

Implémentation du filtre non linéaire XPW

Chapitre 7

Implémentation du filtre non linéaire XPW

1.	<i>Limitations pour les caractéristiques de l'impulsion initiale</i>	161
1.1.	Taux de répétition du laser	162
1.2.	Durée de l'impulsion.....	162
2.	<i>Implémentation du filtre XPW au microjoule</i>	164
3.	<i>Implémentation du filtre XPW au millijoule : double CPA</i>	166
3.1.	Premier système CPA	166
3.2.	Dispositif de filtrage.....	167
3.3.	Deuxième système CPA.....	168
4.	<i>Implémentation du filtre en fin de chaîne</i>	169
5.	<i>Conclusion</i>	170
	<i>Bibliographie</i>	171

L'objectif de ma thèse était d'étudier et de concevoir un dispositif efficace pour l'amélioration du contraste d'impulsions femtosecondes. Le filtrage non linéaire basé sur la génération de polarisation croisée dans des cristaux de BaF_2 s'est avéré être un dispositif tout à fait satisfaisant. Nous avons démontré qu'il répond à tous les critères exigés.

Son implémentation dans un système laser très haute puissance crête (100 TW, voire 1 PW) nécessite de réaliser un compromis entre les deux considérations suivantes.

D'une part, le bon contraste de l'impulsion transmise par le filtre sera bien conservé s'il n'est pas nécessaire d'injecter celle-ci dans les amplificateurs à fort gain (pré-amplificateurs). Du point de vue du contraste, il paraît donc judicieux d'installer le filtre lorsque l'impulsion a atteint un niveau d'énergie élevé.

D'autre part, l'efficacité de transmission du filtre, de 20%, éventuellement de 40% dans certaines conditions spatiales, oblige à prendre en compte les grandes pertes d'énergie subies si l'impulsion est très énergétique.

Au laboratoire, une chaîne haute intensité (500 TW) à fort contraste (10^{10}) est en cours de montage. Il s'agit de LUIRE, *Laser Ultra-Intense à Récurrence Elevée*. Cette chaîne vise à installer un filtre XPW dans le cadre d'un double CPA. Ce chapitre de perspectives propose ainsi quelques pistes de discussion quant aux choix possibles pour l'implémentation du filtre XPW dans une chaîne laser dont on souhaite améliorer le contraste.

La première partie rassemble les caractéristiques nécessaires que doit présenter l'impulsion avant filtrage. Les paragraphes suivants posent les conditions d'installation du filtre selon la gamme d'énergie de l'impulsion injectée dans le filtre : microjoule, millijoule, joule.

1. Limitations pour les caractéristiques de l'impulsion initiale

Les études détaillées dans ce manuscrit ont permis d'établir les caractéristiques requises des impulsions laser pour le filtrage temporel par génération de polarisation croisée.

L'impulsion initiale, polarisée linéairement, est comprimée à la limite de Fourier et de durée inférieure à 1 ps. L'intensité crête nécessaire sur le cristal est de l'ordre de 10^{12} Wcm^{-2} .

Pour obtenir un très bon contraste après filtrage, les polariseurs employés doivent présenter un taux d'extinction élevé. Enfin, un profil spatial propre est préférable, mais non indispensable, afin d'optimiser la transmission du filtre.

Les autres caractéristiques du laser peuvent être discutées.

1.1. Taux de répétition du laser

L'effet de génération de polarisation croisée, instantané et sans effet thermique, ne dépend absolument pas de la cadence du laser. Par contre, cette spécification influence les caractéristiques du filtre en terme de stabilité. En effet, nous avons vu au chapitre 6 (p. 152) que le faisceau filtré est d'autant plus instable que la source l'est.

Il est donc préférable d'utiliser une source stable, c'est-à-dire émettant des impulsions à haute cadence, de type kilohertz.

1.2. Durée de l'impulsion

La limite supérieure de durée d'impulsions pour le filtrage XPW a été évoquée au chapitre 6 (p. 137). Le seuil de dommage du cristal impose de travailler avec des impulsions plus brèves que 1 ps.

Il n'y a, a priori, pas de limite inférieure en durée pour le processus de conversion. L'achromaticité du phénomène autorise la conversion d'impulsions à spectre très large.

Les impulsions très courtes, de durée environ 10 fs, présentent souvent des défauts de profil temporels, tels qu'impulsions parasites [7.1-7.3] ou piédestal [7.4] dus à de fortes modulations sur ces spectres extrêmement larges et à des distorsions de phase résiduelles. L'utilisation d'un filtre XPW pour de telles impulsions pourrait avoir pour but d'amoindrir ces défauts.

Notons que le point critique pour les impulsions sub-10 fs est la phase spectrale du second ordre introduite par les matériaux. Nous savons en effet que le chirp influence l'évolution spectrale lors du filtrage. Par exemple pour une impulsion de 10 fs, de spectre de largeur à mi-hauteur 90 nm centré à 800 nm, nous pouvons calculer l'évolution spectrale pendant le filtrage grâce au modèle développé dans le chapitre précédent (p. 140-146). Le calcul fait l'hypothèse que le spectre original est gaussien, ce qui est rarement le cas des spectres très larges. La figure 7.1, résultat du calcul, montre que le spectre après filtrage sera plus étroit qu'à l'origine si la phase spectrale du deuxième ordre de l'impulsion initiale excède $\pm 100 \text{ fs}^2$, ce qui est très faible.

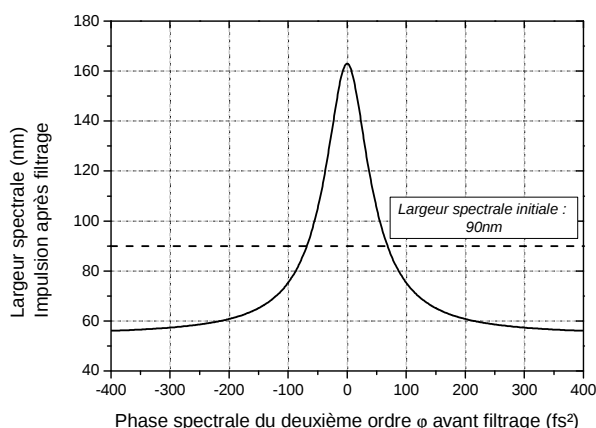


Figure 7.1 : Largeur spectrale après filtrage calculée selon la valeur initiale de phase spectrale pour une impulsion de durée 10 fs.

Cette constatation indique clairement qu'il est nécessaire de compenser soigneusement la phase des matériaux précédant le filtre.

Notons également que, toujours d'après ce graphe, le spectre peut être encore élargi durant le processus de filtrage si la phase est nulle. Ce résultat est à entourer de précautions, étant donné que le calcul est effectué en considérant un spectre initial gaussien, ce qui, expérimentalement, ne serait pas exact pour des impulsions si brèves. Par contre, cela indique que le spectre serait vraisemblablement modifié par le processus XPW.

Quant à la dispersion introduite par les cristaux eux-mêmes ($130 \text{ fs}^2 \text{ cm}^{-1}$ pour le BaF_2), elle est négligeable. Par exemple 2 mm de matériau ajoutent 26 fs^2 et la durée de l'impulsion passe de 10 fs à 12 fs. Il n'y aura pas de diminution de l'efficacité de conversion due à l'élargissement temporel de l'impulsion dans les cristaux.

Une fois ces considérations prises en compte, le filtrage non linéaire par génération de polarisation croisée est adapté aux impulsions sub-10 fs.

Du point de vue énergétique, nous avons obtenu des rendements équivalents pour des impulsions d'énergie allant de quelques microjoules à quelques millijoules. Les limites supérieures en énergie sont technologiques et dépendent du choix d'implémentation du filtre.

2. Implémentation du filtre XPW au microjoule

L'implémentation du filtre par génération de polarisation croisée au niveau d'énergie microjoule correspond à une configuration pour l'amélioration du contraste décrite dans le chapitre 1 (p. 22). Le filtre temporel, alors un absorbant saturable, est placé après un pré-amplificateur fonctionnant en régime femtoseconde.

Le filtre XPW, composé de un ou deux cristaux de BaF_2 entre polariseurs croisés, remplacerait l'absorbant saturable. Les avantages du processus XPW par rapport à l'absorbant saturable sont nombreux. Le filtre engendre une amélioration du contraste d'au moins quatre ordres de grandeur (contre deux ordres de grandeur seulement pour l'absorbant saturable). Il n'introduit pas de modulations spectrales et résiste à une cadence élevée.

Cette configuration est résumée par le schéma suivant (fig. 7.2):

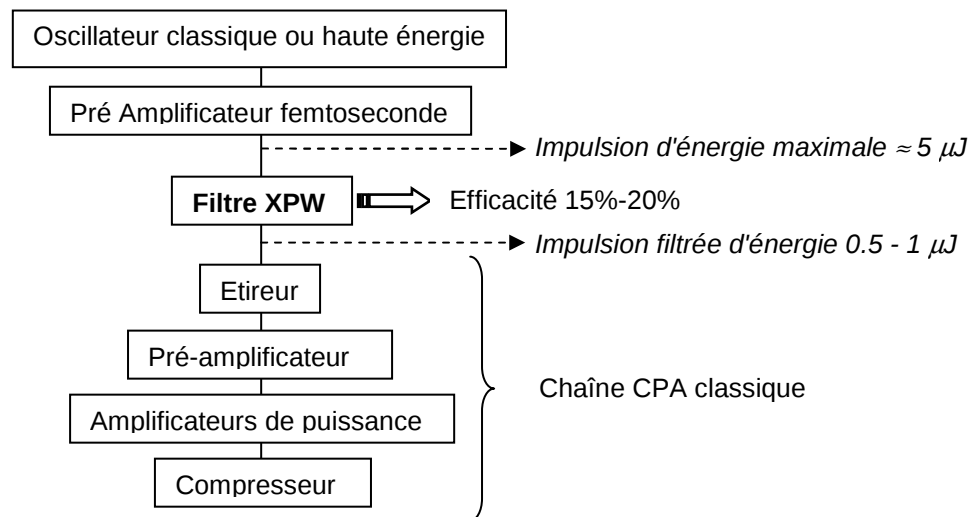


Figure 7.2 : Schéma d'un système CPA incluant un filtre XPW fonctionnant au microjoule

L'avantage de cette méthode est qu'elle ne comprend qu'un seul système CPA. Par contre, quelques points délicats doivent être pris en compte.

Considérons tout d'abord le filtre non linéaire. Nous avons vu (chap. 6, p. 146) qu'il est préférable que l'impulsion soit parfaitement comprimée lors de l'interaction. Il faut donc prévoir de compenser avant filtrage la dispersion introduite par le pré-amplificateur (cristal amplificateur), l'éventuelle cellule de Pockels pour sélectionner la cadence, et les divers éléments optiques

(lentilles, premier polariseur du filtre...). Cette compensation peut être effectuée avec un Dazzler ou des miroirs chirpés. De plus, le pré-amplificateur doit être stable pour permettre un fonctionnement correct du filtre.

D'autre part, l'énergie maximale disponible en sortie d'un tel pré-amplificateur est de 4 ou 5 μJ . L'efficacité du filtre est de l'ordre de 15% - 20%. L'impulsion filtrée présente ainsi un très bon contraste mais une énergie faible, inférieure à 1 μJ . Il faut l'injecter dans un pré-amplificateur à fort gain avant les amplificateurs de puissance.

Bien sûr, le gain du premier étage d'amplification est moins élevé que dans une chaîne CPA classique puisque l'énergie de l'impulsion nettoyée est 100 à 200 fois plus énergétique qu'un oscillateur traditionnel.

Il est donc certain que le contraste final du système incluant ce filtre au microjoule sera meilleur que celui d'une chaîne classique. Il est par contre difficile d'estimer de combien d'ordres de grandeur. En effet, nous ne savons pas si le contraste de l'impulsion temporellement propre est préservé lors de la pré-amplification.

Des travaux concernant l'installation d'un filtre XPW à la suite d'un pré-amplificateur femtoseconde sont actuellement en cours au laboratoire CUOS (*Center for Ultrafast Optical Science*) au Michigan.

3. Implémentation du filtre XPW au millijoule : double CPA

Nous avons démontré expérimentalement que le filtre XPW est adapté pour des impulsions d'énergie 1 ou 2 mJ. Cette propriété a été validée en vue de l'implémentation du filtre dans une chaîne de type double CPA.

En effet, les travaux réalisés récemment au MBI à Berlin, où a été monté le premier double CPA pour l'amélioration du contraste, semblent indiquer qu'une impulsion filtrée au millijoule peut être ensuite amplifiée jusqu'à 20 mJ en préservant son bon contraste [7.1].

Au laboratoire, nous avons choisi pour LUIRE d'implémenter le filtre après pré-amplification au niveau millijoule (fig. 7.3).

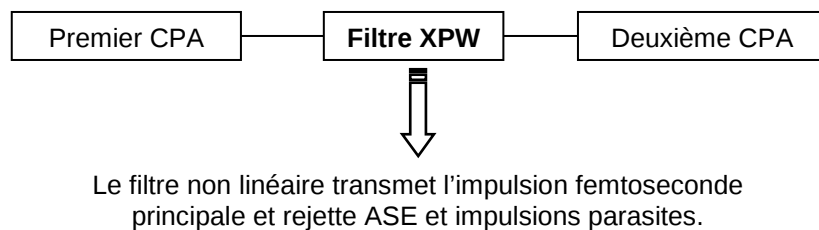


Figure 7.3 : Schéma de principe d'un double CPA incluant un filtre non linéaire

3.1. Premier système CPA

L'objectif du premier système CPA est de fournir des impulsions comprimées d'énergie 1 mJ, cadence kilohertz pour une meilleure stabilité.

Un pré-amplificateur classique fonctionnant à une telle cadence émet généralement des impulsions d'énergie environ 1 mJ. Un compresseur à réseaux standard introduirait ensuite au moins 30 % de pertes en énergie : 700 μ J, au mieux seraient alors disponibles. Le premier CPA doit donc s'affranchir des pertes du compresseur.

Une solution est d'étirer l'impulsion en introduisant une dispersion négative, au contraire d'un étireur classique [7.2], pour comprimer ensuite l'impulsion par propagation dans un matériau transparent. Ceci est appliqué par exemple aux systèmes très haute cadence, afin d'éviter toute perte excessive d'énergie après amplification [7.3].

La configuration actuellement envisagée par le laboratoire est résumée par le schéma de la figure 7.4.

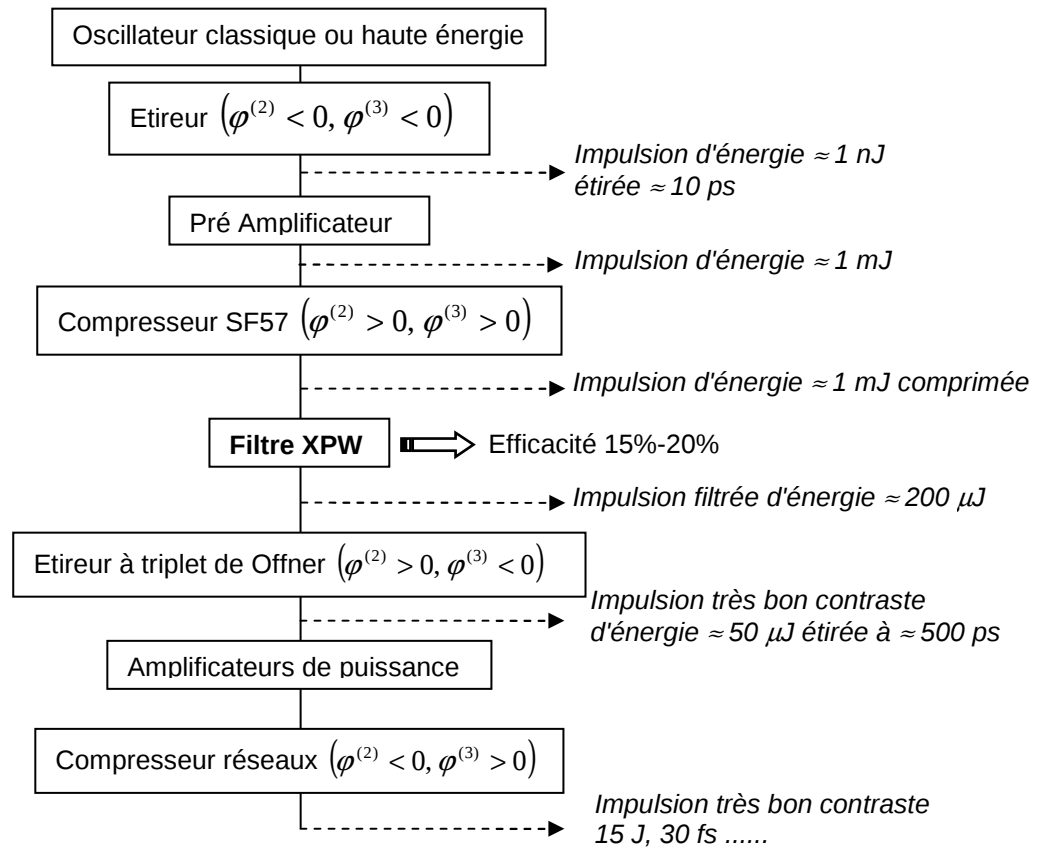


Figure 7.4 : Schéma d'un système double CPA incluant un filtre XPW fonctionnant au millijoule

L'étireur est une configuration particulière qui introduit une phase spectrale du deuxième et troisième ordre négatives et allonge la durée de l'impulsion à une dizaine de picosecondes. Après pré-amplification, l'impulsion d'énergie environ 1 mJ est comprimée par traversée de matériaux très dispersifs tels que le SF 57 ($2200 \text{ fs}^2 \text{cm}^{-1}$) taillés à l'angle de Brewster pour minimiser les pertes par réflexion.

L'inconvénient du dispositif est le manque de souplesse de réglage du compresseur. Il est envisageable d'ajouter un Dazzler à la suite de l'oscillateur pour un ajustement fin des valeurs de phase spectrale.

L'impulsion ne subit donc aucune perte d'énergie pendant la compression. Elle est ensuite injectée dans le filtre XPW.

3.2. Dispositif de filtrage

Le filtre est prévu pour fonctionner dans les mêmes conditions que celles décrites dans le chapitre 6, paragraphe 1 (p. 127). Une lentille longue focale (2.5 m -3 m) est nécessaire pour

focaliser le faisceau sur les deux cristaux de BaF₂. Le filtre est installé dans une cellule sous vide primaire pour éviter tout effet non linéaire supplémentaire dû à la focalisation du faisceau dans l'air.

La cellule prévue est un tube en acier inox, de diamètre 320 mm, de longueur 1600 mm. Elle comprend le filtre XPW replié, dont un schéma de principe est représenté figure 7.5.

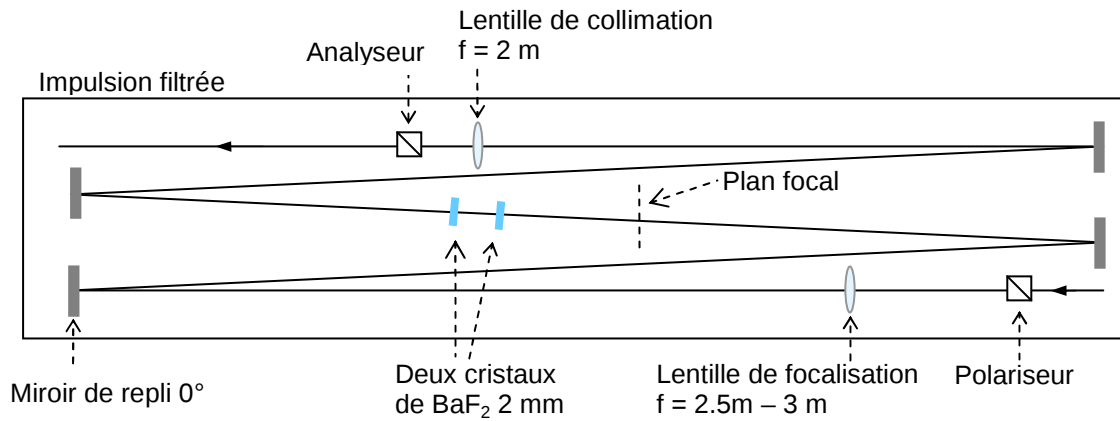


Figure 7.5 : Filtre XPW replié dans la cellule sous vide

Les miroirs de repli fonctionnent à incidence quasiment normale pour éviter une dépolarisation excessive du faisceau qui dégraderait le taux d'extinction des polariseurs et donc le contraste final de l'impulsion. La grande longueur du tube prévient tout dommage sur les miroirs qui encadrent le plan focal. Les supports des deux cristaux seront motorisés pour permettre leur déplacement l'un par rapport à l'autre une fois la cellule placée sous vide.

La cellule est modélisée et est actuellement en cours de réalisation.

3.3. Deuxième système CPA

Le deuxième système CPA ne présente pas d'innovation technologique majeure (fig. 7.4). L'étireur à triplet de Offner allonge la durée de l'impulsion filtrée à plusieurs centaines de picosecondes. Un compresseur standard à réseaux suivra plusieurs amplificateurs de puissance fonctionnant à un taux de répétition de 10 Hz.

Le dispositif décrit ci-dessus est adapté à des impulsions d'énergie 1 mJ ou 2 mJ, de durée environ 30 fs. Le filtrage d'impulsions très énergétiques (5 mJ à 10 mJ par exemple) requiert l'usage de lentille très longue focale qui finit par poser des problèmes évidents d'encombrement.

4. Implémentation du filtre en fin de chaîne

Une dernière solution envisageable consiste à implémenter le filtre XPW en fin de chaîne laser.

Considérons par exemple une chaîne 100 TW Ti: Sa émettant des impulsions d'énergie 3 J avec une durée de 30 fs. La section du faisceau en fin de chaîne peut atteindre 70 mm. Dans ce cas l'intensité crête d'une telle impulsion après compression sans focalisation atteint environ $2 \cdot 10^{12} \text{ Wcm}^{-2}$. De même, une chaîne 100 TW basée sur l'amplification dans du verre dopé au néodyme ($1.06 \mu\text{m}$) génère des impulsions de 20 J, 300 fs avec un diamètre de faisceau de 90 mm. L'intensité est alors de l'ordre de 10^{12} Wcm^{-2} .

La gamme d'intensité disponible est suffisante pour envisager de filtrer l'impulsion en champ proche, en employant un cristal de BaF_2 de grande dimension de longueur 2 mm ou 3 mm. En champ proche, le profil spatial du faisceau peut être plus ou moins top-hat. L'efficacité de conversion du processus XPW, si le profil spatial ne présente pas de surintensités, pourrait atteindre 30% à 40%. La perte d'énergie reste considérable.

Le choix des polariseurs pose de plus un souci technologique. Il est nécessaire d'utiliser des polariseurs par réflexion (fig. 7.6).

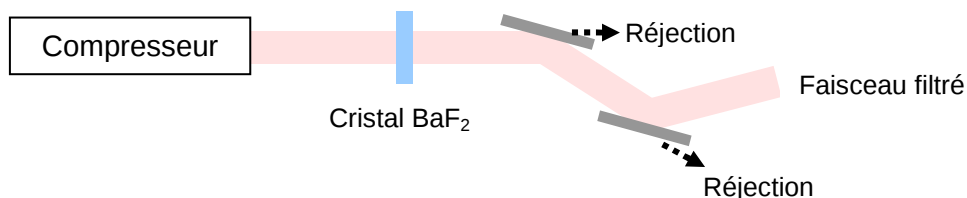


Figure 7.6 : Schéma d'un filtre XPW implémenté en fin de chaîne 100 TW

Ces polariseurs, pour les impulsions de durée inférieure à 100 fs, sont moins efficaces que des polariseurs de Glan. Le taux d'extinction est de l'ordre de 10^{-2} . Au moins deux polariseurs doivent suivre le cristal pour obtenir quatre ordres de grandeur d'amélioration sur le contraste. Il faut alors également tenir compte des pertes supplémentaires par réflexion ($\approx 4\%$ par face).

L'installation du filtre en fin de chaîne est possible mais au prix d'une grande perte d'énergie (plus de 70%). L'efficacité du filtre, en terme de transmission et de contraste, est moins avantageuse que celle offerte par des miroirs à plasma, par exemple (cf chapitre 1, p. 25). Mais le filtre XPW présente un encombrement réduit et une relative simplicité de mise en œuvre.

5. Conclusion

Pour conclure, l'implémentation du filtre XPW après pré-amplification femtoseconde, c'est-à-dire au niveau microjoule présente l'avantage d'une mise en œuvre assez simple. Cependant, en l'absence de modélisation réaliste de l'amplification de l'émission spontanée, une grande incertitude demeure quant à la conservation du contraste lors de l'inévitable pré-amplification.

Le filtrage par génération de polarisation croisée en fin de chaîne laser peut fonctionner de manière anecdotique car l'implémentation du filtre n'est pas excessivement complexe. Les pertes consécutives d'énergie sont beaucoup trop grandes pour envisager une installation définitive.

La solution la plus équilibrée est celle du double CPA incluant le filtrage d'impulsions millijoules. Tout d'abord, cette solution ne présente pas de risque technologique majeur. De plus, le fonctionnement du filtre dans cette gamme d'énergie est maintenant bien connu et maîtrisé. Enfin, l'impulsion filtrée est suffisamment énergétique pour être réinjectée dans un amplificateur de puissance, à faible gain. Dans cette configuration, le contraste sera conservé jusqu'à ce que l'impulsion atteigne une énergie de quelques joules, voire davantage.

Nous sommes tout à fait confiants dans cette technique, qui devrait donner, au laboratoire, dans les mois à venir, confirmation de sa pertinence.

BIBLIOGRAPHIE :

- [7.1] P. Schlup, J. Biegert, C. P. Hauri, G. Arisholm and U. Keller "*Design of a sub - 13 fs, multi-gigawatt chirped pulse optical parametric amplification system*", Applied Physics B Lasers and Optics 79, 285-288.
- [7.2] R. T. Zinkstok, S. Witte, W. Hogervorst and K. S. E. Eikema "*High power parametric amplification of 11.8 fs laser pulses with carrier-envelope phase control*", Optics Letters 30, 78-79.
- [7.3] N. Ishii, L. Turi, V. S. Yalovlev, T. Fuji, F. Krausz, A. Baltuska, R. Buktus, G. Veitas, V. Smilgevicius, R. Danielus and A. Piskarkas "*Multimillijoule chirped parametric amplification of few-cycle pulses*", Optics Letters 30, 567-569.
- [7.4] F. Tavella, K. Schmid, N. Ishii, A. Marcinkevicius, L. Veisz, F. Krausz (2005) "*High-dynamic range pulse-contrast measurements of a broadband optical parametric chirped-pulse amplifier*", Applied Physics B Laser and Optics 81, 753-756.
- [7.5] M. P. Kalashnikov, E. Risse, H. Schönnagel and W. Sandner (2005) "*Double CPA : a way to temporally clean pulses ?*", Optics Letters 30, 923-925.
- [7.6] G. Chériaux (1997) "*Influences des distorsions de phase sur le profil d'impulsions femtosecondes dans l'amplification à derive de frequences*", Thèse de doctorat de l'Université Paris XI.
- [7.7] D. M. Gaudiosi, A. L. Lytle, P. Kohl, M. M. Murnane, H. C. Kapteyn and S. Backus (2004) "*11-W average power Ti:Sapphire system using downchirped pulse amplification*", Optics Letters 29, 2665-2667.

