devrait permettre d'étudier et de contrôler le mouvement des électrons dans les atomes. Le record actuel est de 250 attosecondes (as) pour un impulsion unique et de 150 as pour un train d'impulsions.

Les impulsions laser sont passées en quarante ans de la microseconde ( $10^{-6}$  s) à la femtoseconde ( $10^{-15}$  s), pour atteindre deux objectifs d'un grand intérêt dans de nombreux domaines de physique : d'une part produire des puissances lumineuses instantanées élevées et d'autre part pouvoir étudier des phénomènes sur des temps très courts. L'accroissement des puissances lumineuses, qui atteignent maintenant des valeurs telles que le champ électrique de l'onde électromagnétique exerce sur un électron une force très supérieure à la force d'attraction Coulombienne dans un atome, a donné naissance à l'optique non-linéaire et à la physique des plasmas en champ laser intense. Par ailleurs, la résolution temporelle est devenue suffisante pour qu'il soit possible de suivre le mouvement des atomes dans les molécules ou même celui d'un électron sur un état atomique très excité, pour lequel la période de rotation peut être suffisamment longue.

En dépit d'efforts constants et d'avancées technologiques importantes, les impulsions les plus courtes sont actuellement d'environ 4 fs. Elles sont produites dans le visible ou le proche infrarouge où la période optique, c'est-à-dire la durée de l'oscillation du champ électromagnétique, est de quelques femtosecondes. A une longueur d'onde de 800 nm,

une telle impulsion ne comporte ainsi que deux cycles optiques. Pour franchir la « barrière » femtoseconde il apparaît donc nécessaire d'utiliser un rayonnement de période (ou de longueur d'onde) beaucoup plus courte, c'est-à-dire appartenant au domaine de l'ultraviolet extrême (UVX). Il n'existe pas encore de laser dans cette gamme spectrale. Une solution est née un peu par hasard d'un phénomène d'optique non-linéaire découvert dans les années 80 : la génération d'harmoniques élevées. Une impulsion laser infrarouge intense traversant un gaz atomique génère les harmoniques impaires de la fréquence fondamentale jusqu'à des ordres très élevés. L'ensemble des fréquences produites, séparées par deux fois la fréquence fondamentale, couvre un spectre très large, et pourrait permettre de « construire » des impulsions très courtes, à condition que les différentes harmoniques soient en phase. Il est alors apparu que la nature faisait bien les choses, et que le processus même de la génération d'harmoniques réalisait cet exploit. La théorie prévoyait cette mise en phase naturelle sous certaines conditions et que le résultat en était l'émission d'une série de flashes de lumière UVX. Cet article se propose d'expliquer comment et pourquoi il en est ainsi, et par quelles méthodes on peut mesurer des durées aussi brèves.

---

Article proposé par :

Philippe Balcou, [philippe.balcou@ensta.fr](mailto:philippe.balcou@ensta.fr)

Rodrigo López-Martens, [rodrigo.lopez@ensta.fr](mailto:rodrigo.lopez@ensta.fr)

Laboratoire d'optique appliquée (LOA), CNRS/ENSTA/Ecole polytechnique

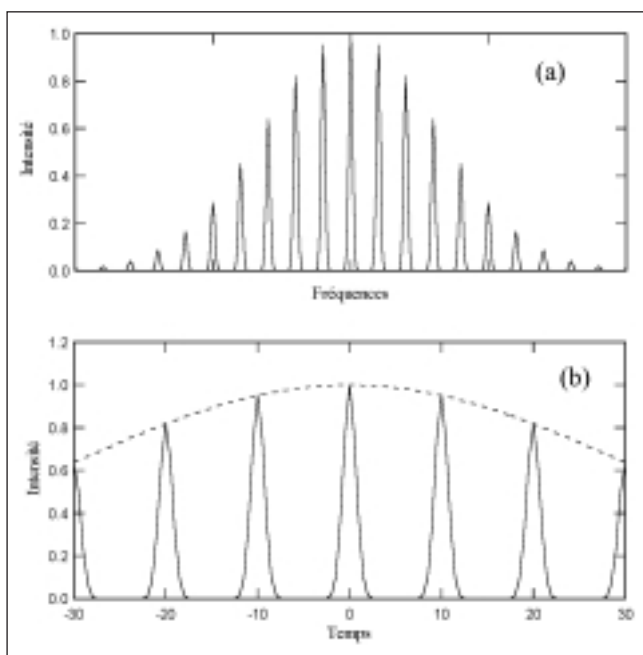
Pierre Agostini, [pagostini@cea.fr](mailto:pagostini@cea.fr), Service des photons, atomes et molécules, CEA DRECAM.

## Les impulsions laser à la limite de la femtoseconde

Pour créer une impulsion lumineuse, il faut réussir à combiner des ondes à des fréquences voisines, de manière qu'à un instant donné, elles interfèrent parfaitement constructivement. La durée pendant laquelle ces interférences restent constructives, c'est-à-dire la durée d'impulsion, dépend de l'écart entre les composantes de plus grande et de plus petite fréquence : plus la différence maximum de fréquences est grande, plus vite vont se manifester les interférences destructives entre les composantes spectrales, faisant tendre vers 0 l'amplitude du champ en dehors du maximum de l'impulsion. On retrouve ainsi une loi générale de l'analyse de Fourier, liant la durée minimale à l'inverse de la largeur spectrale. Le spectre d'une impulsion ultra-courte doit donc couvrir une gamme de fréquences très large ; or un oscillateur laser, constitué à la base d'un milieu amplificateur et d'une cavité optique oscillante, ne fonctionne que pour une série de fréquences bien précises, correspondant aux modes propres de la cavité. La figure 1(a) présente un spectre de principe d'un laser oscillant sur plusieurs modes simultanément.

Si les phases associées aux modes étaient aléatoires, alors ceux-ci interféreraient deux à deux à des instants tout aussi aléatoires.

Pour que tous les modes interfèrent constructivement au même moment, il faut asservir rigoureusement leurs phases, par exemple les contraindre à rester nulles, ou bien à suivre



**Figure 1** - Obtention d'impulsion courtes en sortie d'un oscillateur laser à modes bloqués : (a), allure du spectre montrant l'oscillation sur plusieurs modes simultanés d'amplitudes voisines, et (b), profil temporel des impulsions correspondantes si les phases des modes sont régulières.

une simple loi linéaire. La figure 1(b) montre l'évolution en temps du champ électrique résultant alors de l'addition de tous ces modes : on observe un train d'impulsions, dont chacune possède une durée liée à l'inverse du nombre de modes impliqués. Il faut alors combiner jusqu'à plusieurs centaines de milliers de tels modes pour créer des impulsions de quelques femtosecondes.

Un grand nombre de techniques ont été proposées en physique des lasers pour réussir un tel « blocage de modes », permettant ainsi de passer progressivement d'impulsions nanoseconde à des impulsions pico- puis femto- secondes. Les méthodes contemporaines permettent d'atteindre des durées de l'ordre de 4 fs en sortie d'un oscillateur laser. La longueur physique d'une telle impulsion est à peine supérieure à 1 micromètre!

À une longueur d'onde typique de 800 nm, le champ électrique oscille avec une période de 2,7 fs. Le champ électrique d'une impulsion de 4 fs n'oscille donc qu'environ deux fois : on voit que l'on approche ainsi des limites ultimes. Comment dans ce cas diminuer la durée d'impulsion en deçà de 4 fs ? De nouvelles techniques apparaissent basées sur l'amplification paramétrique d'impulsions, qui pourraient autoriser la création d'impulsions monocycles, voire demi-cycles. Pour descendre nettement en dessous de la femtoseconde, il faut avoir recours à un rayonnement dont le cycle optique est beaucoup plus court, c'est-à-dire se placer soit dans l'ultraviolet (UV), soit dans l'ultraviolet lointain (Extrême Ultra-Violet, ou UVX). Il existe en particulier un phénomène permettant de créer des faisceaux de rayonnements UVX ultra-courts à partir d'un laser infra-rouge : la génération d'harmoniques d'ordre élevé.

## Comment changer de gamme spectrale ? La génération d'harmoniques élevées

Dès les années 1960, les lasers ont atteint des puissances crêtes (puissance au maximum d'une impulsion) suffisantes pour induire des phénomènes non-linéaires dans la réponse de la matière, faisant apparaître un domaine entier de l'optique : l'Optique Non Linéaire. Le phénomène le plus simple, et le premier observé, est la génération d'harmoniques : le faisceau laser fait vibrer le cortège électronique des atomes, à des fréquences liées soit aux modes propres de l'atome, soit tout simplement à la fréquence d'excitation, et aux fréquences multiples de celle-ci. Un phénomène très similaire se produit lorsqu'un archet fait vibrer la corde d'un violon : à la fréquence de la note jouée, s'ajoutent des notes de fréquences plus élevées, multiples de la première, appelées harmoniques. En optique, les harmoniques d'un laser excitant un solide ou un gaz correspondent à des faisceaux lumineux, de fréquences typiquement égales au double ou au triple de la fréquence du laser exciteur, soit des « ordres de non-linéarité » de 2 ou 3. Ce processus est aujourd'hui beaucoup utilisé en optique, car les faisceaux harmoniques présentent la propriété fondamentale de conserver l'essentiel

de la « qualité laser » du faisceau excitateur : les harmoniques sont spatialement et temporellement aussi cohérentes que le laser qui les a créées.

Pendant vingt ans, les ordres de non-linéarité sont restés modestes, de 2 à 5 au maximum, permettant d'atteindre essentiellement le proche UltraViolet.

Quelques expériences isolées ont montré des harmoniques émises aux ordres 7, 9 ou 11, mais avec des niveaux de signal extrêmement faibles. Cette situation a complètement changé en 1988, lorsque deux équipes, l'une à Chicago et l'autre à Saclay, ont montré que des gaz rares excités par des impulsions laser courtes et intenses, réagissent en émettant une série d'harmoniques d'ordre beaucoup plus élevé. Une transition se produit en effet entre les régimes de faible et de fort éclairage laser : lorsque l'éclairage est inférieur à  $10^{13}$  W/cm<sup>2</sup>, les harmoniques successives présentent des intensités décroissant exponentiellement avec l'ordre. A l'inverse, à fort éclairage, les harmoniques les plus hautes se stabilisent pour former une structure de « plateau », suivi d'une coupure brusque du phénomène. Pour des raisons de symétrie du milieu gazeux atomique, seules sont créées les harmoniques d'ordre impair.

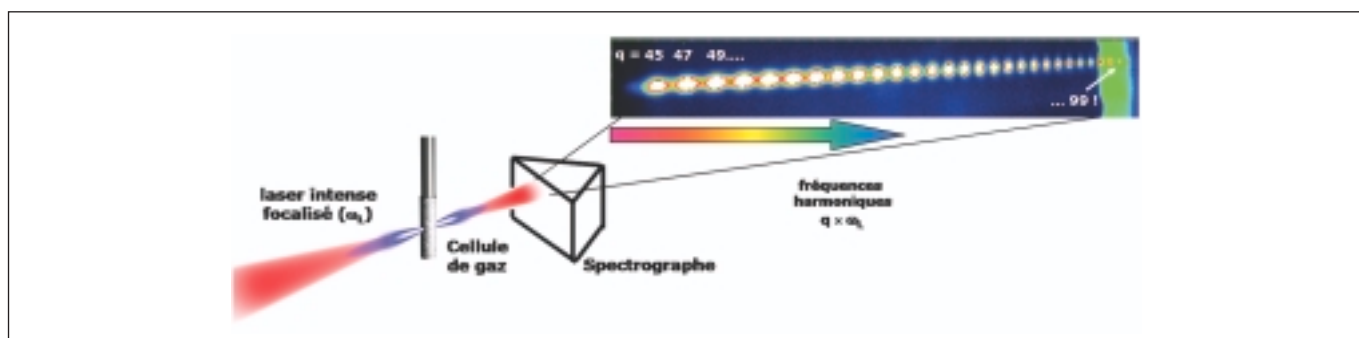
Ce processus, baptisé génération d'harmoniques d'ordre élevé (ou simplement d'harmoniques élevées), a très rapidement suscité un engouement important : d'une part, son explication a nécessité un effort théorique poussé ; d'autre part, il ouvrait une voie pour créer une source compacte de rayonnements à la fois cohérents et ultra-courts, dans une gamme spectrale non encore couverte par les lasers. En outre, les progrès de la technologie laser ont entraîné des améliorations spectaculaires des performances des sources d'harmoniques élevées, en particulier en diminuant la durée des impulsions laser : l'introduction du Titane-Saphir comme cristal laser a permis de recourir à des impulsions de moins de 100 fs, et aujourd'hui de quelques femtosecondes. L'éclairage crête auquel sont soumis les atomes peut atteindre des valeurs élevées, de plusieurs  $10^{14}$  W/cm<sup>2</sup>, induisant une extension du plateau d'harmoniques élevées jusqu'à des ordres de non-linéarité particulièrement impressionnants. La figure 2 présente ainsi un exemple de spectre

obtenu au Laboratoire d'Optique Appliquée, en focalisant des impulsions d'un laser Titane-Saphir, de 30 fs de durée, dans une cellule de néon, avec une version schématisée du dispositif expérimental. Le spectrographe UVX utilisé, utilisant un miroir torique et un réseau plan, donne des images où l'abscisse correspond au spectre du rayonnement, et l'ordonnée à son profil spatial. Chaque tache correspond à une harmonique donnée, d'ordres 45, 47 ... et jusqu'à 99 pour l'harmonique la plus élevée sur la droite de la figure 2. La longueur d'onde correspondant à cette dernière n'est que de 8 nm : il y a donc conversion directe de fréquence d'un faisceau excitateur dans l'infrarouge, jusqu'à l'Ultraviolet très lointain ! Dans des expériences record, des harmoniques d'ordres de plusieurs centaines ont été observées, atteignant la « fenêtre de l'eau », cette gamme de longueur d'onde entre 2,7 et 4,3 nm, qui permet l'imagerie des structures biologiques carbonées en solution aqueuse. La figure 2 permet également d'apprécier la qualité spatiale très régulière des faisceaux d'harmoniques.

La puissance moyenne des systèmes lasers femtosecondes augmente aussi régulièrement, permettant d'accroître soit l'énergie par impulsion, soit le nombre d'impulsions laser par seconde. La puissance moyenne des faisceaux harmoniques augmente de manière corrélée, pour atteindre des valeurs optimisées, sommées sur le spectre UVX, proches du milliWatt .

Certains physiciens ont rapidement remarqué la similitude entre le spectre du plateau d'harmoniques élevées (figure 2), et celui d'un laser à modes couplés (figure 1) : dans les deux cas, plusieurs pics successifs présentent des intensités très voisines. Une question immédiate se pose alors : quelle est la relation de phase entre les harmoniques ? Si en effet elles se trouvent posséder des phases spectrales linéaires, et en considérant la très grande largeur spectrale couverte par le plateau d'harmoniques élevées, alors dans le domaine temporel celles-ci pourraient interférer pour créer une série d'impulsions attosecondes !

La réponse à cette question est venue de l'explication théorique du phénomène, proposée par Paul Corkum, Ken Schafer, Ken Kulander et Maciej Lewenstein, et connue

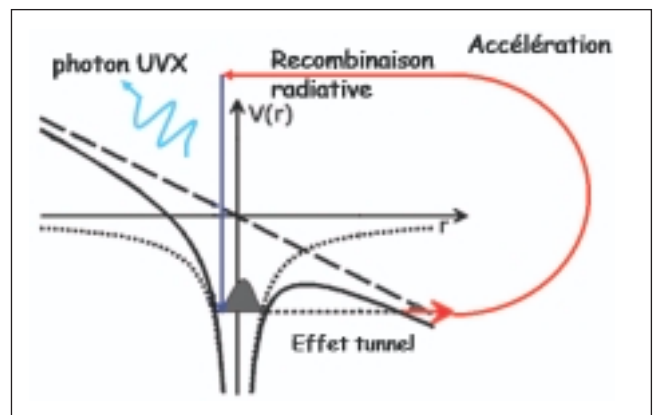


**Figure 2** - Principe du dispositif expérimental, et spectre d'harmoniques élevées correspondant obtenu dans le néon à partir d'un laser Titane-Saphir de 30 fs. Le prisme symbolise le spectrographe UVX. Apparaissent ici les harmoniques 45 à 99.

comme modèle semi-classique à trois étapes. Ce modèle suit la dynamique d'un électron périphérique de l'atome, illustrée dans la figure 3. Dans une première étape, l'électron est ionisé, c'est-à-dire arraché de l'atome sous l'effet du champ électrique du laser, qui déforme violemment le potentiel Coulombien de l'ion parent, et provoque un saut de l'électron vers un état libre par effet tunnel. Dans une deuxième étape, l'électron libéré commence à suivre une trajectoire oscillante sous l'action du champ laser sinusoïdal, et acquiert des énergies cinétiques allant de quelques electron-Volt (eV) à quelques centaines d'eV. Si le laser possède une polarisation parfaitement linéaire, alors la trajectoire oscillante de l'électron peut ramener celui-ci au voisinage immédiat de son ion parent, auquel cas il possède une certaine probabilité d'être capturé à nouveau par l'ion. Pour satisfaire la conservation de l'énergie, un photon est alors émis, qui emporte l'énergie excédentaire, c'est-à-dire la somme de l'énergie cinétique de l'électron au moment de la collision avec l'ion parent, et de l'énergie de liaison du niveau dans lequel l'électron a été capturé. Cette troisième étape, appelée capture radiative, correspond à la création du photon harmonique proprement dit ; quantiquement, l'ensemble du processus possède une certaine probabilité de se produire à chaque demi-cycle optique, ce qui crée un dipôle périodique en temps. La transformée de Fourier de ce dernier fait donc apparaître exclusivement la fréquence fondamentale d'excitation et ses harmoniques.

Ce modèle mêle étroitement des processus profondément quantiques, comme l'ionisation par effet tunnel ou la capture radiative, et des images fortement classiques, comme celle d'un électron suivant une trajectoire définie par le champ électrique laser. L'ensemble donne une image simple et convaincante de la génération d'harmoniques élevées : les photons harmoniques sont émis sous forme de flashes de lumière, périodiques, à un instant bien précis du cycle optique lorsque l'électron ionisé rentre en collision brutale avec son ion parent. La durée caractéristique d'un tel flash de lumière UVX est celle de la collision électron-ion, largement inférieure à la demi-période optique, soit 1,35 fs typiquement. On voit ainsi que chaque flash possèdera une durée clairement sub-femtoseconde. Suivant l'ordre des harmoniques élevées, et l'éclairement considéré, les valeurs prédites vont de quelques dizaines à quelques centaines de attosecondes. On confirme ainsi, par un raisonnement de dynamique temporelle, la conjecture issue de l'allure du plateau d'harmoniques : les phases des harmoniques élevées sont nécessairement bloquées, c'est-à-dire reliées entre elles par une relation de phase, permettant l'apparition des impulsions attosecondes.

Le modèle présenté ici est à l'échelle d'un atome unique. Il reste à évaluer l'impact de l'aspect macroscopique : lorsque quelque  $10^{14}$  atomes coopèrent pour créer des faisceaux d'harmoniques élevées, chacun émettant sa série de flashes attosecondes d'harmoniques, l'ensemble donne-t-il une cacophonie lumineuse, ou un concerto bien orchestré, avec une unique série d'impulsions d'attosecondes énergé-



**Figure 3** - Modèle semi-classique de la création de trains d'impulsions attosecondes. A chaque demi-cycle optique, un électron peut s'ioniser par effet tunnel, être accéléré par le champ laser, revenir au voisinage de l'ion, et subir une recombinaison radiative, émettant alors un « flash » dans l'UVX. Ce processus étant périodique, se traduit par l'apparition d'un peigne d'harmoniques élevées dans le domaine des fréquences.

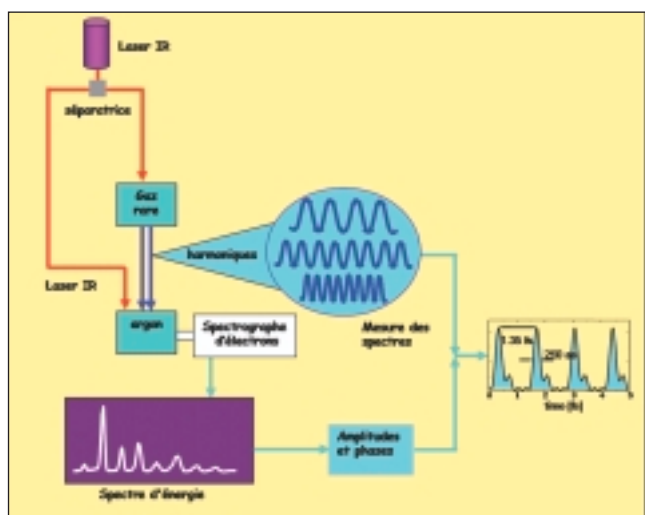
tiques issues du milieu ? La réponse, techniquement compliquée, est que les deux cas de figure sont possibles. Les études théoriques prédisent en effet qu'il existe presque toujours un peigne d'impulsions UVX attosecondes, en sortie du milieu ; il peut être mélangé ou non à un rayonnement UVX de structure spatio-temporelle beaucoup plus complexe, et ce suivant les conditions précises du dispositif de génération d'harmoniques. En tout état de cause, les calculs théoriques affirment que tous les laboratoires du monde travaillant sur ce sujet depuis quatorze ans créent très vraisemblablement des peignes d'impulsions attosecondes de manière routinière ; mais en apporter une preuve expérimentale n'a *a priori* rien d'évident.

### Comment mesurer des impulsions dans la gamme des attosecondes ?

L'élaboration d'un appareil de mesure capable de caractériser de telles impulsions UVX pose de nouveaux défis aux physiciens. Tout d'abord un tel appareil devrait posséder une résolution temporelle nettement inférieure à la durée des impulsions UVX elle-même pour permettre de mesurer cette durée avec précision. La bande passante requise devrait donc être particulièrement large pour être compatible avec les énormes spectres cohérents transportés par des impulsions attoseconde : plus de 20 eV à mi-hauteur pour une impulsion de 200 as.

Jusqu'à présent, le seul processus physique qui puisse remplir un cahier des charges aussi pointu est la photo-ionisation d'atomes ou de molécules par les impulsions UVX en présence d'un champ électrique infrarouge, semblable à celui qui sert à leur génération. En effet, la photo-ionisation de gaz rares présente des sections efficaces relativement

constantes lorsque l'énergie du photon exciteur est variée sur des dizaines d'eV. L'idée générale de mesures consiste donc à étudier la dynamique des électrons lors d'un processus de photo-ionisation par les impulsions attosecondes, en présence d'un champ laser infrarouge (IR), dérivé du laser initial, comme décrit sur la figure 4.

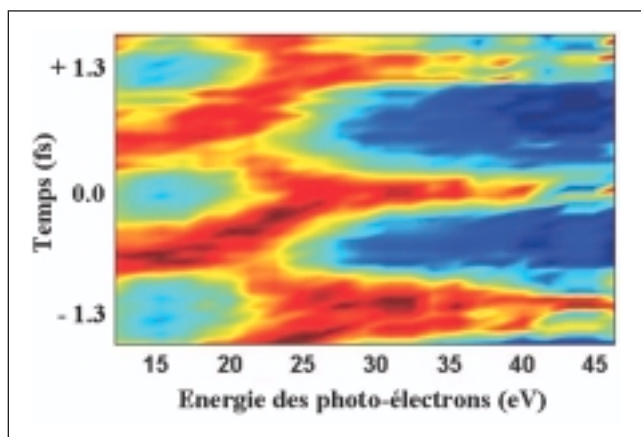


**Figure 4** - Schéma de principe des méthodes de mesure des impulsions attosecondes. Le laser infrarouge intense est utilisé sur un bras pour créer un train d'impulsions attoseconde, qui est alors focalisé sur un gaz rare comme l'argon pour l'ioniser, en présence d'un deuxième bras du laser initial. La dynamique des électrons produits est étudiée en fonction du retard entre les faisceaux UVX attoseconde, et infrarouge.

Dans la toute première méthode de caractérisation attoseconde introduite, appelée RABITT (Reconstruction of Attosecond Beating by Interference of Two-Photon Transitions), les informations données par la dynamique des électrons permettent de mesurer séparément l'amplitude ET la phase des différentes harmoniques considérées. Dans cette approche, on photoionise dans une première étape un gaz atomique avec des harmoniques seules. Le spectre en énergie des photoélectrons se présente sous la forme d'un peigne, chaque pic correspondant à une harmonique  $q$  de fréquence  $\nu_q = (2q + 1)\nu$ , l'écart entre pics étant égal au double de la fréquence laser  $\nu$ . D'après la loi d'Einstein, l'énergie de chaque pic de photoélectron est, en effet,  $E_q = h\nu_q - I_P$ , où  $I_P$  est l'énergie nécessaire pour ioniser le gaz. On ajoute alors aux harmoniques un rayonnement IR d'intensité faible correspondant au rayonnement fondamental de fréquence  $\nu$ . Les photoélectrons produits par ionisation à deux photons (un photon harmonique  $\nu_q$  et un photon IR  $\nu$ ) forment un second peigne de même période  $2\nu$  et décalé par rapport au premier d'exactly la fréquence laser  $\nu$ . Chacun de ces pics « mixtes » peut être atteint par deux chemins quantiques impliquant l'absorption d'un photon de l'un ou l'autre des deux harmoniques consécutives qui l'encadrent et l'absorption ou l'émission d'un photon

IR. L'interférence de ces deux chemins dépend en particulier de la différence de phase entre les deux harmoniques et en permet la détermination expérimentale. Cette méthode a permis pour la première fois en 2001 à deux équipes Françaises et une équipe Hollandaise de démontrer l'existence des impulsions attosecondes.

Généralisant cette méthode avec un éclairage laser IR d'intensité plus élevée, on arrive aujourd'hui à visualiser la durée sub-femtoseconde des impulsions UVX à travers le mouvement des paquets d'ondes électroniques produits lors de la photoionisation en présence des oscillations du champ laser IR. En effet, la photoionisation d'un atome ou d'une molécule par l'impulsion attoseconde UVX donne naissance à un paquet d'ondes électronique d'une durée très voisine à celle de l'impulsion UVX elle-même. Comme ce temps est court par rapport à la durée d'oscillation du champ électrique IR, il peut être accéléré ou décéléré par celui-ci selon l'instant où il arrive pendant cette oscillation. Le spectre d'énergie des électrons dépend donc très précisément de la synchronisation entre les impulsions UVX et le champ laser... La figure 5, correspondant à une expérience de ce type réalisée à Lund dans le groupe d'Anne L'Huillier, montre ainsi les variations, en énergie, d'une série de paquets d'onde électroniques d'une durée de moins de 200 as chacun, lorsqu'ils sont plongés dans un champ laser infrarouge.



**Figure 5** - Evolution des distributions énergétiques des électrons créés par photoionisation d'un gaz rare sous l'effet des impulsions attosecondes, et modifiés par un champ infrarouge, en fonction du retard relatif avec celui-ci.  $2\pi$  correspondent à 2,7 fs. La structure sub-femtoseconde de la dynamique électronique est clairement résolue.

Par ailleurs, dans une série d'expériences récentes, le groupe de Vienne dirigé par Ferenc Krausz a progressé, étape par étape, vers l'obtention et l'utilisation d'impulsions attosecondes uniques. La méthode utilisée consiste simplement à partir d'impulsions laser infra-rouge les plus courtes possibles, soit typiquement de 5 fs. Grâce à un dispositif de contrôle de l'oscillation du champ électromagnétique à l'in-

térieur même de l'impulsion, ce groupe a montré comment créer de manière reproductible un seul flash attoseconde. Les méthodes exposées ici ont confirmé l'existence d'impulsions uniques, dont la durée n'est que de 250 as. Cette impulsion a alors pu être utilisée pour les premières expériences pompe-sonde résolues en temps à l'échelle sub-femtoseconde, comme par exemple la décroissance par effet Auger d'une lacune en couche M du Krypton. Toutes ces expériences ont abouti à trois résultats importants : la caractérisation des impulsions attoseconde, la mesure des oscillations du champ laser infrarouge, et des mesures pionnières impliquant la dynamique électronique sub-femtoseconde associée au processus de photo-ionisation.

## Perspectives

Quelles expériences sont possibles dorénavant ? Faut-il s'attendre à une explosion de nouveaux résultats ? Sur ces échelles de temps, les molécules restent essentiellement gelées et la seule étude dynamique envisageable est celle des électrons eux-mêmes. La plupart des expériences de « femtochimie » repose sur la méthode dite pompe-sonde : une première impulsion excite le système et une deuxième vient sonder son évolution pas à pas dans le temps. Mais cette approche est encore difficile avec des impulsions attoseconde parce que gourmande en énergie. Cette approche est d'autant plus ardue que dans le domaine de longueurs d'onde UVX, chacun des outils de l'optique traditionnelle (lentilles, lames séparatrices, etc) pose problème ! Les expé-

riences de caractérisation des impulsions attoseconde donnent un aperçu de la physique à venir, où l'on fera des mesures de résolution attoseconde en contrôlant le délai entre laser infrarouge et impulsions UVX. Elles montrent bien les difficultés, les informations concernant les impulsions UVX, le laser infrarouge et la physique de l'interaction y étant profondément enchevêtrées. L'interprétation physique des résultats sera donc complexe et devra être déduite de manière indirecte. Nous sommes déjà entrés dans l'ère de l'« attophysique », mais il faudra se doter d'un bon livre de recettes pour s'y frayer un chemin !

De nombreuses questions techniques subsistent, comme l'optimisation du processus, afin de fournir des impulsions à la fois attosecondes et de grande brillance. Une fois ces points résolus, la génération d'harmoniques élevées sera un outil absolument unique pour explorer la matière à l'échelle attoseconde. Par ailleurs, les éclaircissements crêtes atteints dans les flashes harmoniques attosecondes peuvent atteindre des valeurs importantes, *a priori* suffisantes pour induire des phénomènes non-linéaires dans l'UVX.

Quelles sont dorénavant les nouvelles limites temporelles ? En théorie, on peut descendre à des durées de quelques dizaines d'attosecondes seulement, en combinant un grand nombre d'harmoniques élevées. Mais les difficultés techniques rencontrées croissent très fortement quand on élargit démesurément le spectre des impulsions à manipuler : l'étude des processus à l'échelle zeptoseconde est encore loin...

## Pour en savoir plus

- BRABEC (T.) et KRAUSZ (F.), *Rev. Mod. Phys.*, 72, 545, 2000.
- PAUL (P.M.) *et al.*, *Science*, 292, 1689, 2001.
- KIENBERGER (R.) *et al.*, *Science*, 297, 1194, 2002.
- DRESCHER (M.) *et al.*, *Nature*, 419, 803 2002.
- GOULIELMAKIS (E.) *et al.*, *Science*, 305, 1267, 2004.
- JOHANSSON (P.) *et al.*, à paraître.