

**DISPOSITIFS DE CONTROLE DU CONTRASTE ET DES
FLUCTUATIONS DES IMPULSIONS ULTRABREVES
UTILISANT DES PHOTOCONDUCTEURS..... 127**

4.A Nettoyeur de pré-impulsion et de piédestal d'émission spontanée
amplifiée (ASE) par une cellule de Pockels ultrarapide..... 127

4.A.1. Principe de nettoyage des impulsions..... 130

4.A.2. Cellule de Pockels ultrarapide : systèmes commerciaux existants..... 132

4.A.3. Cellule de Pockels déclenchée par photoconducteur 134

4.A.3.a) Nouveau Cristal Electro-optique : le RTP (RbTiOPO_4) 134

4.A.3.b) Circuits de décharge par photoconducteurs 135

4.A.3.b.i) Système basé sur la décharge rapide de la capacité..... 135

4.A.3.b.ii) Système basé sur une ligne d'impédance continue..... 139

4.A.3.c) Résultats expérimentaux 142

4.A.3.c.i) Description du montage expérimental..... 143

*4.A.3.c.ii) Vitesse de commutation, contraste, ouverture complète,
jitters expérimentaux 144*

4.A.3.c.iii) Modification du comportement avec le diamètre de faisceau 147

*4.A.3.c.iv) Modification du comportement avec l'énergie d'éclairement
des photoconducteurs 148*

4.A.4. CONCLUSION..... 148

Chapitre 4: Dispositifs de contrôle du contraste et des fluctuations des impulsions ultrabrèves utilisant des photoconducteurs

4.B Stabilisation des impulsions en énergie	149
<i>4.B.1. Principe de fonctionnement du stabilisateur</i>	<i>149</i>
<i>4.B.2. Performances optimales théorique.....</i>	<i>152</i>
<i>4.B.3. Résultats expérimentaux</i>	<i>154</i>
<i>4.B.4. Conclusion sur le stabilisateur</i>	<i>156</i>
4.C CONCLUSION ET PERSPECTIVES	157

4. Dispositifs de contrôle du contraste et des fluctuations des impulsions ultrabrèves utilisant des photoconducteurs

Dans le système de la caméra à balayage de fente étudié précédemment, nous avons aperçu certains problèmes expérimentaux liés à ce que nous avons appelé le piédestal d'ASE, c'est à dire, l'émission spontanée amplifiée précédant l'impulsion. L'énergie optique contenue dans ce piédestal n'est pas seulement gênante pour la synchronisation des caméras à balayage de fente mais intervient dans toutes les interactions de ce type de laser avec la matière. Dans la plupart des cas, l'intérêt des lasers femtosecondes est d'exciter très rapidement avec des puissances instantanées colossales la matière. L'interaction est complètement modifiée si la matière est préalablement excitée par de la lumière à niveau de puissance un peu moins élevé (celle contenue dans le piédestal). Par exemple, dans l'interaction d'une impulsion laser ultracourte avec une cible solide, le piédestal peut être d'énergie suffisante pour générer un plasma, et donc l'impulsion laser principale n'interagit plus avec le solide simple.

Les dispositifs présentés dans cette partie sont des exemples d'applications des photoconducteurs aux lasers femtosecondes, en particulier aux deux principaux problèmes des chaînes femtosecondes amplifiées que sont le contraste en énergie due à l'émission spontanée amplifiée (ASE) et le problème des fluctuations en énergie coup à coup des lasers. Ce sont des adaptations des photoconducteurs aux cellules de Pockels pour améliorer le contraste et la stabilité en énergie.

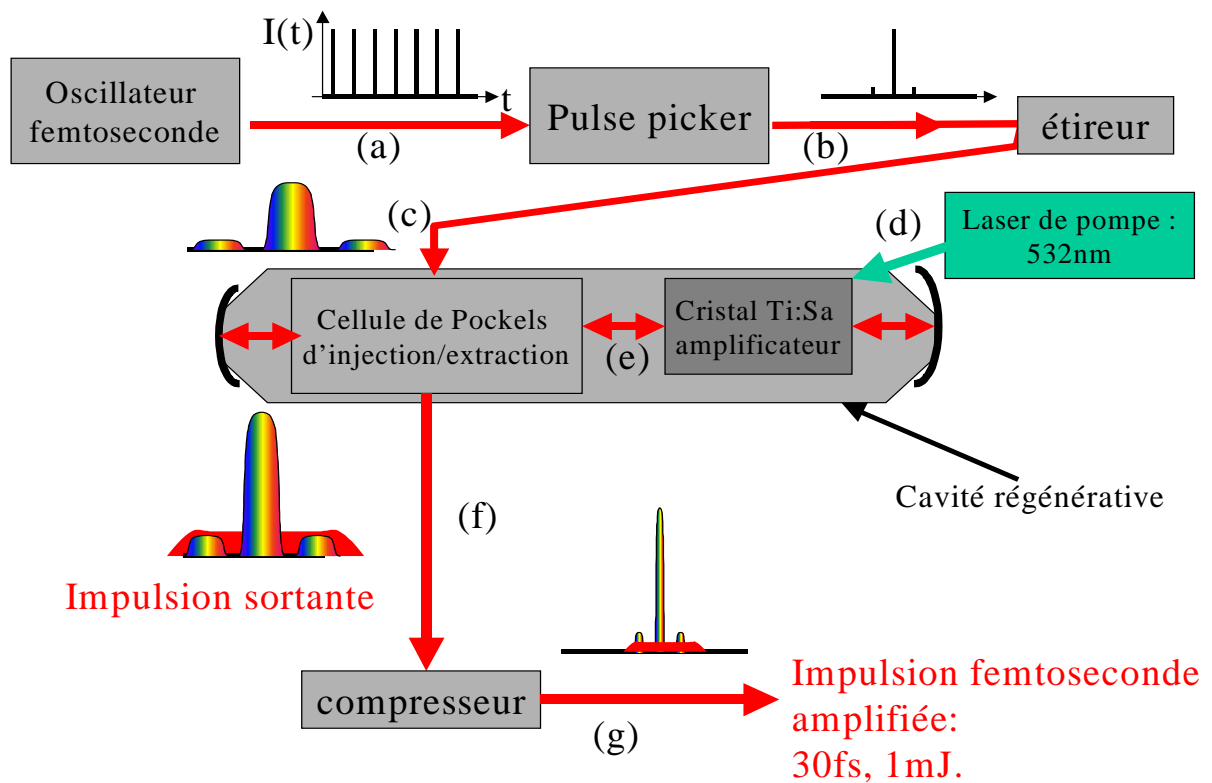
4.A Nettoyeur de pré-impulsion et de piédestal d'émission spontanée amplifiée (ASE) par une cellule de Pockels ultrarapide

Deux éléments différents contribuent au piédestal de l'impulsion laser dégradant le contraste :

Chapitre 4: Dispositifs de contrôle du contraste et des fluctuations des impulsions ultrabrèves utilisant des photoconducteurs

- l'émission spontanée amplifiée qui est de la fluorescence amplifiée dans la cavité laser (multi passage ou régénérative),
- les pré impulsions qui sont des impulsions précédentes du train de l'oscillateur qui ont pu passer à travers le sélecteur d'impulsion (« pulse picker »), et qui peuvent dans les cavités régénératives se retrouver proches de l'impulsion principale du fait de la proximité des temps de répétition de l'oscillateur et d'un tour de cavité régénérative.

La figure 4.1 ci-dessous rappelle le fonctionnement d'un laser CPA avec cavité régénérative et l'allure de l'impulsion de sortie ainsi que les causes du piédestal.



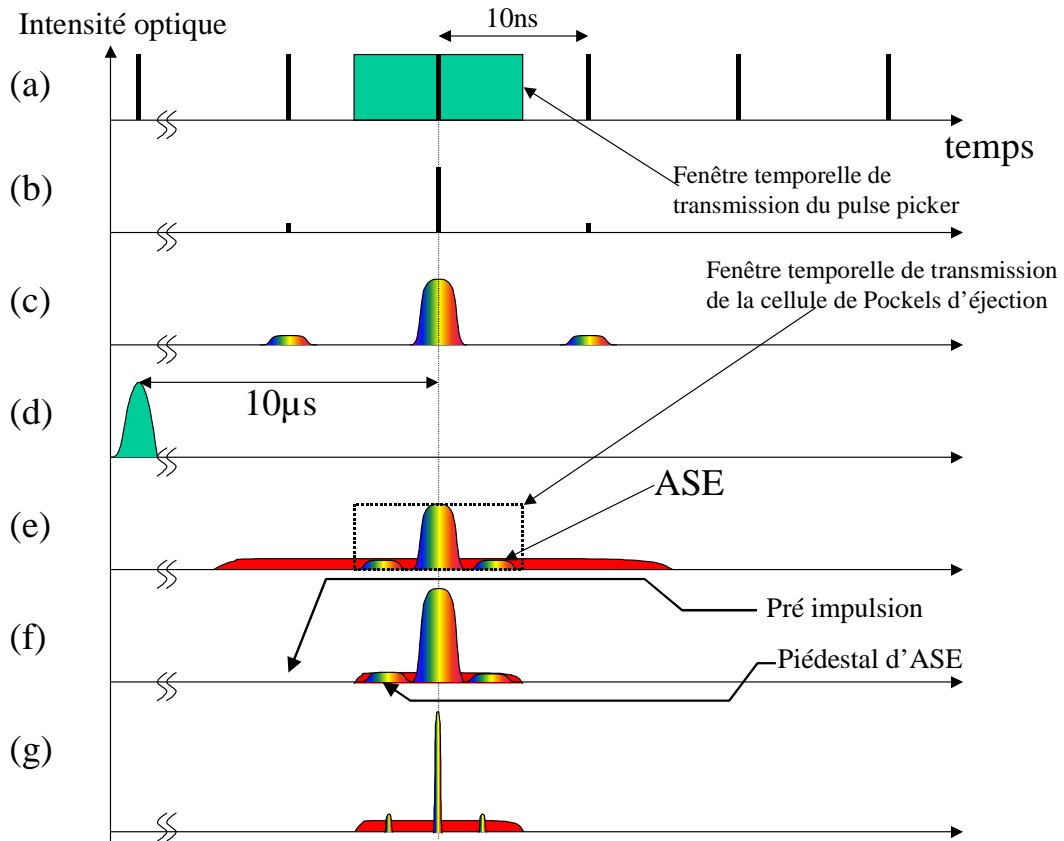


Figure 4.1: schéma de fonctionnement d'un laser de type CPA et représentation des différents délais et allure des impulsions entre les étapes (a) à (f) (les rapports entre intensités de pré impulsions, piédestal d'ASE, impulsion ne sont pas respectés, seules leurs évolutions le sont).

La figure 4.1 est schématique et permet simplement d'identifier les différentes causes de la détérioration du contraste. Les délais représentés ne tiennent pas compte de la propagation de la lumière et des allers-retours dans la cavité régénérative (environ 20 tours). La figure montre que les problèmes de pré impulsion(s) sont liés aux fuites du « pulse picker » et de la cellule d'injection (dont les fonctions sont souvent réalisées par une seule et même cellule de Pockels). Le piédestal d'ASE provient de la fluorescence amplifiée qui est autour de l'impulsion. La durée du piédestal d'ASE est en général liée à la fenêtre temporelle de la cellule de Pockels d'éjection. La durée du piédestal est souvent d'environ 5 ns.

Dans beaucoup de systèmes, l'impulsion principale reste dans la cavité régénérative pour environ une vingtaine d'allers-retours. Chaque tour représente temporellement environ 10 ns c'est à dire très proche de la période de répétition de l'oscillateur femtoseconde. Ainsi après un tour dans la cavité, une pré ou post impulsion peut s'incorporer à cause de la fuite de

Chapitre 4: Dispositifs de contrôle du contraste et des fluctuations des impulsions ultrabrèves utilisant des photoconducteurs

l'ensemble « pulse picker »/cellule d'injection. Cette pré ou post impulsion peut alors être très proche de l'impulsion suivant l'écart temporel entre un tour de cavité et le taux de répétition de l'oscillateur femtoseconde. L'écart typique est de l'ordre de la centaine de picosecondes.

Le contraste qui nous intéresse ici est le rapport entre l'énergie optique précédent l'impulsion principale et l'énergie contenue dans l'impulsion elle-même, comme défini et mesuré par le système présenté dans le chapitre précédent. Un contraste de 10^{-3} est habituel, un bon contraste est de l'ordre de 10^{-4} et plus.

Dans le cadre du contrat européen SHARP ("Suppression over High dynamic range of Ase at the Rising edge of ultra-intense femtosecond Pulses", administré par le Laboratoire d'Optique Appliquée), plusieurs solutions d'amélioration du contraste ont été envisagées dont l'utilisation de cellule de Pockels ultra-rapide.

Le principe de filtrage rapide et le gain attendu sur le contraste sont présentés dans la première partie. Ensuite la description des systèmes existants, de leurs problèmes d'utilisation et de leurs réalisations précédera les dispositifs envisagés. Les études théoriques permettront de comprendre le choix de la conception du prototype dont les résultats expérimentaux sont ensuite présentés.

4.A.1. Principe de nettoyage des impulsions

Pour nettoyer l'impulsion, il faut lui retirer la partie d'énergie optique se trouvant devant elle. L'intérêt de la technique utilisant une cellule de Pockels ultrarapide est de s'insérer simplement dans la chaîne laser, sans pertes importantes et sans altérer la stabilité coup à coup du laser. Le système de nettoyage doit être implanté après l'amplificateur régénératif (ou multipassage). Dans le cas de très gros laser du type 100TW, l'amplification est assurée par plusieurs étages d'amplification. L'étage responsable de la plus grande détérioration du contraste est le premier étage. Le filtrage du signal doit être effectué à ce niveau. Le signal à filtrer est une impulsion d'énergie environ 1mJ étiré à 300ps ayant une largeur à mi-hauteur d'environ 0.5cm. La fluence du signal est donc d'environ 10MW/cm² ce qui ne pose pas de problème de tenue au flux pour la cellule.

Chapitre 4: Dispositifs de contrôle du contraste et des fluctuations des impulsions ultrabrèves utilisant des photoconducteurs

La figure 4.2 ci-dessous montre l'implantation dans un système d'amplification multi étages et le principe de nettoyage.

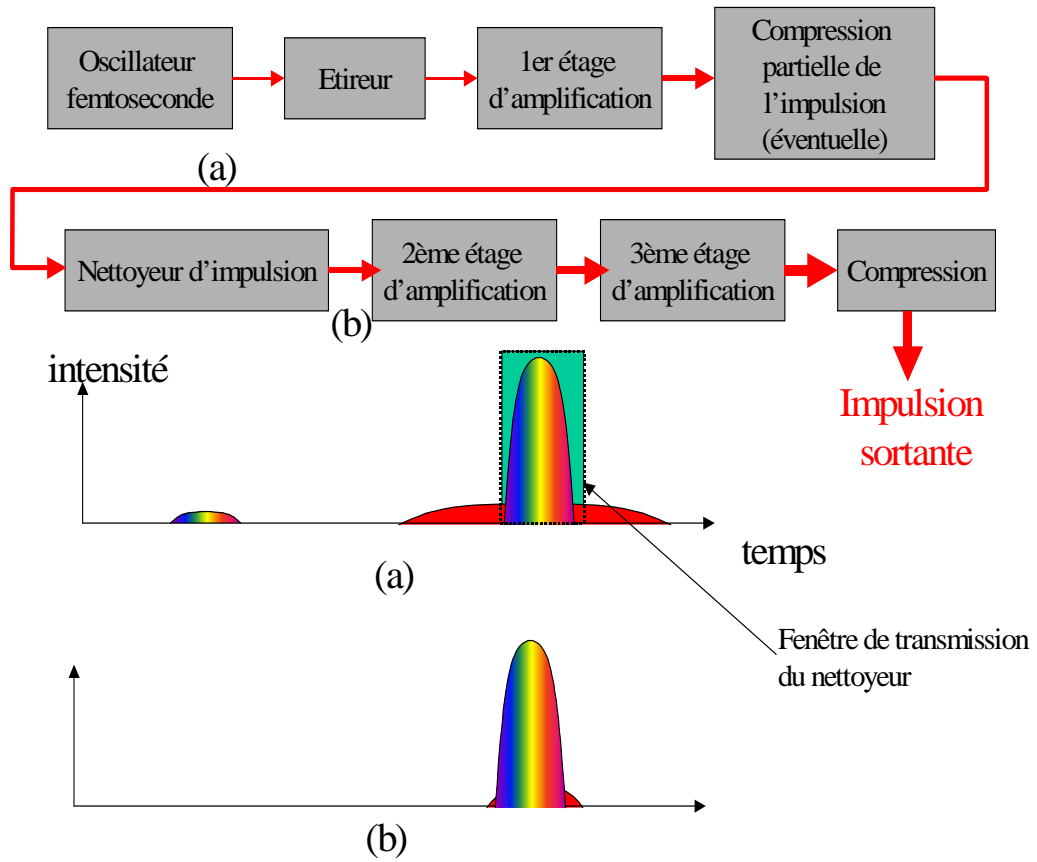


Figure 4.2: implantation du nettoyeur dans une chaîne d'amplification multi étages et principe de nettoyage

4.A.2. Cellule de Pockels ultrarapide : systèmes commerciaux existants

Une cellule de Pockels [Pockels 1894] est constituée d'un cristal électro-optique réalisant une lame d'onde dont le déphasage est variable en fonction de la tension. On peut alors réaliser une porte optique dont la transmission optique est contrôlée par le champ électrique au sein du cristal. La cellule de Pockels permet de changer la polarisation de l'impulsion laser et un polariseur en sortie du système atténue l'impulsion selon sa polarisation (cf. figure 4.3 ci-dessous).

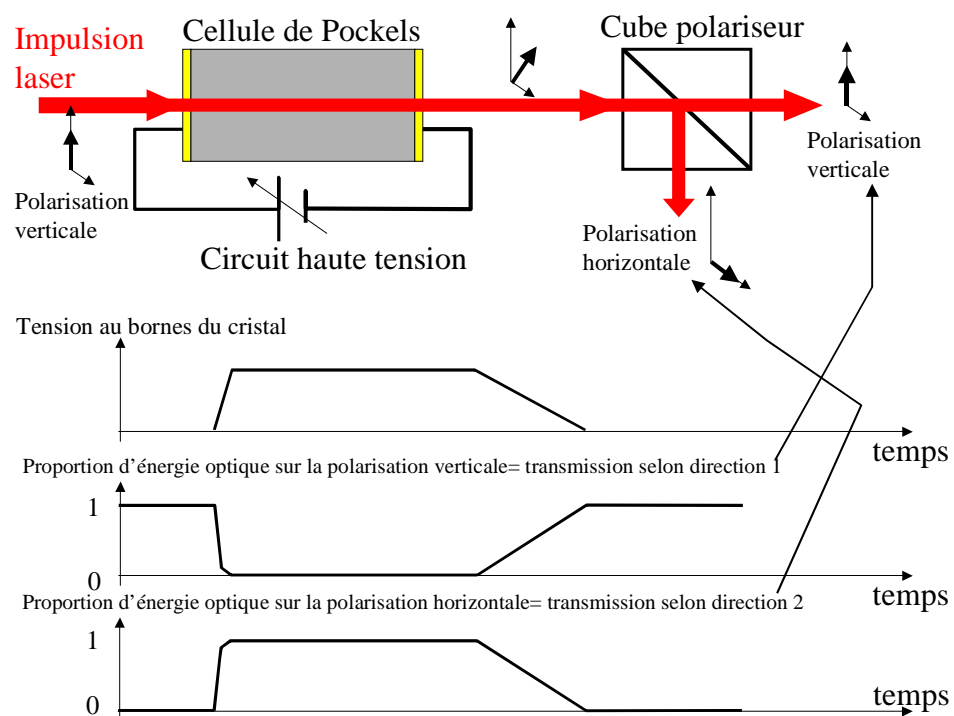


Figure 4.3 : principe de fonctionnement d'une porte optique par cellule de Pockels (ici on a représenté un cristal électro-optique de type longitudinale par exemple KDP)

La vitesse d'ouverture ou de fermeture de la porte optique dépend par conséquent du temps de montée du champ électrique dans la cellule de Pockels. Ce temps est déterminé à la fois par l'électronique de commande et par l'établissement du champ électrique dans le cristal, dépendant de l'adaptation de l'électronique haute tension au cristal électro-optique.

Au début de ce travail, l'état de l'art des systèmes commerciaux était des cellules de Pockels dont l'ouverture durait environ 1ns à 500ps. En janvier 2003, des cellules ultrarapides

Chapitre 4: Dispositifs de contrôle du contraste et des fluctuations des impulsions ultrabrèves utilisant des photoconducteurs

ont fait leur apparition. Le tableau 4.1 ci-dessous résume les performances et caractéristiques de ces cellules.

Fabricant,Nom de la cellule	LEYSOP (UK),UPC	LEYSOP(UK),UPC	LASERMETRICS, Model 1111	LASERMETRICS, Model 1112
Type de cristal	KD*P	KD*P	KD*P	KD*P
interaction électro-optique	Longitudinale	longitudinale	longitudinale	longitudinale
nombre de cristaux	1	2	1	2
ouverture	10mm	8mm	2.5mm	2.5mm
tension maximale	10kV	5kV	non spécifié	non spécifié
impédance d'adaptation	50Ω	50Ω	50Ω	50Ω
vitesse d'ouverture optique	<250ps	<250ps	<50ps	<100ps
Tension demi-onde à 1064nm	6kV	3kV	6.5kV	3.3kV
Seuil de dommage	600MW/Cm ²	600MW/cm ²	non spécifié	non spécifié
Pertes d'insertion	4%	7%	<5%	<5%
Rapport de contraste ON/OFF	>1000 :1	>600 :1	non spécifié	non spécifié

Tableau 4.1: performances et caractéristiques des deux cellules de Pockels commerciales les plus rapides au mois de janvier 2003.

Tous ces systèmes ont les caractéristiques communes suivantes :

- a) le matériau utilisé est KDP . En raison de son hygroscopie, la cellule est encapsulé. Ceci amène une limite à la compacité est donc aux inductances résiduelles et désadaptations d'impédance qui augmentent le temps de réponse.
- b) Pour obtenir des commutations rapides, la géométrie est en général celle d'une ligne de transmission adaptée 50Ω.
- c) La ligne est commandée par un générateur de rampe, les meilleurs systèmes commerciaux ont un jitter intrinsèque de 10 à 20ps. Ils doivent être déclenchés par une impulsion électrique quelques dizaines de nanosecondes avant (soit dix mètres de propagation de faisceau). La durée de vie est limitée à environ 10¹⁰ impulsions.
- d) La dimension importante du système Pockels-ligne-générateur fait qu'il est très difficile d'éviter un rayonnement électromagnétique important perturbant les systèmes électroniques environnant.

4.A.3. Cellule de Pockels déclenchée par photoconducteur

On présente ici l'étude et la réalisation expérimentale d'une cellule de Pockels ultrarapide déclenchée par des photoconducteurs. On décrira le cristal électro-optique utilisé, puis l'étude de deux circuits électroniques de génération de rampe haute tension ultrarapide, enfin les résultats obtenus.

Le principe général de ce système est de décharger une cellule de Pockels à travers deux photoconducteurs, vus comme des interrupteurs ultrarapides commandés par la lumière. Afin de réduire au maximum les inductances parasites et dans un souci de simplicité pour guider la lumière sur les photoconducteurs, le cristal électro-optique doit être inerte chimiquement pour pouvoir simplement construire l'électronique de commande autour. Sa tension demi-onde doit également être également la plus faible possible pour utiliser des photoconducteurs avec un espace inter électrodes faible, et donc réduire l'énergie optique de commande nécessaire.

4.A.3.a) Nouveau Cristal Electro-optique : le RTP (RbTiOPO_4)

Ce cristal récent présenté dans la littérature comme cristal électro-optique pour la première fois par Cheng et al. [Cheng 1993] a plusieurs avantages :

- il est inerte chimiquement,
- une constante diélectrique faible 13,
- pas de résonances piézoélectriques jusqu'à 50kHz,
- une tension demi-onde très faible $V(\pi/2, \lambda=1064)=1.7\text{kV}$ pour une paire de cristaux de $6 \times 6 \times 7 \text{mm}^3$,
- une interaction électro-optique transverse.

En revanche, sa forte expansion thermique et ses coefficients thermo-optiques impliquent de l'utiliser sous forme de paires de cristaux croisés.

4.A.3.b) Circuits de décharge par photoconducteurs

Le cristal électro-optique de RTP est considéré soit comme une capacité très faible, soit comme un morceau de ligne de transmission. On présente dans cette partie deux implémentations électriques de décharge dont l'une prend le partie de la capacité et l'autre celui de la ligne 50Ω .

4.A.3.b.i) Système basé sur la décharge rapide de la capacité

Pour commuter le plus vite possible la tension, dans notre cas décharger la cellule de Pockels préalablement chargée, il faut minimiser les inductances parasites. Pour minimiser ces inductances, il faut utiliser des connexions larges et un plan de masse proche. La figure 4.4 ci-dessous montre la géométrie choisie :

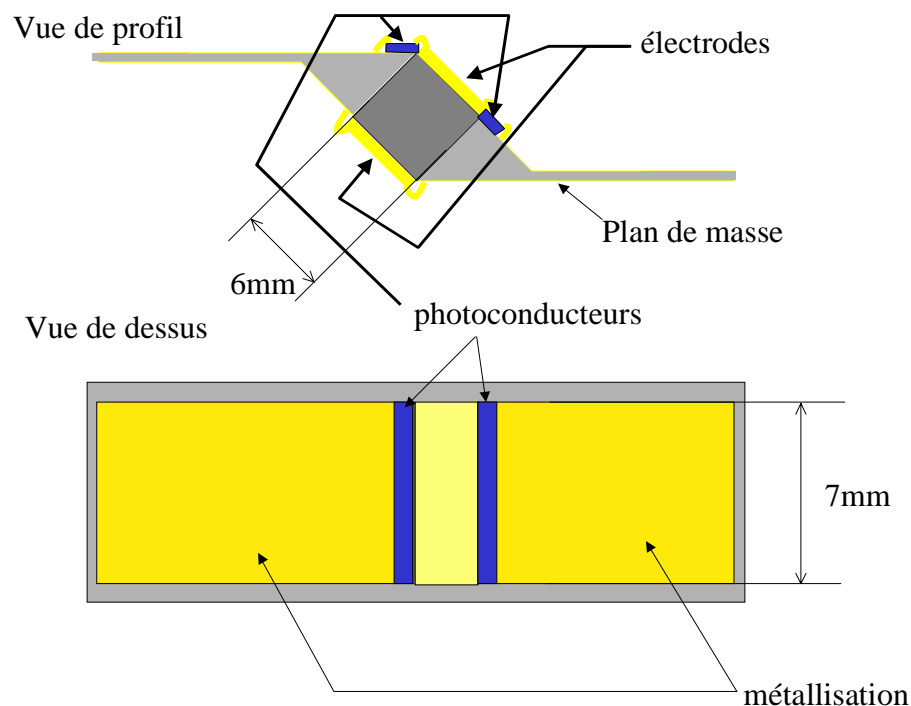
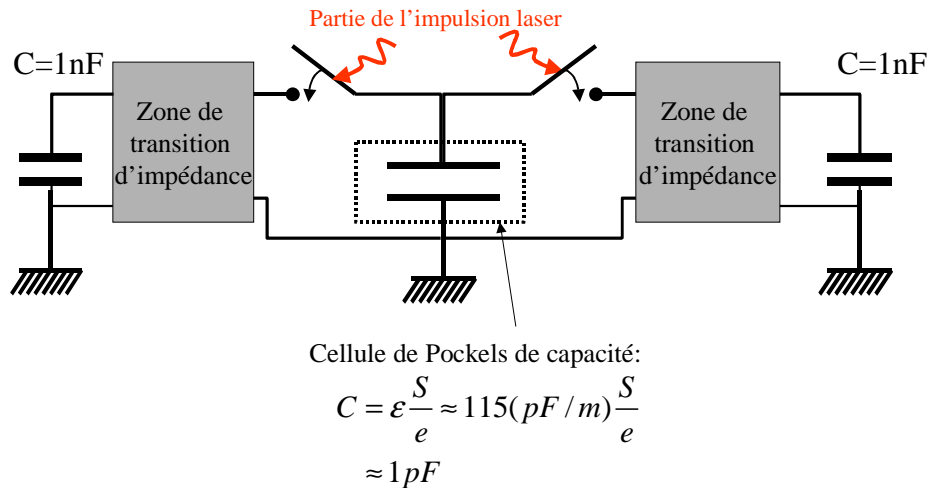


Figure 4.4 : Configuration d'une cellule de Pockels déchargées directement à travers des photoconducteurs.

Les larges bandes de chaque côté constituent des capacités dans lesquelles la capacité du cristal va se décharger. Leur grandeur est plus de cent fois supérieure à celle du cristal. La diminution de l'épaisseur du diélectrique est nécessaire pour obtenir une capacité plus grande

Chapitre 4: Dispositifs de contrôle du contraste et des fluctuations des impulsions ultrabrèves utilisant des photoconducteurs

à largeur de bande fixée. De plus l'inductance est d'autant plus faible que cette épaisseur est faible. La zone de transition est une zone sur laquelle la capacité linéaire augmente linéairement avec la diminution de l'épaisseur et l'inductance linéaire diminue linéairement avec la diminution de l'épaisseur. L'équivalent électrique de la configuration présentée sur la figure 4.4 précédente est schématisée sur la figure 4.5 ci-dessous :



La zone de transition correspond aux connexions entre la grande capacité et la capacité de la cellule de Pockels, c'est à dire la zone triangulaire sur la vue de profil de la figure X.

Figure 4.5: schéma électrique de la décharge de la cellule de Pockels vue comme une capacité

Si on néglige la zone de transition et le temps d'établissement du champ électrique dans le cristal, alors la simulation est très simple et prévoit une décharge extrêmement rapide donnant un temps de commutation défini par le produit de la résistance du photoconducteur et de la capacité à décharger : $\tau = RC \approx 1 \text{pF} \cdot 10 \Omega = 10 \text{ps}$.

Pour une ligne de transmission micro-ruban, l'inductance linéique est : $L = \mu \frac{d}{a}$ où μ est la perméabilité magnétique du matériau, comme notre matériau est diélectrique uniquement, $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H} / \text{m} \approx 1.3 \text{nH} / \text{mm}$, a est la largeur de la bande et d l'épaisseur de l'isolant.

La capacité linéique est : $C = \varepsilon \frac{a}{d}$, où $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$ et dans notre cas $\varepsilon_r = 11$, $\varepsilon_0 = 8.8 \text{ pF} / \text{m}$.

L'impédance de ligne résultante est alors : $Z = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{d}{a} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$.

Les notations sont reprises sur la figure 4.6 ci-dessous :

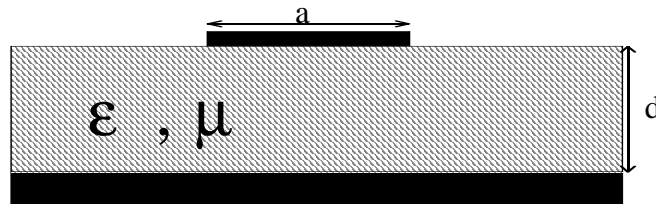


Figure 4.6: vue en coupe d'une ligne micro-ruban et notations

Dans notre cas, on peut déjà analyser le comportement en découpant la zone de transition comme étant des morceaux de ligne d'impédance de plus en plus faible avec la diminution de l'épaisseur. Si par exemple on découpe par morceau de 1mm la zone de transition qui fait environ 8.5mm, alors le premier tronçon de ligne à une impédance dite « impédance de sortie du cristal » correspondant à celle du cristal, c'est à dire

$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{6\text{mm}}{7\text{mm}} \sqrt{\frac{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} / \text{m}}{13 \cdot 8.8 \cdot 10^{-12} \text{ F} / \text{m}}} \approx 90 \Omega / \text{m}$. La vitesse de décharge est limitée par cette impédance et vaut alors : $\tau = ZC \approx 50 \text{ ps}$. La commutation complète s'effectue alors en environ 120ps. Est-il possible de diminuer cette impédance ?

Si on étudie plus finement la partie transitoire et que l'on considère cette partie comme étant une discontinuité de ligne, on retrouve des résultats bien connus dans le domaine des micro-ondes [Ghose]. La discontinuité est alors considérée comme une transition d'une ligne d'impédance Z_0 à une ligne d'impédance Z_1 . En décomposant la transition en éléments infiniment courts, et en supposant la réflexion très inférieure à 1 ($\Gamma^2 \ll 1$), on obtient l'expression du coefficient de réflexion en fonction du rapport de la longueur de la discontinuité sur la longueur d'onde de l'onde électrique devant passer la discontinuité. Les résultats pour des transitions de type triangulaire, exponentielle ou Klopfenstein [Klopfenstein 1956] sont présentés sur la figure 4.7 :

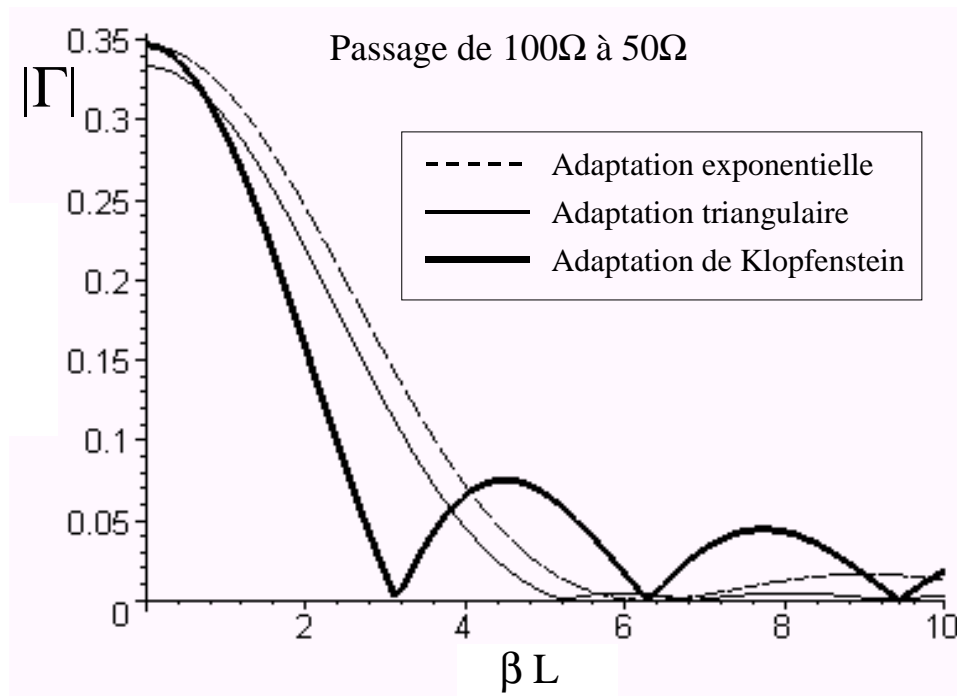


Figure 4.7 : Réflexion sur la zone de transition d'impédance suivant son profil, β est le nombre d'onde ($1/\lambda$), L est la longueur de la zone.

Le problème de l'optimisation de la zone de transition est la forte réflexion pour les fréquences basses. Ce comportement est inévitable car la longueur d'onde aux basses fréquences devient supérieure à la transition et l'onde ne voit alors qu'une discontinuité abrupte. Le comportement attendu est d'avoir une transition rapide suivie d'oscillations liées aux réflexions. L'ouverture de la cellule de Pockels est détériorée par ces oscillations qui vont moduler le signal sauf si celui-ci est court comparé aux oscillations. Typiquement la transition sera triangulaire de 100Ω à 30Ω sur une longueur de 3mm, soit une fréquence équivalente d'environ 30GHz (30ps). La réflexion devient 0,5 environ aux "basses" fréquences (<10GHz), on a donc de fortes oscillations de périodes environ 100ps. Ces oscillations restent importantes pour des fréquences jusqu'à $\beta L \approx 2$ c'est à dire 60GHz (15ps). Donc pour que la déformation de l'impulsion soit négligeable, l'impulsion doit être plus brève que 10ps environ. Le système ne sera donc pas utilisable pour des impulsions fortement étirées, c'est à dire de forte énergie.

4.A.3.b.ii) Système basé sur une ligne d'impédance continue

Considérons à présent la cellule de Pockels comme étant une partie d'une ligne. Il est alors possible de générer une impulsion se propageant dans la ligne et par conséquent s'appliquant au cristal par l'intermédiaire des photoconducteurs. La figure 4.8 ci-dessous montre la configuration de lignes d'impédance :

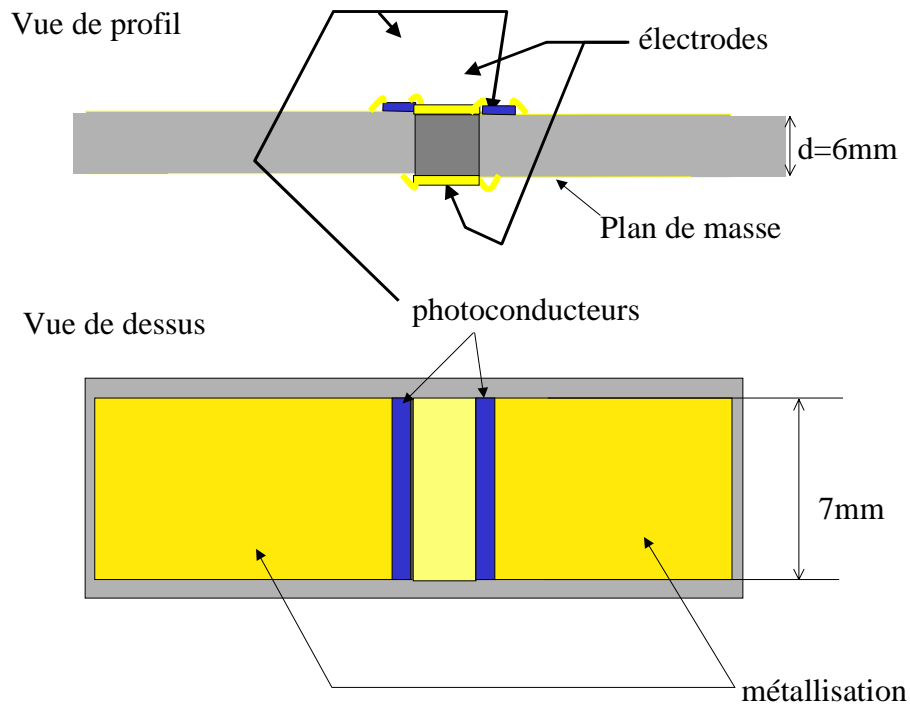


Figure 4.8: montage du cristal électro-optique intégré dans une ligne d'impédance fixe.

Dans ce cas les larges bandes de chaque côté sont des lignes de transmission d'impédance linéique égale à celle du cristal. Cette impédance est approchée par :

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{6\text{mm}}{7\text{mm}} \sqrt{\frac{4\pi \cdot 10^{-7} \text{H/m}}{13 \cdot 8.8 \cdot 10^{-12} \text{F/m}}} \approx 90\Omega/m.$$

Dans ce cas, il convient d'adapter au mieux la constante diélectrique de l'isolant constituant la ligne micro-ruban pour éviter les problèmes de réflexion. Une céramique utilisée dans la fabrication de circuit électronique à une constante diélectrique égale à $\epsilon_r=11$ (très proche du cristal). Dans ce cas une ligne de même largeur à une impédance linéique $Z=100\Omega/m$, et la largeur d'une ligne parfaitement adaptée est alors $a=7.6\text{mm}$. La transition au niveau du cristal entraîne une différence d'impédance de 10Ω , impliquant une réflexion $R=5\%$. Cette réflexion

Chapitre 4: Dispositifs de contrôle du contraste et des fluctuations des impulsions ultrabrèves utilisant des photoconducteurs

est suffisamment faible pour rendre totalement négligeables tous les effets liés aux multiples réflexions.

Le fonctionnement de ce circuit est le suivant :

La partie de ligne constituée par le cristal est préalablement chargée par l'intermédiaire d'une inductance forte découplant le circuit de charge dans le fonctionnement rapide. Au moment où la lumière illumine les photoconducteurs, la résistance des photoconducteurs décroît instantanément au point de rendre le photoconducteur équivalent au conducteur de la ligne micro-ruban. La ligne constituée par le cristal se décharge alors de chaque côté. La figure 4.9 suivante détaille la propagation des impulsions dans les différentes parties de la ligne.

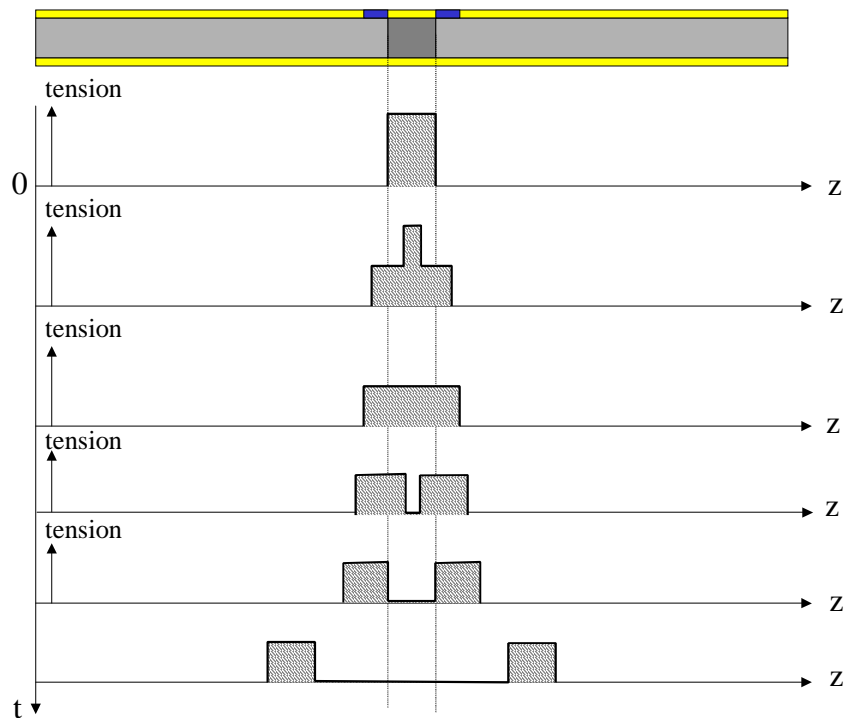


Figure 4.9 : évolution de la tension dans les lignes constituées par le cristal, et de part et d'autre du cristal.

Dans ce cas, le temps de la décharge complète correspond au temps de propagation d'une impulsion sur la largeur du cristal. La vitesse de propagation d'une impulsion dans une

ligne micro-ruban est : $v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{c}{\sqrt{13}} \approx 83 \mu\text{m} / \text{ps}$.

Donc ce temps de décharge est : $\tau = \frac{w}{v} \approx 72 \text{ps}$.

Chapitre 4: Dispositifs de contrôle du contraste et des fluctuations des impulsions ultrabrèves utilisant des photoconducteurs

Pour éviter toute remontée de tension, il faut propager suffisamment loin les impulsions. Avec cette vitesse de propagation, 1ns correspond à 83mm. Donc une bande de 4cm de chaque côté permet d'obtenir une décharge en moins de 80ps suivie d'un plat de 1ns.

Si l'on tient compte de la résistance fini du photoconducteur, la désadaptation d'impédance peut entraîner une réflexion de l'ordre de 5%. Une impulsion positive est alors également réfléchiée et la décharge n'est pas complète et s'arrête au bout de 70ps à 5% de la tension initiale puis 70ps après on atteint 0.25%. Si des désadaptations internes aux photoconducteurs existent, et si elles restent suffisamment faibles (<10%), les allers-retours dans les 2mm de photoconducteur seront donc au niveau de 1% après environ 20ps. Les désadaptations peuvent par conséquent détériorer la décharge mais n'induisent très probablement qu'une augmentation marginale du temps de décharge.

Il faut tenir compte également des temps de propagations optiques. La cellule de Pockels constituée à partir du matériau RTP est composée de deux cristaux orientés à 90° l'un de l'autre. La longueur totale de cristal à traverser est de 14mm et l'indice optique du RTP est environ 1.8. L'impulsion lumineuse traverse les deux cristaux en 84ps. La géométrie doit être adaptée pour que le temps de commutation ne soit pas le cumul du temps de propagation optique et du temps de décharge.

En conclusion, avec un concept de lignes en prenant une attention particulière à l'adaptation, il doit être possible de faire une commutation de la cellule en moins de 100ps sur un diamètre de 6mm assez simplement avec les photoconducteurs et sans gigue temporelle. Ces performances positionnent cette cellule comme étant la plus rapide pour ce diamètre.

4.A.3.c) Résultats expérimentaux

Les résultats présentés ici ont été obtenus, au LOA, sur un laser 10Hz,30fs, 1.5mJ à 800nm avec le premier prototype de cellule de Pockels ultrarapide présenté sur la photographie de la figure 4.10. L'objectif de ces expériences est de vérifier la vitesse de commutation, le jitter, la fiabilité du système, le contraste.

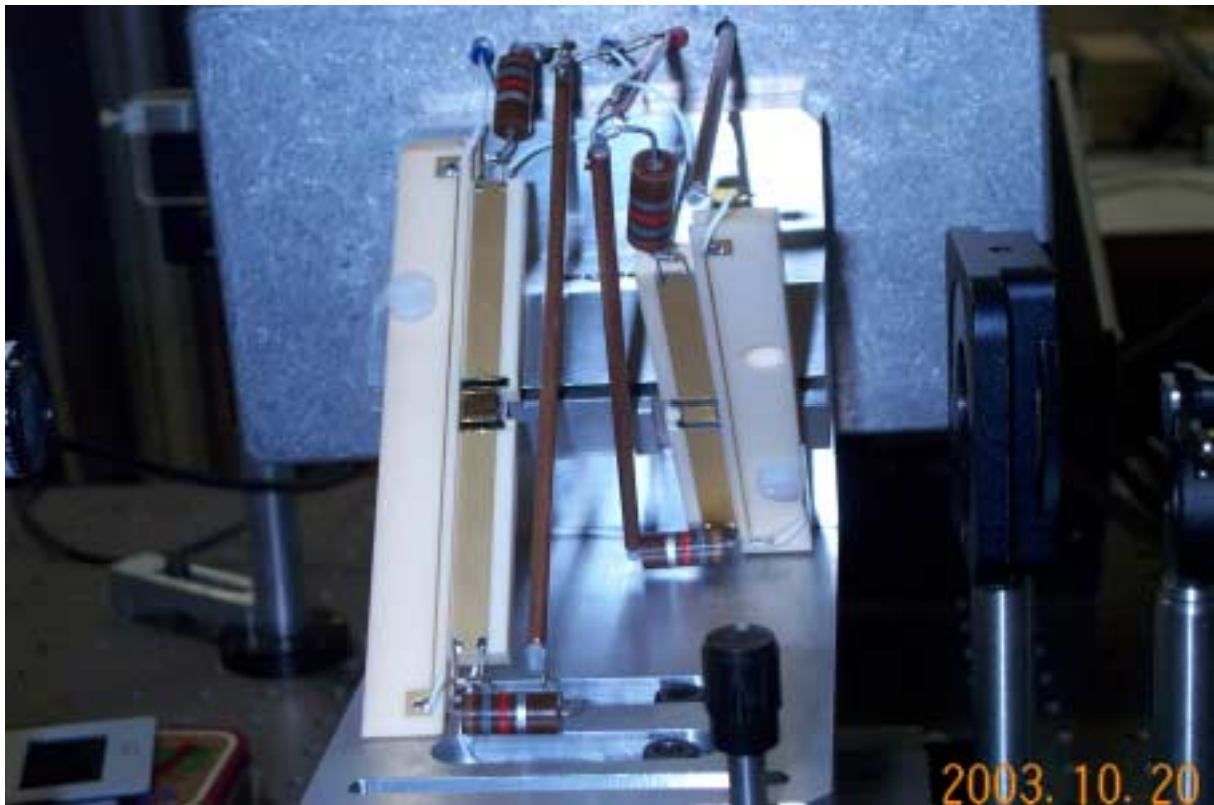


Figure 4.10: prototype de cellule de Pockels ultrarapide

Ce premier prototype a une qualité de cristaux électro-optique en RTP très médiocre. De plus lors du montage de ces cristaux dans les deux lignes, ils se sont fendus sous l'effet des contraintes du collage. Les essais ci-dessous ont été réalisés sur la partie indemne du système. Le contraste de cette paire de cristaux est de l'ordre de 10 sans tension. La faiblesse de ce contraste est due aux défauts cristallins. Ces cristaux étant nouveaux, le processus de fabrication est en constante amélioration (spécification de contraste annoncée : 100).

4.A.3.c.i) Description du montage expérimental

Le montage expérimental utilisé pour mesurer le temps de montée comporte une ligne à retard optique. Le délai optique, entre l'impulsion laser déclenchant les commutateurs optiques et l'impulsion laser traversant la cellule de Pockels, permet d'atteindre très facilement des résolutions de l'ordre de la picoseconde sur la grandeur qui nous intéresse, c'est à dire la transmission de la cellule de Pockels.

La figure 4.11 ci-dessous schématise le fonctionnement du montage expérimental :

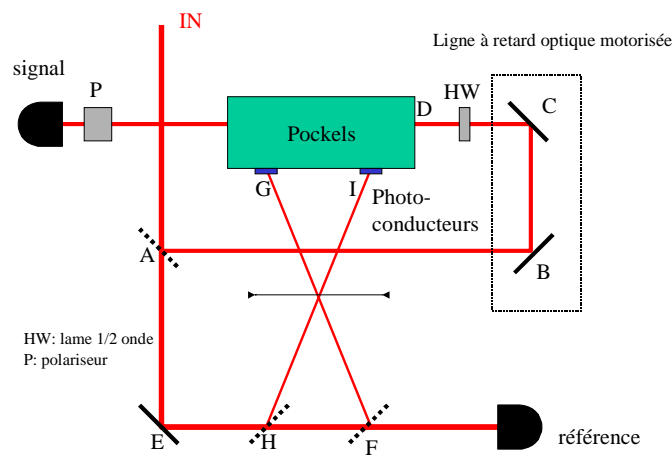


Figure 4.11: schéma du montage expérimental de mesure du temps de commutation optique.



Figure 4.12 : photographie du montage expérimental

Chapitre 4: Dispositifs de contrôle du contraste et des fluctuations des impulsions ultrabrèves utilisant des photoconducteurs

Il faut synchroniser au mieux les retards optiques correspondant au chemin de l'impulsion principale ABCD et aux chemins de déclenchement AEHI et AEEFG. Ces deux derniers chemins ont une différence qui compense la propagation de l'impulsion lumineuse à travers un cristal et l'espace libre entre les deux cristaux (voir discussion plus haut). La distance HF est donc égale à $7\text{mm} \times 1.8 + 35\text{mm} = 47.6\text{mm}$.

La quantité d'énergie prélevée sur l'impulsion au niveau de A pour éclairer les photoconducteurs doit être telle qu'après tout le traitement nécessaire sur cette voie (par exemple utilisation d'absorbant saturable), il reste environ $50\mu\text{J}$. Ce niveau peut-être abaissé en utilisant une optique de focalisation pour éclairer chacun des 4 photoconducteurs individuellement de manière optimale. L'utilisation de la lame demi-onde n'est pas nécessaire si la polarisation est horizontale ou verticale en entrée de cellule de Pockels.

Le réglage de cette cellule se fait par l'optimisation de l'extinction sans tension avec un polariseur croisé en sortie. En particulier il faut régler le tilt selon un axe perpendiculaire à la direction de propagation à travers la cellule.

Les deux détecteurs utilisés sont des photoconducteurs alimentés avec une tension continue de 24V.

Il faut noter qu'aucun blindage n'isole la cellule de Pockels et que les parasites engendrés par la cellule n'ont pas dépassé ceux provenant du laser en fonctionnement normal. L'énergie rayonnée par la cellule est donc très faible et une fois blindée, aucun parasite ne devrait perturber les instruments de mesure.

4.A.3.c.ii) Vitesse de commutation, contraste, ouverture complète, jitters expérimentaux

La vitesse de commutation est estimée en traçant la courbe de la transmission de la cellule en fonction du retard optique ajusté par la longueur de la ligne à retard.

Chapitre 4: Dispositifs de contrôle du contraste et des fluctuations des impulsions ultrabrèves utilisant des photoconducteurs

L'ouverture complète est vérifiée en coupant la tension et en tournant le polariseur de sortie pour obtenir le maximum de transmission.

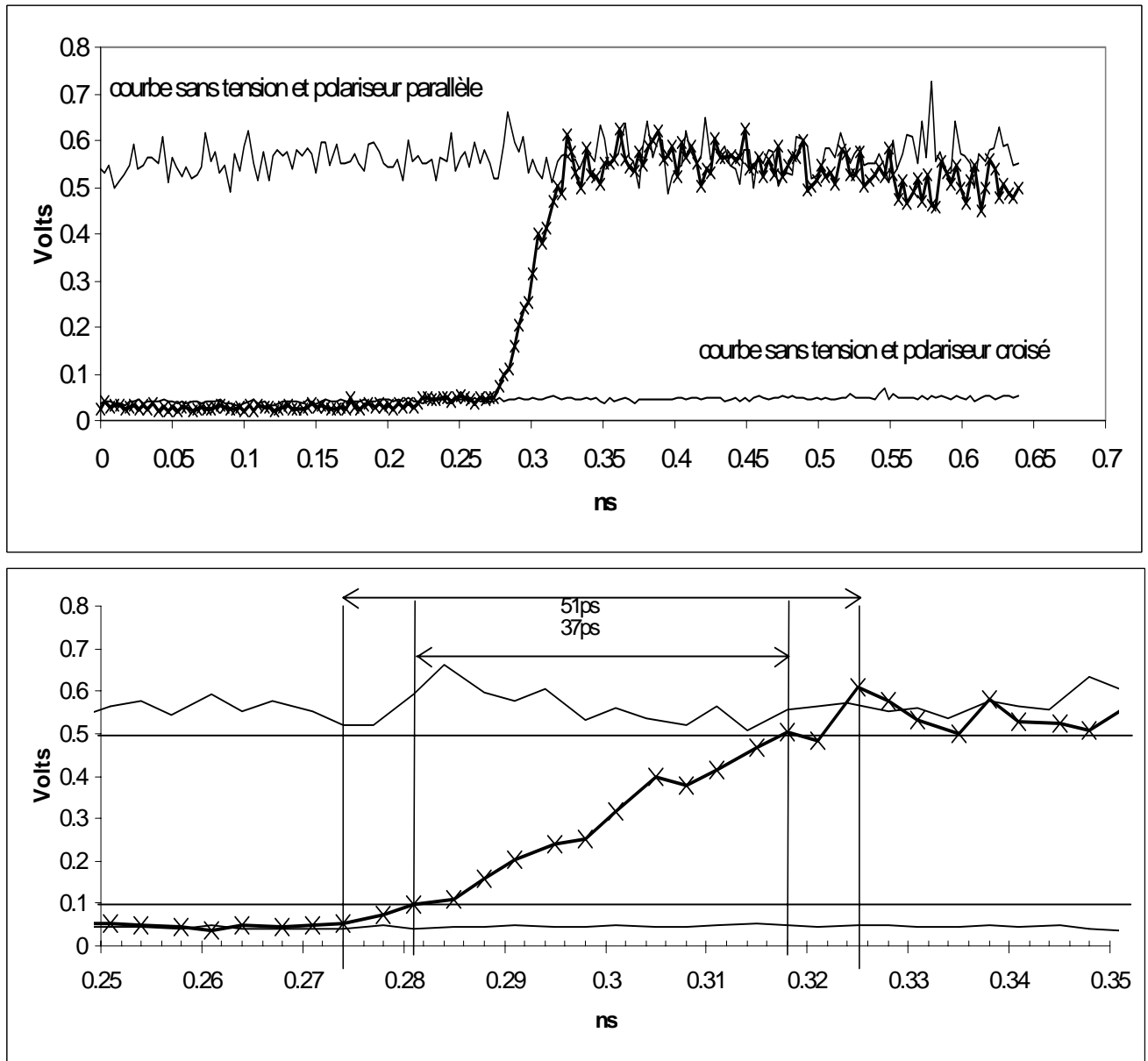


Figure 4.12 : maximum de la tension de sortie du détecteur mesuré par l'oscilloscope en fonction du délai optique (chaque croix correspond à un point de mesure).

Cette mesure montre :

- un temps de commutation complète d'environ 50ps, un temps de montée 10-90% d'environ 40ps,
- un contraste supérieur à 10,

Chapitre 4: Dispositifs de contrôle du contraste et des fluctuations des impulsions ultrabrèves utilisant des photoconducteurs

- il y a accord entre les mesures sans tension et les asymptotes de la courbe avant et après la commutation, donc la cellule s'ouvre complètement.

Plusieurs commentaires s'imposent :

- l'origine des fluctuations observées n'a pu être déterminée :
 - o elles ne sont pas dues à des fluctuations de la tension de cellule,
 - o elles n'ont pu être éliminées par une mesure du rapport à un détecteur de référence illuminé par un faisceau ne traversant pas la cellule de Pockels.
- L'énergie totale envoyée vers les photoconducteurs est entre 65 et 130 μ J, répartie en deux taches. Ces deux taches de grandes dimensions (disque d'environ 1cm de diamètre) permettent d'éclairer directement les deux photoconducteurs entourant chaque cristal de RTP sans mise en forme. Les bords éclairent les photoconducteurs. En estimant la répartition spatiale du faisceau comme uniforme et le rapport des surfaces de la tache d'éclairement et des deux photoconducteur, l'énergie nécessaire par photoconducteur est de l'ordre de 5 à 10 μ J.
- La taille du faisceau principal (passant dans la cellule de Pockels) est petite, environ 1.5mm de diamètre.

Dans le but d'obtenir une détermination de la gigue temporelle, cette même mesure a été reprise avec davantage de points et en deux balayages identiques :

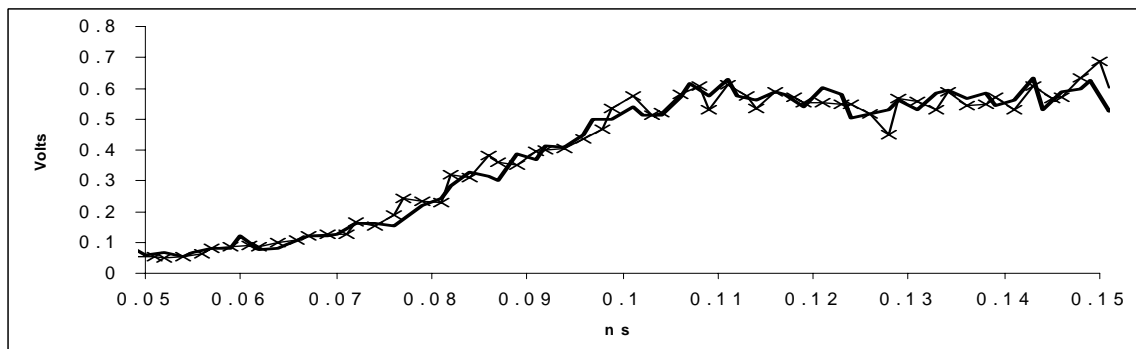


Figure 4.13 : 2 balayages identiques

Le temps de commutation reste le même. L'accord des courbes indique un jitter inférieur à 2ps. D'autres mesures comme celles ci-dessous confirment cette valeur comme une borne supérieure de la gigue temporelle :

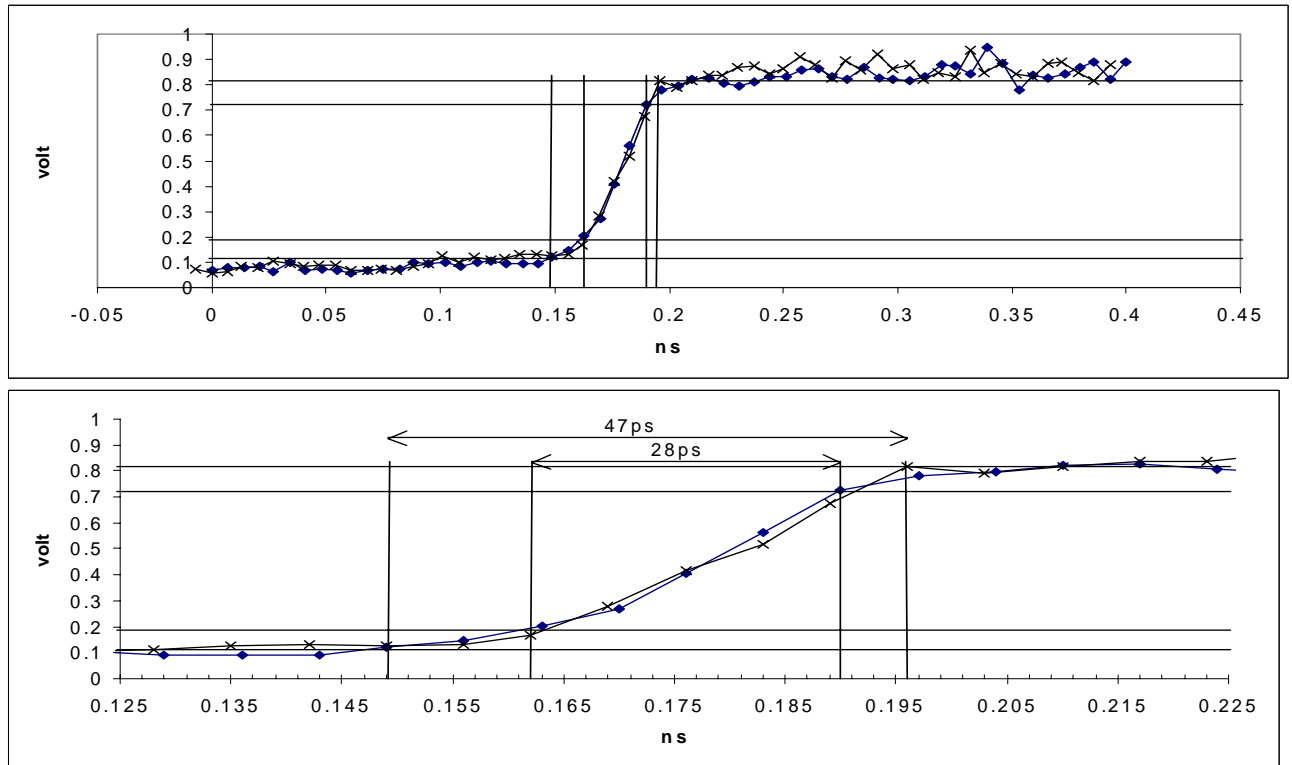


Figure 4.14 : estimation de la gigue temporelle

4.A.3.c.iii) Modification du comportement avec le diamètre de faisceau

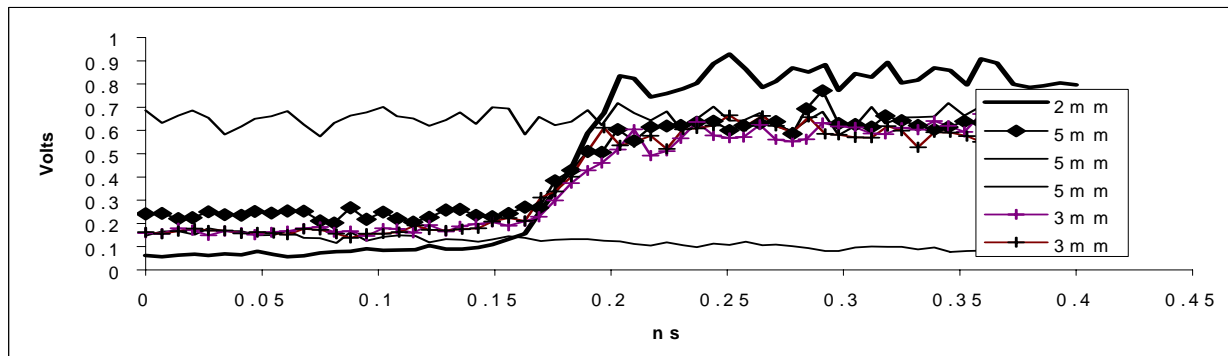


Figure 4.15 : évolution de la commutation avec le diamètre du faisceau

Le temps de commutation et l'ouverture complète ne sont pas ou très peu modifiés par la taille du faisceau. En revanche, le contraste est fortement altéré ce qui était déjà le cas dans les mesures statiques. On peut espérer conserver la vitesse de commutation et le contraste avec des cristaux de 2^{ème} génération sur une ouverture de 5mm au moins.

4.A.3.c.iv) Modification du comportement avec l'énergie d'éclairement des photoconducteurs

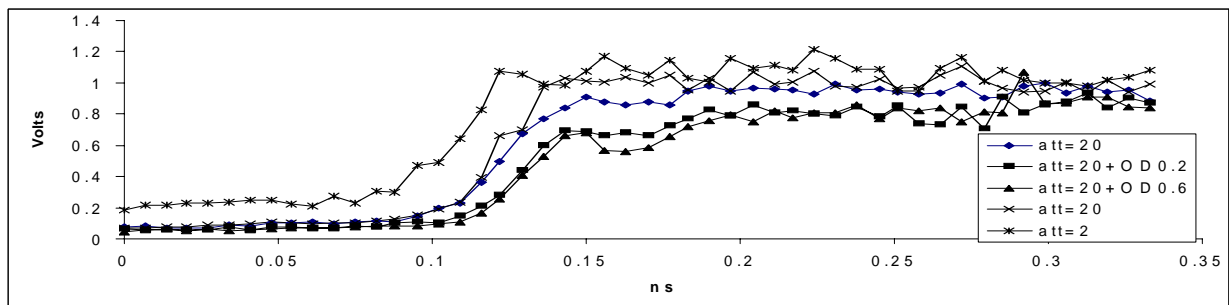


Figure 4.16: évolution de la commutation avec le niveau d'éclairement des photoconducteurs

On observe un ralentissement du front de montée et l'apparition de rebonds quand on atténue le signal d'excitation des photoconducteurs. Par ailleurs à forte énergie, il apparaît une pré charge due au piédestal de l'impulsion qui pourrait être réduite par l'utilisation d'un absorbant saturable.

4.A.4. CONCLUSION

Le prototype de cellule de Pockels ultrarapide actuel a permis d'obtenir une commutation complète avec un temps de commutation de l'ordre de 50ps et une gigue temporelle inférieure à 2ps. Ce prototype est imparfait du point de vue de l'énergie nécessaire à la commutation (50 μ J) et du contraste (10). L'utilisation d'un montage optique optimisé et de matériau de meilleur qualité doit permettre d'améliorer ces deux quantités d'un ordre de grandeur. Le prototype sera alors au niveau des meilleures performances en commutation. Il sera alors testé en sortie d'amplificateur pour nettoyer l'impulsion.

4.B Stabilisation des impulsions en énergie

Cette partie présente un dispositif entièrement original permettant de réaliser une limitation optique et une stabilisation en énergie des impulsions laser ultrabrèves. L'intérêt d'un tel dispositif commence à se faire sentir pour exploiter pleinement les possibilités des lasers femtosecondes. De plus, ce dispositif est applicable aux autres types de lasers impulsionnels (picosecondes, nanosecondes).

Le principe de fonctionnement de ce système est d'abord introduit. Puis l'étude des performances optimales permet d'estimer celles pouvant être atteintes expérimentalement. Enfin le résultat expérimental prouvant la faisabilité d'un tel dispositif démontre par lui-même l'intérêt de cette « auto-stabilisation ».

4.B.1. Principe de fonctionnement du stabilisateur

Comme dans le cas de la cellule de Pockels ultrarapide, on utilise la combinaison d'une cellule de Pockels et d'un photoconducteur. Cependant dans ce cas, on ne va pas fonctionner en tout ou rien mais utilise la dépendance de la résistance en fonction de l'énergie lumineuse incidente. Le principe général utilisé pour la stabilisation en énergie est le même que celui exposé pour la compensation des fluctuations dans le cas du système de balayage de caméra à balayage de fente synchronisée par photoconducteurs présenté dans le 3^{ème} chapitre de ce manuscrit : obtenir une fonction présentant un maximum en fonction de l'énergie incidente et travailler au voisinage de ce maximum. Ici la fonction est l'énergie optique en sortie de la cellule de Pockels.

Des systèmes de stabilisation de l'énergie d'un laser utilisant un modulateur électro-optique et un détecteur existent déjà. Leur principe est de reboucler la mesure d'énergie sur le modulateur par une boucle de rétroaction. Appliqués à des lasers impulsionnels, ils permettent au mieux de corriger une impulsion par une impulsion antérieure. L'originalité du système d' « auto-stabilisation » est de corriger directement l'impulsion elle-même.

Le but est d'obtenir un régime où la cellule de Pockels transmet moins si le photoconducteur qui sert à l'ouvrir est plus éclairé. La décharge de la cellule de Pockels se fait directement à travers le photoconducteur comme l'illustre la figure 4.17 ci-dessous qui présente à la fois le schéma optique (a), le schéma électrique (b).

Chapitre 4: Dispositifs de contrôle du contraste et des fluctuations des impulsions ultrabrèves utilisant des photoconducteurs

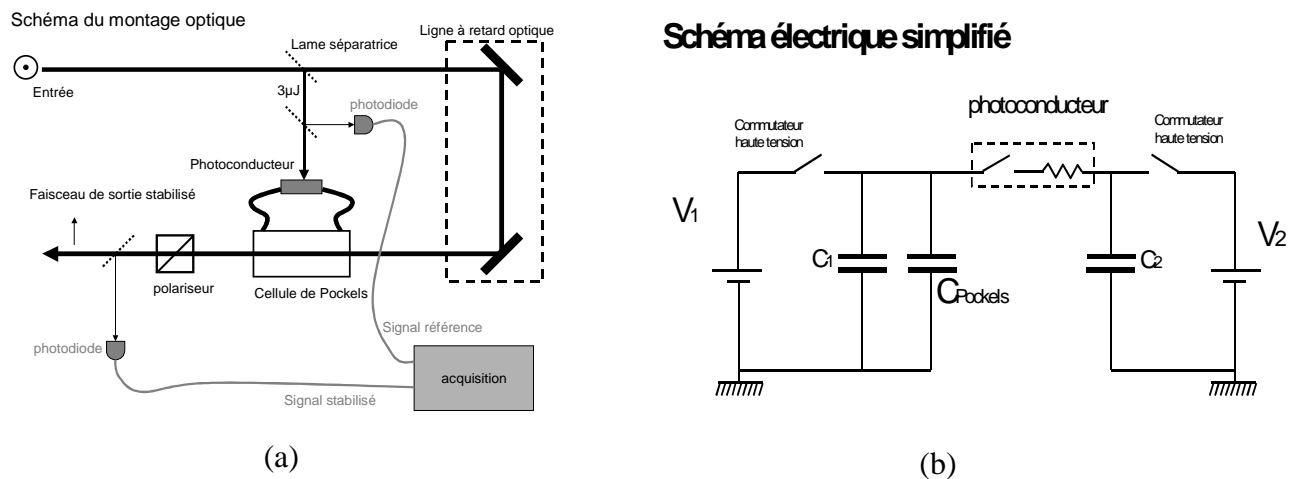


Figure 4.17 : (a) schéma optique, (b) schéma électrique

Une partie de l'impulsion éclaire le photoconducteur au temps t_0 (cf. figure 4.18). La décharge de la tension de la cellule de Pockels commence à cet instant. Après un délai τ , la partie principale de l'impulsion passe à travers la cellule de Pockels. La tension de la cellule à cet instant ($t_0 + \tau$) dépend de l'énergie de l'impulsion par l'intermédiaire de la résistance du photoconducteur. Comme la tension contrôle la transmission du modulateur électro-optique, l'énergie de l'impulsion entrante (I_{in}) modifie cette transmission de telle façon que l'énergie de l'impulsion sortante (I_{out}) est stabilisée s'il existe un point où la dérivé dI_{out}/dI_{in} est nulle.

Pour I_{in} nulle, l'énergie de sortie est également nulle. Si la tension de la cellule, pour une décharge rapide c'est à dire pour une forte énergie d'entrée, correspond à la fermeture du modulateur électro-optique (transmission nulle), alors l'énergie de sortie est également nulle. L'énergie de sortie étant positive, il existe entre ces deux points un maximum prouvant l'existence d'un point de stabilisation comme l'illustre la figure ci-dessous :

Principe de stabilisation

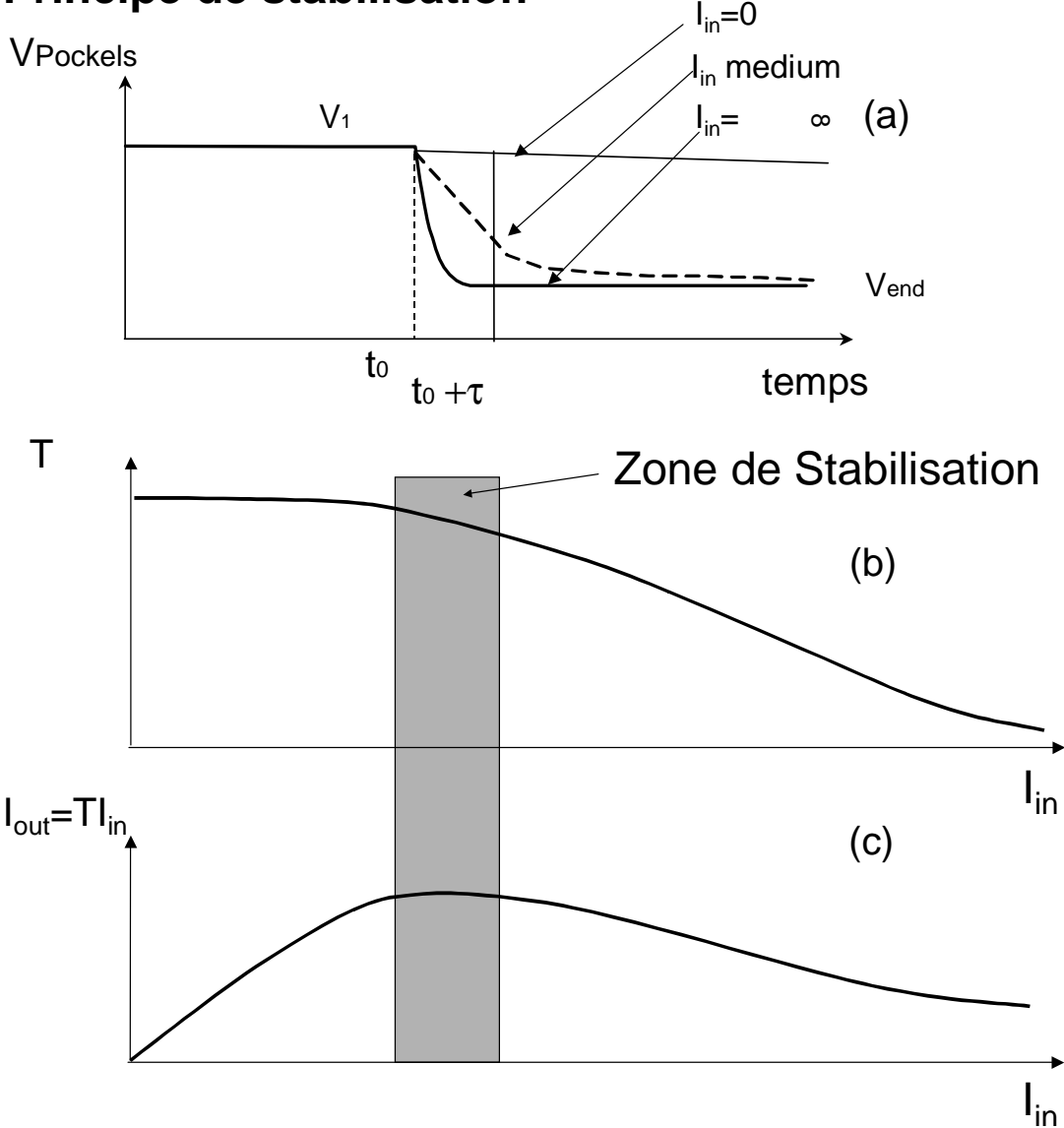


Figure 4.18: principe de l'auto-stabilisation

4.B.2. Performances optimales théoriques

L'intensité des impulsions de sortie peut s'exprimer par :

$$I_{out} = I_{in} \sin^2 \left\{ \left(\frac{\pi/2}{V_{\lambda/2}} \right) \left[V_1 + \left(V_2 - V_1 \right) \left(\frac{C_2}{C_{Pockels} + C_1 + C_2} \right) \left(1 - \exp \left(- \frac{\tau (C_{Pockels} + C_1 + C_2)}{\left(\frac{R_{sw}}{I_{sw}} \right) C_2 (C_{Pockels} + C_1)} \right) \right) \right] \right\}$$

où I_{in} est l'énergie de l'impulsion laser entrant dans la cellule de Pockels, $V_{\lambda/2}$ est la tension demi-onde de la cellule, I_{sw} est la partie de I_{in} utilisée pour le photoconducteur ($I_{sw}=kI_{in}$), R_{sw} est la sensibilité du photoconducteur ($R_{sw} \approx 100 \Omega \cdot \mu J$), les autres paramètres sont définis sur les figures précédentes.

L'énergie de sortie peut se simplifier sous la forme :

$$I_{out} = TI_{in} = I_{in} \sin^2 (B + Ae^{-\gamma I_{incident}})$$

où A,B et γ dépendent des paramètres de la formule ci-dessus. Un choix adéquat de ces paramètres va permettre d'optimiser la stabilisation et/ou la transmission. Pour stabiliser efficacement, il faut annuler non seulement la dérivé première, mais aussi un maximum de dérivées d'ordre supérieur. Pour la transmission on cherchera à conserver une transmission supérieure à 50%.

Un des paramètres principaux sur lequel on peut jouer est la tension d'alimentation exprimée en multiple de la tension demi-onde de la cellule de Pockels.

Chapitre 4: Dispositifs de contrôle du contraste et des fluctuations des impulsions ultrabrèves utilisant des photoconducteurs

Le tableau ci-dessous présente différents points de fonctionnement et leurs résultats.

Tension approximative exprimée en multiple de la tension demi-onde $V_{\lambda/2}$	Transmission au point de fonctionnement (%)	Fluctuation pic à pic en sortie pour une fluctuation pic à pic en entrée de 30% (%)	Fluctuation pic à pic en sortie pour une fluctuation pic à pic en entrée de 1% (%)
1	50	0.35	0.00001
1.5	60	0.48	0.00002
2	65	0.59	0.00002
2.5	70	0.77	0.00003
3	75	1.07	0.00003

Tableau 4.2 : exemples de points de fonctionnement théorique optimal du stabilisateur

Les courbes de la figure 4.19 ci-dessous présentent, à titre d'exemple d'optimisation, la transmission, l'intensité de sortie et ses dérivées pour le point de fonctionnement à 70% :

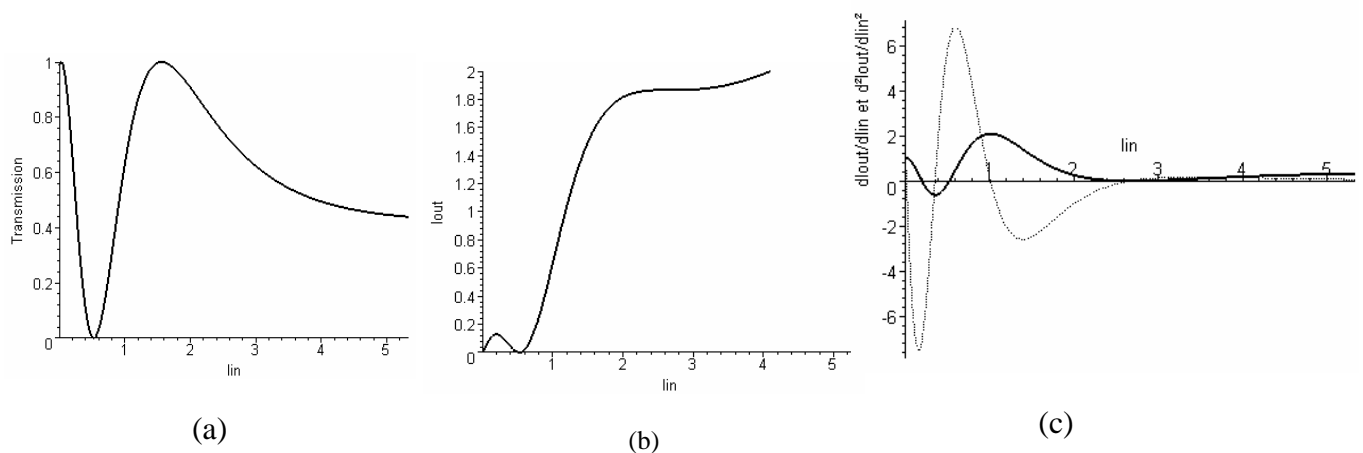


Figure 4.19 : (a) Transmission en fonction de l'intensité entrante, (b) intensité de sortie en fonction de l'intensité d'entrée, (c) dérivée première et seconde de l'intensité de sortie en fonction de l'intensité d'entrée pour le point de fonctionnement optimisé pour $T=70\%$.

On note que pour cette optimisation, l'annulation des deux premières dérivées conduit à un point de fonctionnement qui n'est plus un maximum comme dans la discussion simplifiée plus haut.

4.B.3. Résultats expérimentaux

Le montage expérimental est celui de la figure 4.17.a. Le laser utilisé est une des voies du laser 20Hz CPA Ti:Saphir du CEA/SPAM à Saclay. La cellule utilisée est une cellule de KD*P longitudinale standard. Le faisceau laser délivre des impulsions d'environ 40fs, 40μJ à 800nm et 20Hz. L'impulsion entrante est séparée en deux impulsions de chacune 20μJ. Une est utilisée pour éclairer le photoconducteur . L'autre passe dans la ligne à retard optique de 2ns environ, puis à travers la cellule de Pockels et le polariseur. Les deux tensions et le délai sont réglés de façon à obtenir la meilleure stabilisation possible. L'énergie envoyée au photoconducteur est de 3μJ par impulsion. La comparaison entre les faisceaux direct et stabilisé est effectuée sur les mêmes impulsions. La transmission du système est évaluée par référence au maximum d'intensité de sortie obtenu en modifiant les tensions sans commutation. Ceci évite d'inclure dans notre estimation les réflexions des faces non traitées de notre cellule de Pockels.

La zone de stabilisation est trouvée en mesurant la courbe I_{out} en fonction de I_{in} . (figure 4.20) A ce point, on a obtenu une amélioration d'un facteur 12 des fluctuations avec environ 50% de transmission comme le montre la figure 4.21 .

L'optimum de transmission (50%) et l'amélioration des fluctuations sont liés au niveau de fluctuation et au caractéristique du prototype (limitation dans l'excursion en tension). Par ailleurs notre mesure des fluctuations est limitée à environ 0.3% rms.

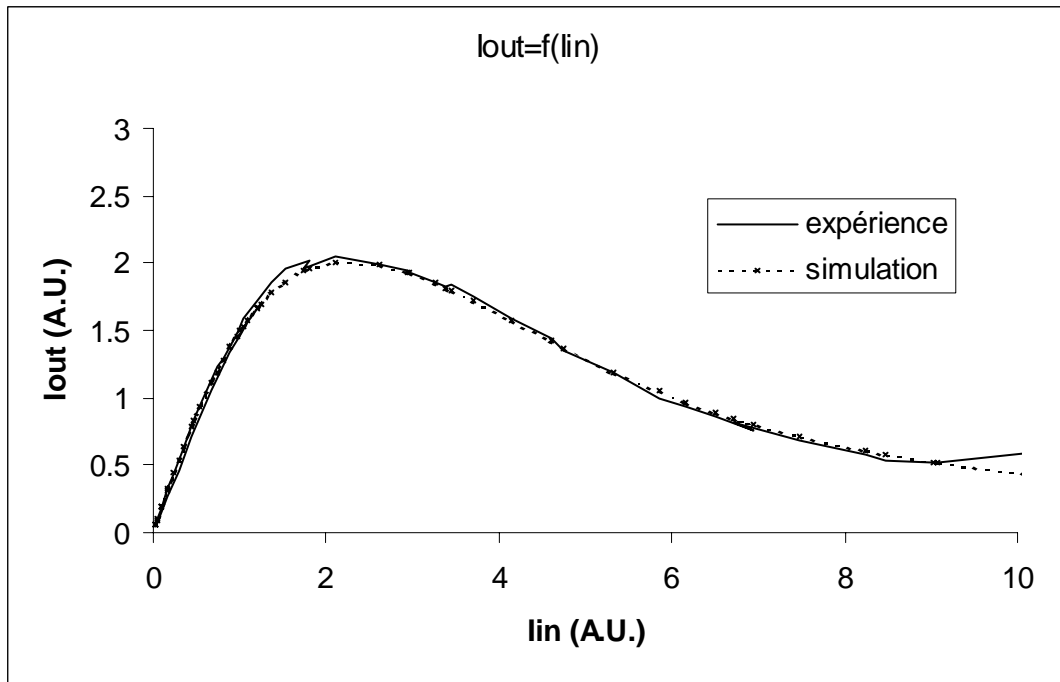


Figure 4.20: le maximum de la courbe $I_{out}=f(I_{in})$ est le point de stabilisation, la simulation correspond parfaitement aux données expérimentales et à la transmission (la transmission simulée est 47%)

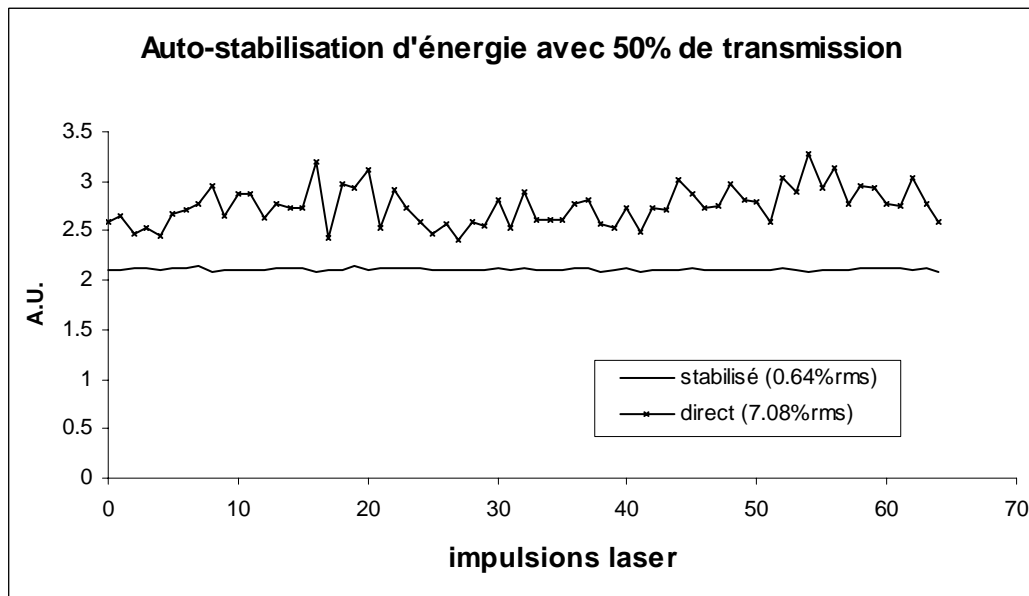


Figure 4.21 : Résultats expérimentaux de la stabilisation démontrant une amélioration par un facteur 12 sur les fluctuations.

4.B.4. Conclusion sur le stabilisateur

Ce résultat illustre la capacité du système d' « auto-stabilisation » à éliminer les fluctuations sur des lasers à faible taux de répétition. Les résultats expérimentaux et théoriques sont en accord suffisant pour espérer obtenir une stabilisation jusqu'à 0.01%. La principale limitation est la précision de la mesure des fluctuations qui n'est pas assez bonne pour explorer ces stabilisations extrêmes. Ces très fortes stabilisations interviennent sur des lasers ayant 1% de stabilité, ou en cascasant deux systèmes.

Cette stabilisation extrême de l'énergie des impulsions est particulièrement intéressante dans des domaines tel que la femto chimie ou la femto biologie où de nouvelles sources utilisent des interactions non linéaires (NOPA par exemple). De plus, la technologie de façonnage d'impulsions permet à présent d'utiliser les techniques de traitement du signal pour extraire des données non accessibles autrement (voir chapitre suivant). Or ce type de mesure nécessite de comparer des mesures successives ayant la même énergie de départ, la stabilité du laser y est donc essentielle. La combinaison de la stabilité avec le façonnage devrait modifier significativement les techniques de mesure actuelles (emploi de modulation d'amplitude et de phase avec une détection synchrone).

Suite à ce travail, et lors d'une recherche bibliographique approfondie dans le but de déposer un brevet, nous avons découvert qu'un dispositif de conception similaire avait été réalisé et publié en 1983 dans l'article « A self-setting attenuator for laser pulse energy stabilization » de M.S.White, R.W.Wyatt, A.G.Brett dans *Optics Communications* ([White 1983]).

Ce travail est l'origine du produit commercial de la société Fastlite dénommé STABBLER dont la commercialisation est prévue pour janvier 2005.

4.C CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les deux systèmes de contrôle présentés, bien que similaires dans leur composition, réalisent deux fonctionnalités très différentes pour les lasers ultrabrefs. Cette partie a montré à la fois la faisabilité expérimentale de tels systèmes et les performances optimales pouvant être atteintes. Le principal verrou technologique est celui de la tenue du photoconducteur et de sa durée de vie. Pour que ces systèmes aient un sens, il faut qu'ils puissent être utilisés sur des systèmes kilohertz et avoir une durée de vie d'au moins 3ans. Ceci correspond à environ 10^{11} impulsions! Il faut par conséquent que les problèmes de claquage et de dommage des commutateurs photoconducteurs, évoqués au chapitre sur le système de balayage, soient maîtrisés (en particulier pour le système de stabilisation où le photoconducteur n'est pas saturé).

Un grand intérêt de ces systèmes est de pouvoir être utilisés sur les lasers actuels de quelques Hz à plusieurs dizaines de kHz. Le parc actuel de laser peut ainsi être amélioré sans nécessiter de grand remaniement.

Références Chapitre 4

[Cheng 1993] : L.K.Cheng, L.T.Cheng, J.D. Bierlein, SPIE Vol 1863/43 (1993)

[Ghose] : R.N. Ghose, "Microwave Circuit Theory and Analysis", Mac Graw-Hill Pub

[Klopfenstein 1956] : R.W. Klopfenstein, "A Transmission Line Taper of Improved Design", Proc. IRE, vol 44, p. 31 (1956)

[Pockels 1894] : F.Pockels, (1891), "Ueber die Aenderungen des optischen Verhaltens und die elastischen Deformationen dielektrischer Krystalle im elektrischen Felde." Neues Jahrb. Mineral. Beilageb. 7, 201-231. More in Gött. Abh. 39, 1894. Pockels effect.

[White 1983] : M.S.White, R.W.Wyatt, A.G.Brett ,« A self-setting attenuator for laser pulse energy stabilization », Optics Comm. 44, pp.405-410, 1983

Synthèse 4^{ème} chapitre :

On a montré que pour la mesure du contraste des lasers (rapport des énergies entre impulsion principale et préimpulsions/piédestal), un détecteur à photoconducteur présente des avantages par rapport aux photodiodes classiques : intégration physique du signal et linéarité. Un montage électronique simple permettant cette mesure a été mis au point.

L'association d'un photoconducteur haute-tension avec une cellule de Pockels a permis de réaliser deux fonctions différentes :

- 1) le nettoyage des pré impulsions obtenu par une commutation ultrarapide de la cellule de l'état fermé à l'état passant juste avant l'impulsion principale. L'utilisation du nouveau matériau électro-optique RTP a permis de concevoir un circuit électrique compact de décharge par photoconducteur dont le temps de commutation mesuré est d'environ 50ps avec un jitter inférieur à 2ps.
- 2) L'auto-stabilisation d'une impulsion en énergie : on fait dépendre la tension de la cellule de la résistance d'un photoconducteur pré excité par une fraction prélevée de l'impulsion. Par un circuit adéquat, on peut alors obtenir une énergie de sortie présentant un maximum en fonction de l'énergie entrante. Dans une expérience préliminaire, ce procédé original a permis, en opérant au voisinage de ce maximum , de réduire la fluctuation d'un laser de 7% rms à 0.6%rms au prix d'une perte moyenne de 50%.

Chapitre 4: Dispositifs de mesure et de contrôle du contraste et des fluctuations des impulsions ultrabrèves utilisant des photoconducteurs