

ACHETER

Un oscillateur femtoseconde

Frédéric DRUON

Institut d'Optique, Palaiseau

frederic.druon@institutoptique.fr

Un oscillateur femtoseconde, mais pourquoi faire ? La réponse ne peut être ultra-brève à la vue de la pléthore d'applications développées autour de ce type d'instrument que ce soit en microscopie, en métrologie, en passant par le micro-usinage ou la chirurgie et allant jusqu'aux applications en physique fondamentale.

Les systèmes laser femtoseconde sont presque aussi variés que leurs applications. Il est donc important, avant de choisir un tel système, de bien évaluer les paramètres déterminants pour les expériences visées. La première question à se poser est dans l'ordre des choses : quel oscillateur choisir ? En effet, même si parfois ce dernier est intégré dans une chaîne amplifiée et que ses caractéristiques n'impactent pas l'intégralité des performances du système global, certaines de ses spécificités méritent d'être analysées. La gamme de fonctionnement des oscillateurs femtoseconde est assez large, à la fois en longueur d'onde (typiquement dans le rouge et proche IR) ; en durée (de quelques centaines de fs à sub-10 fs) ; en cadence (dizaines de MHz à quelques GHz) et en énergie (allant du nJ au μ J). Il faut aussi ajouter à ces critères le fait qu'ils ne sont pas tous compatibles entre eux et que de nombreuses options peuvent être

ajoutées, telles que la stabilisation de la phase sous l'enveloppe, l'extension en longueur d'onde par effets non-linéaires, la sélection d'impulsions, etc. Nous allons essayer de démêler cette pelote en apportant – de manière non exhaustive – quelques pistes pour répondre à une problématique d'achat.

Étude technique des oscillateurs femtoseconde

Pour bien comprendre l'anatomie d'un oscillateur femtoseconde, partons de ce truisme : c'est une cavité laser conçue pour produire des pulses ultra-brefs. Pour cela il faut insérer trois fonctions dans la cavité : du gain laser évidemment, un effet non-linéaire de type absorbant saturable (au sens large) pour favoriser le régime impulsif, et un contrôle de la dispersion de vitesse de groupe pour garantir la bonne propagation et la stabilité des impulsions

ultra-brèves dans la cavité. Analysons maintenant ces différents points pour évaluer leur impact sur le produit.

Le matériau laser a pour but premier d'amplifier, mais est à l'origine de la plupart des caractéristiques et potentialités du laser femtoseconde. Ainsi, c'est le choix du matériau laser qui va imposer la longueur d'onde centrale et la gamme d'accordabilité. Il va aussi imposer la durée minimale accessible¹. Le choix d'un oscillateur à base de fibres va être aussi un choix important en termes d'intégrabilité et de coût. D'un autre côté, les oscillateurs à cristaux permettent d'obtenir des énergies plus importantes. Enfin le choix du matériau va autoriser (ou pas) d'utiliser un pompage direct par diode laser de puissance qui permet d'avoir des lasers de forte puissance moyenne, efficaces et moins coûteux.

Le choix de l'effet non-linéaire qui va jouer le rôle d'absorbant saturable est important surtout en termes de fiabilité et reproductibilité du système. De ce point de vue, il est en général préférable de choisir le verrouillage par lentille de Kerr (*Kerr lens mode-locking*, KLM) ou par l'absorbant saturable à base de semi-conducteur (SESAM), avec l'inconvénient que le premier ne fonctionne pas pour tous types de matériaux (e.g. fibres) et que le second a tendance à restreindre la largeur spectrale.

¹ On trouvera plus de détails techniques sur le sujet dans l'ouvrage « *Systèmes femtoseconde, optique et phénomènes ultra-rapides* », pp 13-49.

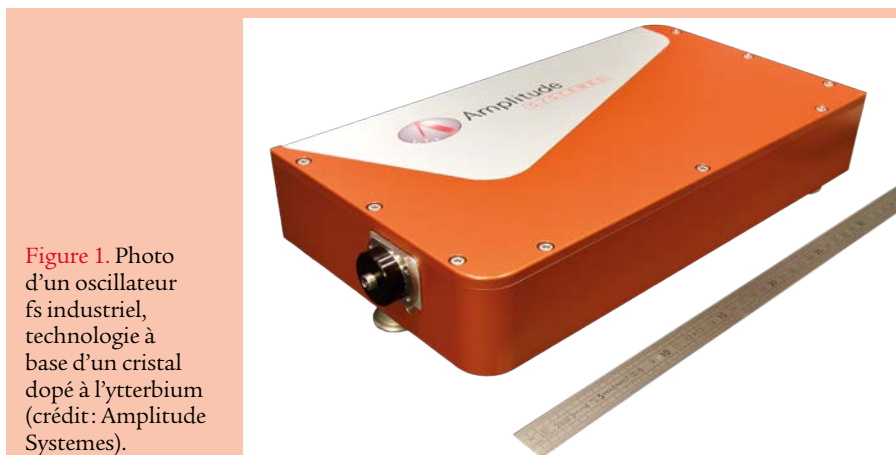


Figure 1. Photo d'un oscillateur fs industriel, technologie à base d'un cristal dopé à l'yttrium (crédit: Amplitude Systemes).

La compensation de dispersion peut être faite par des prismes ou des miroirs à dispersion contrôlée pour les systèmes à cristaux, et par des réseaux ou des fibres à dispersion contrôlée pour les systèmes fibrés. En vue de simplification et de compactisation, les systèmes à prismes ou à réseaux sont de moins en moins commercialisés. La cavité² quant à elle déterminera la cadence de l'oscillateur. Il est parfois intéressant d'opter pour des cadences basses (20-40 MHz) pour favoriser l'énergie et/ou réduire les contraintes sur un éventuel sélectionneur d'impulsion.

Le choix de l'oscillateur doit se faire en intégrant le fait que des extensions ou options peuvent lui être associées. En voici quelques exemples.

- La cadence peut être réduite par l'adjonction d'un modulateur acousto-optique ou électro-optique. Même si l'efficacité du modulateur est en général correcte, cette décimation réduit fortement la puissance moyenne et implique souvent une post-amplification.
- L'extension en longueur d'onde peut être réalisée par adjonction d'un module non-linéaire. Citons par exemple l'accès aux longueurs d'onde visibles par génération de seconde ou troisième harmoniques (SHG, THG). L'utilisation d'oscillateurs paramétriques optiques (OPO) après les lasers est aussi souvent intéressante. En effet, même si l'énergie est en général réduite par un ordre de grandeur, l'utilisation des OPO et de la SHG permet d'accéder à des longueurs d'onde couvrant plusieurs octaves.
- Des modules de compensation de dispersion peuvent être ajoutés en sortie des oscillateurs pour pré-compenser la dispersion de vitesse de groupe dans les échantillons analysés (e.g. en microscopie).
- Enfin, les lasers femtoseconde peuvent aussi intégrer des systèmes d'asservissement qui contrôlent finement la longueur optique de la cavité pour créer de nouvelles fonctions.

² En jouant sur sa longueur et le temps d'aller-retour de l'impulsion.

Ceci est utile par exemple pour garantir une synchronisation du train d'impulsions (*synchrolock*) ou pour la stabilisation de la phase sous l'enveloppe (*carrier-envelope phase*, CEP). Comme le montre la *figure 2*, ce type d'asservissement complexifie sévèrement l'architecture de l'oscillateur.

Les grandes familles d'oscillateurs

Les lasers femtoseconde commerciaux peuvent globalement se diviser en trois grandes catégories en fonction du matériau à gain, ou alors en deux types d'architectures (à base de cristaux ou de fibres dopées).

Lasers femto à cristaux

Les systèmes à base de saphir dopé au titane (Ti:Sa), qui émettent entre 700 et 1100 nm (avec plus ou moins d'accordabilité spectrale) sont hégémoniques sur le créneau des laser ultra-brefs 7-30 fs. Ceci constitue leur principal avantage. La puissance moyenne des oscillateurs est typiquement entre 100 mW et quelques W. Leur principal inconvénient est leur pompage dans le vert, ce qui engendre des systèmes plutôt complexes et chers. Le verrouillage de mode utilise le KLM. Ces lasers sont très utilisés en microscopie non linéaire (même s'ils ont tendance à être remplacés par les systèmes laser Yb+OPO) ou pour

injecter les chaînes de forte puissance crête (laser TW et PW). Les oscillateurs Ti:Sa peuvent être stabilisés en CEP et peuvent être utilisés en métrologie.

De leur côté, les lasers à cristaux dopés à l'ytterbium (Yb) ont comme principal avantage de pouvoir fournir de très fortes puissances moyennes (jusqu'à plusieurs dizaines de W) et énergies (jusqu'au μJ) car ils sont pompés directement par diodes. Cependant leur durée reste en général dans la gamme des 100-800 fs et leur émission se cantonne autour de 1030 nm. Ces systèmes utilisent généralement un SESAM, et sont *de facto* compatibles avec la technologie des amplificateurs Yb qui permettent des efficacités et puissances moyennes record.

Lasers femto à fibres

Les lasers à fibres ont l'avantage de pouvoir éviter toute propagation en espace libre, ce qui rend ces systèmes extrêmement robustes aux conditions extérieures. Ils peuvent aussi être bobinés dans des cassettes et compactifiés. Pour le verrouillage des modes en phase, ils utilisent généralement des SESAMs, ou alors ils mettent à profit les forts effets non-linéaires dans les fibres (typiquement rotation de polarisation non-linéaire). Le principal inconvénient des oscillateurs fibrés est qu'ils sont limités en énergie/puissance de par le confinement du laser dans la fibre. Cependant il existe des possibilités de rajouter des modules

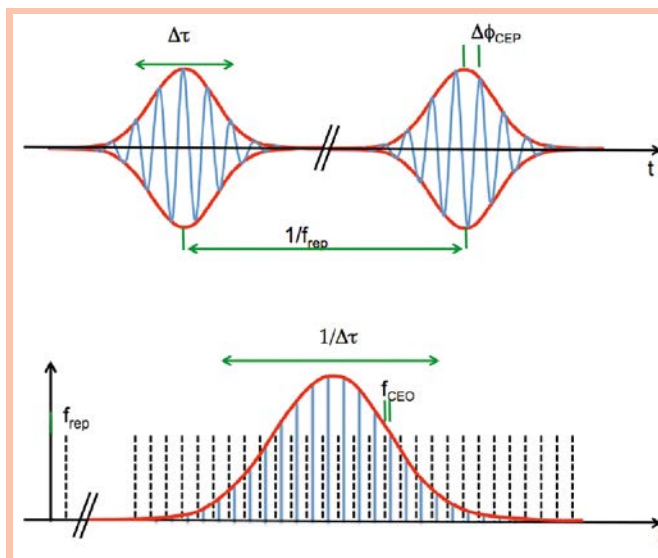


Figure 2. Correspondance temps-fréquence. Définition des fréquences de répétition f_{rep} , du décalage entre la porteuse et l'enveloppe f_{CEO} (CEO: *carrier envelope offset*), et de la CEP (*carrier-envelope phase*) du laser.

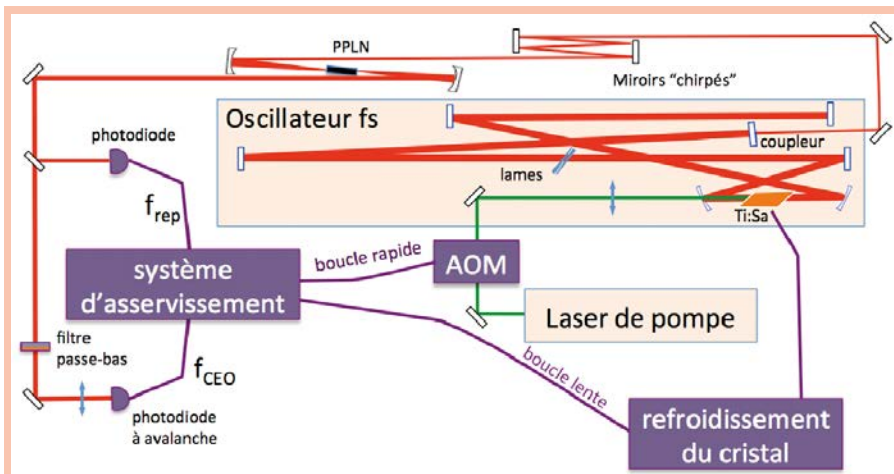


Figure 3. Exemple de laser Ti:Sa contrôlé en CEP (*carrier-envelope phase*) (source Rainbow de Femtolaser/SpectraPhysics). L'oscillateur Ti:Sa est stabilisé grâce à deux boucles d'asservissement. Le cristal non-linéaire de PPLN permet de faire une différence de fréquence entre les deux parties extrêmes du spectre que l'on fait ensuite battre avec le spectre d'origine pour mesurer f_{CEO} (CEO : *carrier envelope offset*). AOM : modulateur acousto-optique.

d'amplification pour augmenter les performances en puissance sans beaucoup plus de complexité (cf. figure 4).

Les deux principales technologies d'oscillateurs à fibre sont à base de fibres dopées Yb ou Er. Les lasers à fibre Yb émettent typiquement dans la gamme des 1030 nm pour des durées de 200 à 300 fs avec quelques dizaines de mW. Ils sont très utilisés pour injecter les systèmes à fibres de très forte puissance. Les lasers à fibre Er permettent d'obtenir des durées de 30 à 100 fs autour de 1550 nm (longueur d'onde télécom). Leur robustesse les rend intéressants pour des systèmes bas-bruit et/ou CEP avec des applications notamment en métrologie.

Que choisir ?

Avec tous ces critères, il est intéressant de mettre en avant quelques caractéristiques afin d'aider à choisir le « bon » oscillateur fs pour telle ou telle application.

La durée qui est la caractéristique éponyme des lasers femto est paradoxalement la grandeur la moins utilisée directement, et c'est, en effet, souvent sa relation avec la puissance crête ou le spectre large qui importe le plus.

Les durées des oscillateurs peuvent aller de la dizaine à quelques centaines de fs. Les durées sub-20 peuvent être primordiales pour avoir une très forte résolution temporelle ou quand on s'intéresse aux phénomènes sensibles au champ électrique (e.g. génération d'impulsions attoseconde). Cependant la durée a un coût en complexité, et la conserver est loin d'être chose aisée. On fera donc attention à ce paramètre dans les oscillateurs intégrés dans les chaînes ultrabrèves en gardant en tête que le mieux peut être l'ennemi du bien³. Quelques applications où la durée est à prendre en compte sont les expériences pompe-sonde, de spectroscopie ou luminescence résolue en temps, métrologie de wafers semiconducteurs, de photo-acoustique, THz, attoseconde...

La puissance crête est sans doute le paramètre primordial des lasers femtoseconde car il est à l'origine des applications en optique non-linéaire. Ce paramètre est très lié à l'énergie⁴. Avec des valeurs typiques d'énergie du nJ au μ J, cela donne des puissances crête entre 100 W et 100 MW, mais qui en général restent autour du MW. Les puissances crêtes peuvent être poussées dans des systèmes amplifiés jusqu'à quelques GW pour les systèmes haute cadence

³ Par exemple, pour des applications telles que le micro-usinage ou la chirurgie, des durées de quelques centaines de fs suffisent pour garantir une ionisation athermique.

⁴ La puissance crête étant le rapport de l'énergie sur la durée d'impulsion

TRIOPTICS
FRANCE

UN UNIVERS DE PRÉCISION

- Composants et systèmes optiques de précision,
- Spécialiste des surfaces asphériques, jusqu'à diam. 600 mm
- Matériaux usinés : verres, céramiques, métaux,
- Applications : bancs de test, lasers haute énergie, métrologie optique...

Expansor de faisceau à miroirs

Monture orientable motorisée

Conception optique

Optiques Laser haute énergie

Lentille diam. 300 mm en monture 5 axes

Prisme de précision

Optical Surfaces

Trioptics France

76 rue d'Alsace
69100 Villeurbanne
Téll. 07 72 44 02 03
Fax : 04 72 44 05 06
www.trioptics.fr

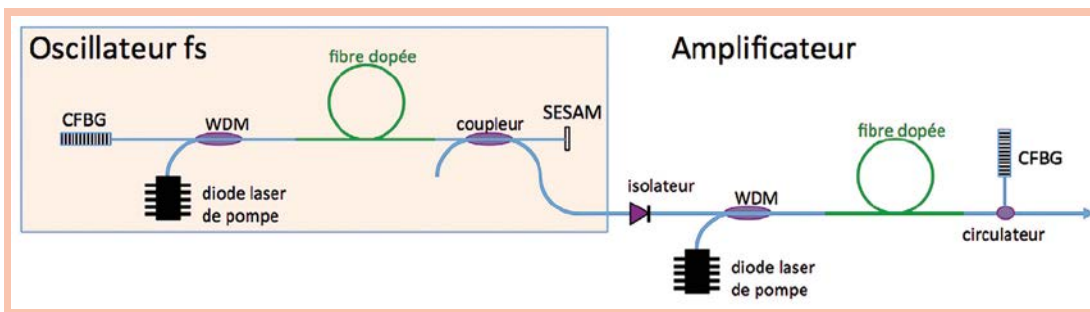


Figure 4. Exemple de laser fibré et amplifié sans alignement et ultra-compact. Les CFBG (*chirped fiber Bragg grating*) contrôlent la dispersion. Les WDM (*wavelength division multiplexing*) permettent le multiplexage de la pompe et du laser.

(à fibres typiquement) ou au PW pour les systèmes record à base de cristaux. Il existe néanmoins des applications se suffisant de l'énergie en sortie d'oscillateur telle que la microscopie non-linéaire (2PEF, CARS...) ou la génération de THz.

Le spectre des lasers étant inversement proportionnel à la durée des impulsions, les spectres des lasers ultrabrefs sont les plus larges. Cette largeur peut être utilisée avantageusement dans certains cas : pour les peignes de fréquence où le système de stabilisation (CEP et CEO) nécessite des spectres étendus, ou pour des applications en tomographie optique cohérente (OCT) pour des problématiques de résolution axiale.

La gamme spectrale du laser (couleur et accordabilité) est aussi un paramètre qui peut être important notamment pour correspondre aux spectres des fluorophores (notamment, en microscopie non-linéaire) ou simplement pour être adapté aux amplificateurs.

Enfin, la cadence est un paramètre prenant de plus en plus d'importance dans le choix, notamment grâce à l'apparition des systèmes dopés aux ions Yb qui ont permis un gain très important en termes de puissance moyenne et de récurrence des processus⁵. Au niveau

⁵ Ceci est vrai surtout pour les systèmes amplifiés.

des oscillateurs, il est à noter que les cadences basses sont plus intéressantes pour les systèmes nécessitant un réducteur d'impulsions, et les cadences élevées pour avoir un peigne de fréquence large.

Conclusion

Les oscillateurs femto offrent un panel très large. Il est donc intéressant de mettre en avant certaines grandeurs plus critiques que d'autres en fonction de l'application. Nous avons montré un certain nombre de paramètres importants – et non exclusifs. On peut noter aussi que la stabilité, la fiabilité, la compacité sont aussi primordiaux pour de nombreuses applications.

GUIDE DES OSCILLATEURS

FOURNISSEUR	MARQUES	PRODUITS	CONTACT
Coherent	Coherent	Ti: Sa, Yb	Jean-Luc Tapié - jean-luc.tapie@coherent.com +33 1 80 38 10 11 / +33 6 09 17 40 72
Microcontrole Spectra Physics	Spectra -Physics High-Q	Ti: Sa, Yb	Dalila Ait-Amir - dalila.aitamir@newport.com +33 1 60 91 68 45
Amplitude Systemes	Amplitude Systemes	Yb	Vincent Rouffiange - vrouffiange@amplitude-systemes.com +33 5 56 46 40 62
Acal Bfi	Ekspla Onefive	Fibre Er Fibre Yb	Dadi Wang - dadi.wang@bfioptilas.com +33 1 60 79 59 84
Optoprim	Ligthconversion Fianium M-Squared	Yb Ti:Sa Ti:Sa	François Beck - fbeck@optoprim.com +33 1 41 90 33 77
Opton Laser	Advalue Photonics Laser Quantum Toptica	Fibre Er Fibre Yb	Vincent Aubertin - vincent.aubertin@optonlaser.com +33 1 69 41 04 05
Novae	Novae		Nicolas Ducros - n.ducros@novae-laser.com +33 6 58 09 12 89
KMLabs Lasers	KMLabs Lasers		Kapteyn-Murnane Laboratories Inc., USA Malcolm Warrand - mwarrand@kmlabs.com +1 303 544 9068
Imra	Imra	Fibre Er Fibre Yb Fibre Tm	Imra, USA - lasers@imra.com +1 734 930 2560
Menlo	Menlo	Fibre Er, Yb	Menlo Systems GmbH, Germany - sales@menlosystems.com +49 89 189166-0