

MESURER DES IMPULSIONS LASER ULTRACOURTES

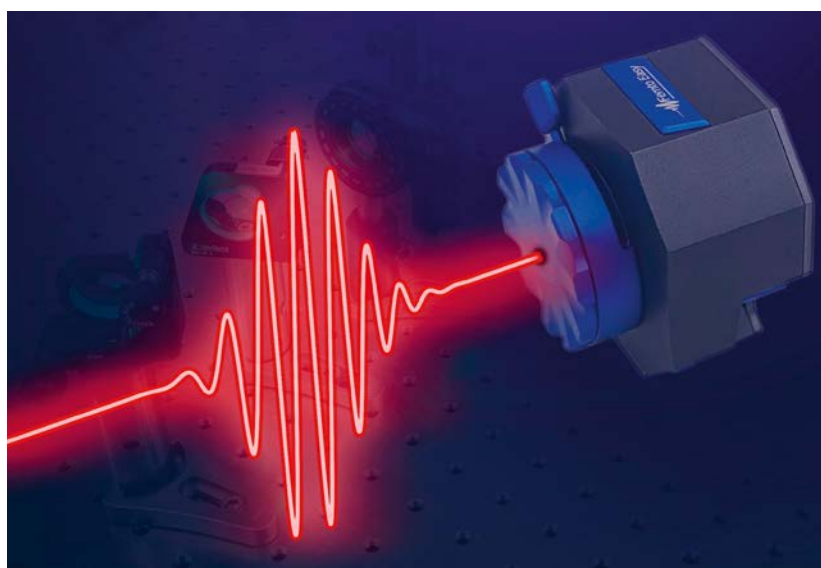
Éric CONSTANT¹, Édouard HERTZ², Antoine DUBROUIL^{3,*}

¹ Institut Lumière Matière (ILM), UMR 5306 CNRS, Univ. Claude Bernard Lyon 1, 69622 Villeurbanne Cedex, France

² Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne, UMR CNRS 6303, Université Bourgogne Franche-Comté, 21078 Dijon Cedex, France

³ Femto Easy, Batiment Gienah, Cité de la Photonique, 11 avenue de Canteranne, 33600 Pessac, France

*dubrouil@femtoeasy.eu



Les lasers ultrarapides produisent des impulsions extrêmement brèves qui permettent de concentrer l'énergie dans le temps et l'espace, ouvrant ainsi la voie à de nombreuses et surprenantes applications. Comment des impulsions aussi courtes peuvent-elles être mesurées ? Connaître les caractéristiques de l'impulsion laser étant d'un intérêt majeur pour les utilisateurs de lasers ultrarapides, de nombreuses techniques ont été développées. Et pour mesurer des événements sur de telles échelles de temps, il faut utiliser des techniques optiques.

SCIENTEC
La SoluTion à vos mesures

PHOTOMÉTRIE

Colorimétrie - Radiométrie

MESURE ET ÉVALUATION DE TOUTES
LES SOURCES LUMINEUSES

Éclairément, luminance, chromaticité,
indice de rendu des couleurs IRC,
température de couleur, valeurs
spectrales, longueurs
d'ondes crête et
dominante, pureté
d'excitation...



**APPAREILS
PORTABLES
DE HAUTE
QUALITÉ
À PRIX
ABORDABLE**

► **Luxmètre
Chromamètre
CL-200A**
Polyvalent & léger,
R&D et production...



► **Luxmètre
spectroradiomètre
CL-70F**
Économique &
performant, Tactile et
portable, Tête de mesure
rotative...



► **Photomètre
Chromamètre
CS-150/160**
Précision et convivialité,
luminance et couleur,
contrôle qualité...

► **Photomètre
Chromamètre
à réseau CS-200**
Luminance et
chromaticité,
compact et précis



SciencTec c'est aussi,
du SAV, de la formation, de la
calibration et la distribution de :
Analyseur d'écran, Photogonio-
mètres, Vidéocolorimètres,
Sources de référence...

info@scientec.fr | 01 64 53 27 00 | www.scientec.fr

Les lasers sont des outils fantastiques tant pour l'industrie que pour la recherche fondamentale, ils font même désormais partie du quotidien de chacun. Leurs applications très variées sont liées à la diversité des systèmes, allant du simple pointeur laser jusqu'à des systèmes de 300 mètres de long, capables de reproduire les conditions physiques au cœur des étoiles. Nous nous intéressons dans cet article aux lasers ultrarapides, nommés ainsi car ils produisent des impulsions lumineuses extrêmement courtes, de l'ordre de quelques fs à quelques dizaines de ps. Cette caractéristique très spécifique des lasers ultrarapides permet de très nombreuses applications, toutes plus passionnantes les unes que les autres, pour la recherche fondamentale (étude des dynamiques ultrarapides, physiques atomique et moléculaire, attoscience, biologie, microscopie multi-photonique, etc.) ou pour l'industrie (micro-usinage, chirurgie, fabrication de semi-conducteurs, écran d'affichage...)

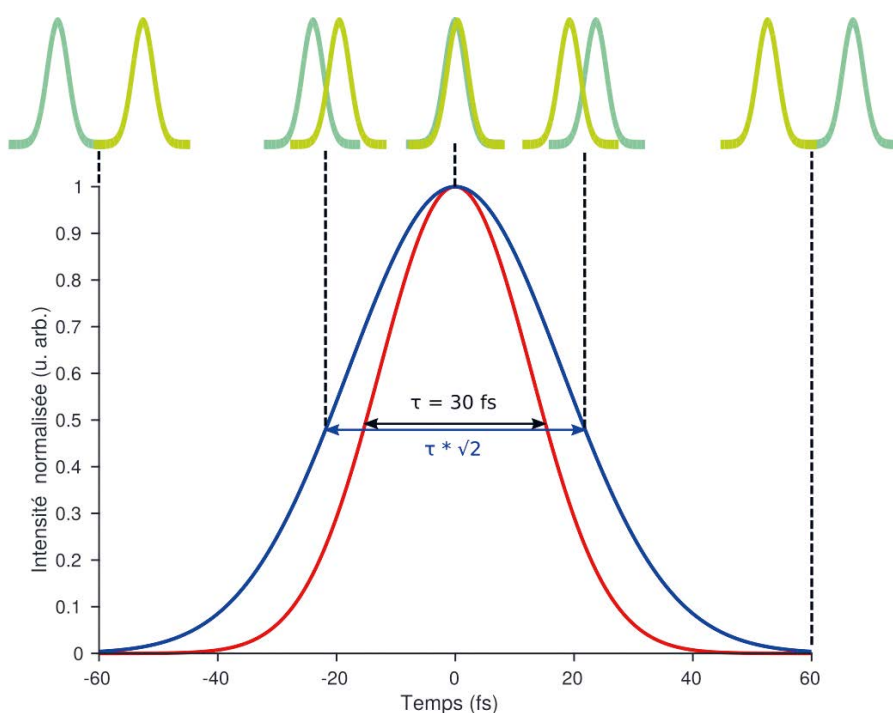
Cet article se concentre sur la problématique de mesure de la durée de leurs impulsions. En dessous d'une durée de 100 ps, il devient difficile de mesurer des événements avec des dispositifs électroniques car leurs temps de réponse caractéristiques sont beaucoup trop « longs » par rapport à l'événement à mesurer. En effet, pour pouvoir mesurer un événement avec précision, il faut pouvoir l'échantillonner avec un événement plus court. Or, les événements les plus courts que l'humanité est capable de produire et de contrôler, ce sont justement ces impulsions laser ultrarapides ! Il faut donc utiliser des techniques optiques pour pouvoir mesurer ce type d'impulsions. N'ayant pas accès à des événements plus courts que les impulsions laser elles-mêmes,

c'est justement l'impulsion laser à mesurer qui est utilisée afin de s'auto-échantillonner. En termes plus mathématiques, l'impulsion est corrélée avec elle-même, il s'agit donc d'une opération d'autocorrélation.

QUE SIGNIFIE MESURER UNE IMPULSION LASER ?

On appelle profil temporel de l'impulsion la fonction qui représente l'évolution de l'intensité laser au cours du temps lorsque l'impulsion passe en un point donné de l'espace. La durée de l'impulsion laser, notée τ , est généralement définie comme la largeur à mi-hauteur du profil temporel (voir Fig. 1). Mesurer la durée d'une impulsion revient donc en première approximation à estimer cette largeur à mi-hauteur. Il existe divers processus physiques en optique non linéaire qui permettent de réaliser une autocorrélation de l'impulsion laser. Dans le cas de l'impulsion de la figure 1, le signal mesuré est une corrélation de la fonction gaussienne avec elle-même. Or mathématiquement, l'autocorrélation d'une fonction gaussienne est également une fonction gaussienne, dont la largeur à mi-hauteur est égale à $\sqrt{2}$ fois celle de la fonction gaussienne initiale. Il suffit donc de calculer la largeur à mi-hauteur du signal d'autocorrélation mesuré et de diviser par le facteur de déconvolution $\sqrt{2}$ pour estimer la durée de l'impulsion. Cependant il s'agit ici d'un cas théorique où le profil temporel de l'impulsion est parfaitement gaussien. Dans les cas réels, il est vrai qu'il existe des impulsions gaussiennes mais c'est un cas particulier. Il existe des profils temporels d'impulsions de formes très diverses et parfois très complexes. C'est pourquoi, pour caractériser précisément une impulsion, il est souvent nécessaire de reconstruire complètement son profil temporel. Et pour cela, des techniques plus puissantes que l'autocorrélation ont été développées, néanmoins elles s'appuient à la base sur les mêmes principes.

Figure 1. Profil temporel (en rouge) et autocorrélation (en bleu) d'une impulsion gaussienne. La durée τ représentée par le segment noir est de 30 fs. La largeur à mi-hauteur de l'autocorrélation est de 42 fs. La frise au-dessus représente le délai entre les deux répliques de l'impulsion qui génèrent le signal d'autocorrélation.



Le principe est de séparer l'impulsion à mesurer en deux répliques et de les faire interagir via un effet non linéaire en scannant le délai qui les sépare. L'effet non linéaire permet d'encoder l'information temporelle car le signal généré lorsque les impulsions se recouvrent temporellement est notablement supérieur à la somme du signal de chaque impulsion prise séparément.

LES DIFFÉRENTES TECHNIQUES DE MESURE D'IMPULSIONS LASER ULTRARAPIDE

Nous avons vu précédemment que l'on peut tirer différentes informations de la mesure d'une impulsion laser selon la méthode employée. Nous allons maintenant rentrer dans le détail de la technique de base, l'autocorrélation, et donner quelques notions sur des techniques de mesure plus complexes qui permettent la reconstruction complète du profil temporel.

On appelle autocorrélateurs les dispositifs qui s'appuient sur l'autocorrélation pour mesurer la durée des impulsions laser [1]. Sans cet effet non linéaire, le signal provenant de la somme des deux impulsions permettrait de mesurer uniquement le spectre de l'impulsion (spectroscopie par transformée de Fourier). L'effet non linéaire le plus couramment utilisé dans les autocorrélateurs est la génération de seconde harmonique dans des cristaux non linéaires (voir Fig. 2). Le signal d'autocorrélation généré par les deux répliques est alors à la fréquence double de celle de l'impulsion fondamentale. Après filtrage spectral, on récupère uniquement le signal d'autocorrélation sur le détecteur. Comme expliqué au paragraphe précédent, l'information de base qui est exploitée sur cette trace d'autocorrélation est sa largeur à mi-hauteur. Pour ensuite estimer la durée de l'impulsion laser, un facteur de déconvolution qui dépend de la forme temporelle de l'impulsion (gaussienne, sécante hyperbolique...) doit être appliqué. Cependant, puisqu'on ne mesure pas le profil temporel de l'impulsion avec cette technique, on est obligé de faire une hypothèse. Et donc, selon la validité de cette hypothèse, la valeur

de la durée calculée à partir de l'autocorrélation est plus ou moins approximative. Néanmoins, un autocorrélateur est capable de faire des mesures relatives avec une grande précision car le moindre changement sur l'impulsion laser va affecter son autocorrélation. Si l'on veut caractériser l'impulsion plus précisément, il est nécessaire de recueillir plus d'informations sur l'impulsion laser et d'employer une méthode de type FROG [2] ou SPIDER [3], qui fait intervenir une mesure spectrale. En effet, la durée τ est directement reliée au spectre de l'impulsion, c'est-à-dire aux différentes longueurs d'onde émises par le laser. Pour que les impulsions laser soient les plus courtes possible, il faut que les longueurs d'onde soient synchronisées, c'est-à-dire qu'elles arrivent toutes en même temps au point de mesure. Du point de vue ondulatoire, les longueurs d'onde sont en phase et donc interfèrent constructivement autour de cet instant. En revanche, si certaines longueurs d'onde sont déphasées, elles arrivent plus tard que les autres et la durée de l'impulsion se trouve rallongée. La grandeur qui lie les différentes longueurs d'onde ensemble s'appelle la phase spectrale. La connaissance du spectre d'une impulsion et de sa phase spectrale permet de reconstruire son profil temporel réel. Les méthodes de type FROG ou SPIDER permettent donc une caractérisation plus fine que l'autocorrélation en mesurant le spectre et la phase spectrale, néanmoins elles sont plus complexes à mettre en œuvre et à analyser.

New Autocorrelator pulseCheck NX



- 200 nm - 12 μ m
- 5 fs - 500 ps
- Sensitivity <math>< 10^{-6}</math> W²
- High Dynamic Range
- High Contrast

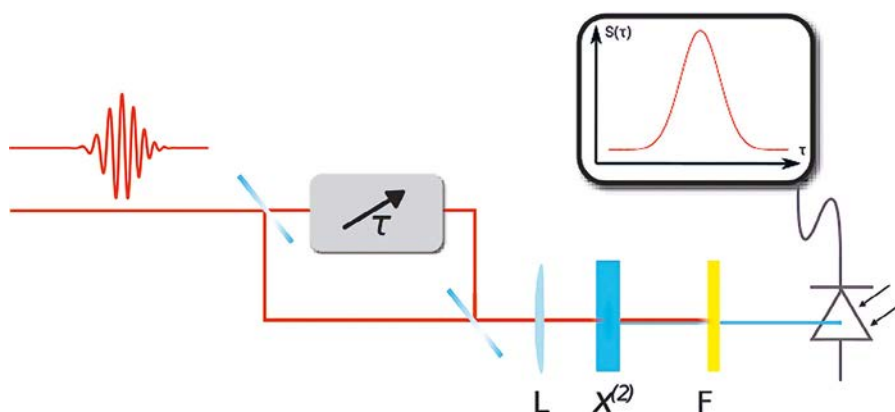


Figure 2. Schéma de principe d'un autocorrélateur multicoup par génération de seconde harmonique.

ARCHITECTURE MONOCOUP OU MULTICOUP ?

Un critère important à prendre en compte lors du choix d'un autocorrélateur est l'architecture monocoup ou multicoup. Cette architecture définit la façon dont le délai entre les deux répliques d'une impulsion est scanné. L'architecture multicoup s'appuie sur un interféromètre avec une ligne à retard comprenant un élément mobile. Ainsi chaque point de la courbe d'autocorrélation correspond à une position différente de la ligne à retard et donc à une acquisition différente. Il faut alors un grand nombre d'impulsions pour réaliser une mesure de durée. Au contraire, dans le cas d'une architecture monocoup, une seule impulsion suffit pour faire la mesure et chaque impulsion peut potentiellement être mesurée indépendamment des autres. Dans ce cas, le délai est généré de manière géométrique en croisant les deux répliques avec un angle dans le cristal non linéaire. Le

marché est aujourd'hui dominé par les autocorrélateurs multicoups pour deux raisons : ils sont plus faciles à fabriquer que les monocoups qui nécessitent des optiques de meilleure qualité et, historiquement, les autocorrélateurs monocoups étaient utilisés principalement pour les chaînes lasers basses cadences lorsque les mesures multicoups n'étaient pas adaptées. Néanmoins, des développements récents sur des architectures monocoups les ont rendus utilisables et supérieurs aux multicoups pour de très nombreux systèmes lasers. Des mesures monocoups ont été démontrées jusqu'à des cadences de quelques GHz. Les monocoups ont l'avantage d'être compacts, robustes et transportables. Aujourd'hui ces systèmes peuvent être aussi compacts qu'une

balle de golf, ce qui permet d'envisager leur intégration directement dans les têtes laser. Ils permettent une mesure simple en temps réel tout en rendant compte des fluctuations tir à tir du laser. Ils présentent donc de nombreux avantages par rapport aux dispositifs multicoups et donnent plus d'informations comme par exemple des mesures de durées résolues spatialement.

CONCLUSION

En résumé, le choix d'un dispositif de mesure dépend de l'application et des spécifications laser. Si le profil temporel joue un rôle important dans l'application visée, un dispositif à mesure de phase spectrale doit être privilégié. S'il s'agit seulement de vérifier le bon fonctionnement d'un système laser, un autocorrélateur est bien adapté. Les systèmes monocoups sont à privilégier lorsque c'est possible, les multicoups étant très pertinents pour les impulsions très longues (>10 ps) ou d'énergies ou puissances moyennes très faibles (<100 pJ). ●

RÉFÉRENCES

- [1] F. Salin *et al.*, *Rev. Phys. Appl.* **22**, 1613-1618 (1987)
- [2] R. Trebino, K. W. DeLong, D. Fittinghoff *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **68**, 3277 (1997)
- [3] C. Iaconis and I. A. Walmsley, *Opt. Lett.* **23**, 792-794 (1998)

FABRICANTS	DISPOSITIFS DE MESURE	TYPES D'ARCHITECTURES DISPONIBLES	SPÉCIFICATIONS LASER ADRESSÉES	DISTRIBUTEUR EN FRANCE	CONTACT/SITE WEB
Femto Easy	Autocorrélateur, Phase spectrale	Monocoup et Multicoup	250 nm – 3,4 μm 4 fs – 80 ps	vente directe en France	www.femtoeasy.eu info@femtoeasy.eu
APE	Autocorrélateur, Phase spectrale	Multicoup	200 nm – 12 μm 10 fs – 500 ps	Optoprim Newport Edmund Optics	www.optoprim.com www.newport.com www.edmundoptics.fr
Fastlite	Phase spectrale	Monocoup et Multicoup	380 nm – 9 μm 4 fs – 5 ps	vente directe en France	www.fastlite.com
Mesa Photonics	Autocorrélateur, Phase spectrale	Multicoup	450 nm – 4 μm 7 fs – 10 ps	Laser Peak	www.mesaphotonics.com
Sphere Photonics	Phase spectrale	Multicoup	450 nm – 1,7 μm 2,5 – 200 fs	pas de distributeur identifié	www.sphere-photonics.com