

12

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 01.03.11.

30 Priorité : 01.03.10 US 61309163.

43 Date de mise à la disposition du public de la
demande : 02.09.11 Bulletin 11/35.

56 Liste des documents cités dans le rapport de
recherche préliminaire : *Ce dernier n'a pas été
établi à la date de publication de la demande.*

60 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

71 Demandeur(s) : BOARD OF TRUSTEES OF MICHIGAN STATE UNIVERSITY — US.

72 Inventeur(s) : DANTUS MARCOS, LOZOVY VADIM
et PESTOV DIMTRY.

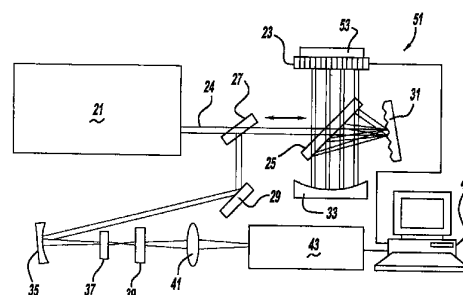
73 Titulaire(s) : BOARD OF TRUSTEES OF MICHIGAN STATE UNIVERSITY.

74 Mandataire(s) : CABINET HIRSCH ET ASSOCIES.

54 SYSTEME LASER DE MANIPULATION DE SORTIE.

57 Le système de laser comprend:
un laser (21) émettant en fonctionnement des impulsions laser;
un dispositif de mise en forme d'impulsion (51) mettant en forme en fonctionnement les impulsions;
un détecteur (43) recevant en fonctionnement les impulsions mises en forme, le détecteur ayant une réponse optique non linéaire intégrée en fréquence; et
un contrôleur (45) amenant en fonctionnement le dispositif de mise en forme à sélectionner au moins une partie spectrale des impulsions à travers le dispositif de mise en forme inférieure à une moitié du spectre entier.

Le contrôleur, le détecteur et le dispositif de mise en forme mesurent en fonctionnement et corrigent automatiquement une distorsion de phase indésirable dans au moins quelques unes des impulsions.



SYSTÈME DE LASER DE MANIPULATION DE SORTIE

La présente demande de brevet concerne généralement des systèmes de laser
5 et, plus particulièrement, un système de laser capable de manipuler sa sortie.

La compression d'impulsion, en particulier, la capacité de délivrer des formes
d'onde optique prédéfinies à la sortie d'un laser ou à un emplacement cible, est l'une
des pierres angulaires du développement de sources laser ultra rapides et du nombre
toujours croissant d'applications qui dépendent d'impulsions ultra courtes. Plus les
10 impulsions sont courtes, plus leur bande passante est grande et plus elles sont
susceptibles de présenter une dispersion de retard de groupe (de l'expression anglaise
« *Group Delay Dispersion* », abrégée en « *GDD* »). Bien que l'air et la plupart des
milieux optiques introduisent un retard de vitesse de groupe essentiellement linéaire,
les miroirs diélectriques large bande peuvent introduire une GDD fortement non
15 linéaire avec des oscillations parasites. La mesure et la compensation de ces
distorsions ont constitué un vrai problème avec les équipements et les procédures
classiques. Plus récemment, les mesures d'autocorrélation classiques ont été
remplacées par des techniques de caractérisation d'impulsion plus évoluées telles que
la modulation optique résolue en fréquence (de l'expression anglaise « *Frequency*
20 *Resolved Optical Gating* », abrégée en « *FROG* ») et l'interférométrie par phase
spectrale pour la reconstruction directe du champ électrique (de l'expression anglaise
« *Spectral Phase Interferometry for Direct Electric-Field Reconstruction* », abrégée
en « *SPIDER* »). Les progrès de la technologie de mise en forme des impulsions ont
conduit à la mise en oeuvre d'algorithmes évolutifs pour la compression d'impulsion,
25 de versions assistées par dispositif de mise en forme de FROG, SPIDER et de la
technique de conversion-élévation par résolution spectrale et temporelle (de
l'expression anglaise « *Spectrally and Temporally Resolved Up-conversion*
Technique », abrégée en « *STRUT* »). On pense, cependant, que la technique STRUT
n'a pas été acceptée dans le commerce du fait de son instabilité inhérente.

30 Le paradigme de la caractérisation et de la compression d'impulsion intégrées
a été réalisé lorsque des procédures et un équipement de balayage de phase par
interférence intra-impulsion multiphotonique (de l'expression anglaise « *Multiphoton*
Intrapulse Interference Phase Scan », abrégée en « *MIIPS*[®] », ont été introduits dans
le commerce. Divers modes de réalisation de MIIPS[®] sont présentés dans le brevet
35 US n° 7 450 618 intitulé « *Laser System using Ultra-Short Laser Pulses* », délivré le
11 novembre 2008 ; la publication de brevet US n° 2009/0296744 intitulée « *Laser*
Based Identification of Molecular Characteristics », qui a été publiée le 3 décembre
2009 ; le brevet US n° 7 609 731 intitulé « *Laser System using Ultra-Short Laser*

Pulses », qui a été délivré le 27 octobre 2009 ; la publication de brevet US n° 2009/0238222 intitulée « *Laser System Employing Harmonic Generation* », publiée le 24 septembre 2009 ; la publication de brevet US n° 2009/0207869 intitulée « *Laser Plasmonic System* », qui a été publiée le 20 août 2009 ; et le brevet US
5 n° 7 567 596 intitulé « *Control System and Apparatus for use with Ultra-Fast Laser* », délivré le 28 juillet 2009 ; tous ayant été inventés par Dantus et d'autres. Bien que MIIPS® soit une amélioration importante, dans sa forme la plus basique vendue dans le commerce, il utilise généralement (mais sans y être limité) des spectromètres effectuant des mesures sur un spectre d'impulsion entier résolu en
10 fréquence d'une manière sensible à deux photons, et repose sur la mesure et la reconstruction de la phase spectrale à partir de sa dérivée seconde par rapport à la fréquence.

Des mesures de sonogrammes classiques (telles que des tracés en fréquence et dans le temps) d'impulsions laser ultra courtes ont été présentées par Fork et d'autres,
15 dans le document « *Compression of Optical Pulses to Six Femtoseconds by Using Cubic Phase Compensation* », Opt. Lett. 12, 483 à 485 (1987), où des impulsions de 50 fs amplifiées ont fait l'objet d'une corrélation croisée avec différentes bandes spectrales d'un continuum large bande afin de caractériser la compression des impulsions optiques élargies en fréquence par une séquence de réseaux. En outre,
20 l'idée de mesures de retard de groupe résolues spectralement par une corrélation croisée avec une impulsion de référence a été présentée dans le document de Chilla et d'autres, « *Direct Determination of the Amplitude and the Phase of Femtosecond Light-Pulses* », Opt. Lett. 16, 39 à 41 (1991). La description mathématique détaillée est donnée dans le document de Chilla et d'autres, « *Analysis of a Method of Phase Measurement of Ultrashort Pulses in the Frequency-Domain* », IEEE J. Quantum
25 Electron. 27, 1228 à 1235 (1991). Une version légèrement modifiée, dans laquelle la puissance de résolution a été transférée sur l'impulsion de référence et le spectre converti-élevé entier a été enregistré, a été présentée dans le document de Foing et d'autres, « *Femtosecond Pulse Phase Measurement by Spectrally Resolved Up-Conversion – Application to Continuum Compression* », IEEE J. Quantum Electron.
30 28, 2285 à 2290 (1992). Le nom finalement accepté « STRUT » a été introduit par Rhee et d'autres dans « *Chirped-Pulse Amplification of 85-Fs Pulses at 250 KHz with 3rd-Order Dispersion Compensation by Use of Holographic Transmission Gratings* », Optics Letters 19, 1550 à 1552 (1993). De nombreuses constructions
35 classiques qui reposent sur une conversion-élévation dans un cristal non linéaire sont connues en tant que variantes de STRUT. Une approche quelque peu distincte mais très similaire consiste à utiliser une absorption à deux photons au lieu d'une conversion-élévation. L'idée a été présentée dans le document d'Albrecht et d'autres,

« Chirp Measurement of Large-Bandwidth Femtosecond Optical Pulses Using Two-Photon Absorption », Optics Communications 84, 223 à 227 (1991).

Un inconvénient commun de ces approches classiques est le besoin d'un faisceau de référence divisé séparé. Il complique la configuration de l'instrument et complique la caractérisation de l'impulsion au niveau de l'échantillon. Deuxièmement, la compensation des distorsions de phase mesurées est déléguée à différents composants matériels, par exemple, un simple compresseur à paire de prismes, des miroirs diélectriques spécialement conçus, ou un dispositif de mise en forme d'impulsion, qui ajoutent des variables environnementales et matérielles indésirables dans l'analyse.

Le brevet US n° 6 327 068 intitulé « Adaptive Pulse Compressor », qui a été délivré à Silberberg et d'autres, le 4 décembre 2001, et le document « Femtosecond Pulse Shaping by an Evolutionary Algorithm with Feedback », Applied Physics 63, 779 à 782 (décembre 1997), présentent la correction d'une phase spectrale en utilisant un algorithme génétique et en mesurant le signal maximum de génération de deuxième harmonique (« SHG »), sans caractérisation d'impulsion. L'inconvénient de cette approche est qu'il y a généralement plus de 100 pixels dans un dispositif de mise en forme d'impulsion de modulateur de lumière spatial (« SLM ») et que l'ajustement de chacun de manière indépendante entraîne des changements qui sont minimes par rapport à la SHG totale. Par conséquent, la convergence vers l'impulsion compressée prend du temps et est imprécise. D'autres approches similaires qui collectent un signal optique non linéaire à partir de l'impulsion entière échouent parce que les changements dans la partie centrale de l'impulsion ont un poids beaucoup plus grand que ceux dans les ailes du spectre d'impulsion. Par conséquent, il y a de la place pour un procédé précis et efficace basé sur une caractérisation d'impulsion améliorée pour une caractérisation et une compression d'impulsion laser moins coûteux parce qu'il ne nécessite pas de spectromètre.

Selon la présente invention, un système de laser capable de manipuler une phase et/ou une amplitude et/ou une polarisation des impulsions de sortie est proposé. Selon un autre aspect, un système de laser comprend un procédé de caractérisation d'impulsion auto référencé. Un autre aspect isole deux bandes spectrales ou plus, balaye une ou plusieurs d'entre elles dans le spectre et mesure et/ou calcule la dérivée première d'une phase (retard de groupe). Encore un autre aspect obtient une superposition dans le temps entre des formes d'onde, correspondant aux bandes spectrales isolées, en mesurant une réponse optique non linéaire et en recherchant une interférence intra-impulsionnelle multiphoton intégrée constructive dans une excitation ou une absorption non linéaire (deux photons ou plus). Selon un aspect supplémentaire, le présent procédé agit en tant que corrélation

croisée assistée par dispositif de mise en forme d'impulsion entre des sous-bandes spectrales. Une technique basée sur un dispositif de mise en forme d'impulsion à faisceau unique pour une mesure sans spectromètre et une compensation des distorsions de phase d'impulsion laser est également proposée dans un aspect
5 supplémentaire.

Selon un autre aspect du présent système, deux bandes spectrales ou plus sont considérées comme étant isolées si elles ne partagent pas de fréquences communes. Pour la présente invention, le but consiste à détecter une contribution optique non linéaire qui dépend des bandes isolées et à établir une discrimination à l'égard de la
10 contribution du reste du spectre d'impulsion laser. Cela est réalisé, à titre d'exemple, par une simple modulation d'amplitude dépendant de la fréquence, lorsque la lumière à l'extérieur des bandes spectrales sélectionnées est atténuée. Selon un aspect supplémentaire, la suppression de la lumière à l'extérieur des bandes isolées souhaitées peut également être réalisée par une mise en forme par polarisation et
15 l'utilisation d'éléments optiques sensibles à la polarisation ou d'une réponse non linéaire sensible à la polarisation. Selon encore un autre aspect, la suppression de la lumière à l'extérieur des bandes isolées souhaitées peut également être réalisée par une modulation de phase qui mène à une interférence destructive et, par conséquent, à une atténuation de la contribution non linéaire à partir de l'extérieur des bandes
20 spectrales sélectionnées. Selon un autre aspect, une mise en forme de phase et/ou d'amplitude et/ou de polarisation est effectuée à la fois pour générer une référence interne et balayer le retard entre des formes d'onde correspondant à des bandes spectrales isolées du spectre d'entrée.

Le présent système utilise avantageusement une référence interne et prend en
25 charge une approche moins coûteuse, plus précise et simplifiée de la mesure et de la compensation des distorsions de phase. Une approche à faisceau unique de la mesure et de la correction des système et procédé présents est supérieure aux constructions à faisceau divisé antérieures ayant une impulsion de référence et une impulsion mesurée décalée et séparée, étant donné que la présente approche à faisceau unique
30 ne souffre pas des effets environnementaux tels que des vibrations, des fluctuations de l'air et des variations de température, comme c'est le cas pour les constructions à deux faisceaux classiques. Le présent trajet de faisceau unique du système utilise la même optique, par opposition aux faisceaux divisés classiques, éliminant de ce fait les différences matérielles et environnementales les trajets séparés. Les système et
35 procédé présents basés sur un dispositif de mise en forme d'impulsion pour une caractérisation et une compression d'impulsion décrits dans le présent document ne nécessitent pas de référence externe et permettent une récupération sans spectromètre de la dérivée première de la phase spectrale sur l'impulsion.

Le présent système isole avantageusement différentes régions spectrales pour leur optimisation indépendante, lequel soutient la comparaison avec une mise en oeuvre assistée par dispositif de mise en forme de STRUT dans laquelle l'impulsion de référence séparée contient le spectre entier. Les calculs de dérivée première sont
5 beaucoup plus robustes et avantageux que les calculs de dérivée seconde pour la récupération de fonctions de phase spectrale à gradient élevé. Les mesures de fonctions spectrales à gradient élevé complexes posent des problèmes pour les constructions antérieures comprenant les procédés de caractérisation d'impulsion plus communs connus en tant que SPIDER et FROG. Les système et procédé présents
10 sont idéalement appropriés pour des conditions dans lesquelles il est difficile d'obtenir un spectre optique non linéaire, mais dans lesquelles il est facile d'obtenir un signal optique non linéaire intégré ; par exemple, en microscopie optique non linéaire. En outre, les système et procédé présents fournissent une approche améliorée de la mesure des distorsions de phase spectrale des impulsions laser ultra
15 courtes. La présente approche, à la différence du mode de réalisation de base du commerce du MIIPS, aborde l'impulsion par régions spectrales ou sous-bandes, plutôt que par le spectre entier.

En résumé, la présente invention propose un système de laser comprenant :

un laser émettant en fonctionnement des impulsions laser ;

20 un dispositif de mise en forme d'impulsion mettant en forme en fonctionnement les impulsions ;

un détecteur recevant en fonctionnement les impulsions mises en forme, le détecteur ayant une réponse optique non linéaire intégrée en fréquence ; et

25 un contrôleur amenant en fonctionnement le dispositif de mise en forme à sélectionner au moins une partie spectrale des impulsions par le dispositif de mise en forme inférieure à une moitié du spectre entier ;

le contrôleur, le détecteur et le dispositif de mise en forme mesurant en fonctionnement et corrigeant automatiquement une distorsion de phase indésirable dans au moins quelques unes des impulsions.

30 Selon des modes de réalisation préférés, le système de laser comprend en outre une ou plusieurs des caractéristiques suivantes :

- le système comprend en outre un microscope recevant au moins quelques unes des impulsions laser transmises à travers le dispositif de mise en forme d'impulsion ;

35 - la partie spectrale de référence des impulsions laser sélectionnée par le dispositif de mise en forme d'impulsion agit en tant que référence à laquelle sont comparées par le contrôleur des parties spectrales balayées des impulsions laser,

sélectionnées par au moins une zone mobile du dispositif de mise en forme d'impulsion ;

- le système comprend en outre des instructions logicielles dans le contrôleur compensant automatiquement les distorsions de phase mesurées en introduisant une phase correspondante qui annule les distorsions ;

- le système comprend en outre au moins une optique parmi : (a) un miroir diélectrique multicouche, et (b) un réseau de Bragg, situé dans le trajet de faisceau, le contrôleur mesurant automatiquement la phase introduite par l'optique d'une manière calculée sans un algorithme d'apprentissage génétique, et en collectant une génération de deuxièmes harmoniques à partir seulement de parties du spectre au lieu d'utiliser le spectre entier ;

- la sélection du dispositif de mise en forme de parties spectrales des impulsions à travers le dispositif de mise en forme comprend une transmission ;

- la sélection du dispositif de mise en forme de parties spectrales des impulsions à travers le dispositif de mise en forme comprend la mise en forme d'au moins l'une : (a) d'une phase, et (b) d'une polarisation, pour réduire une réponse non linéaire provenant de parties indésirables du spectre ;

- le détecteur est une photodiode avec une réponse optique non linéaire provoquée par les impulsions de sortie ;

- le système comprend en outre des instructions logicielles dans le contrôleur mesurant automatiquement une distorsion de phase dans les impulsions laser en déterminant une dérivée première locale d'une phase à travers un spectre des impulsions ;

- le système comprend en outre des instructions logicielles dans le contrôleur répétant automatiquement des instructions de mesure et de compensation pour affiner la qualité des impulsions de sortie, une première itération permettant une élimination d'au moins 80 % des distorsions de phase ;

- les impulsions laser ont chacune une durée inférieure à 1 picoseconde ;

- les impulsions laser ont chacune une durée inférieure à 15 femtosecondes ;

- les corrections de phase mesurées sur une partie de faible intensité d'une sortie de faisceau laser sont mises en oeuvre sur un deuxième dispositif de mise en forme d'impulsion programmable agissant sur le faisceau laser de sortie principal.

Selon un autre aspect, l'invention propose un logiciel informatique pour un système de laser, le logiciel comprenant :

un premier jeu d'instructions créant des fenêtres spectrales de sélection de dispositif de mise en forme d'impulsion ;

un deuxième jeu d'instructions provoquant une réduction, par le dispositif de mise en forme d'impulsion, de parties spectrales d'au moins une impulsion laser dans les régions autres que celles sélectionnées à travers les fenêtres ;

5 un troisième jeu d'instructions paramétrant au moins l'une des fenêtres en tant que référence ;

un quatrième jeu d'instructions balayant les valeurs de phase à travers au moins l'une des fenêtres ;

10 un cinquième jeu d'instructions enregistrant les valeurs provenant d'un détecteur capable de mesurer une réponse optique non linéaire à partir d'un faisceau de sortie ;

un sixième jeu d'instructions comparant les valeurs détectées en fonction des valeurs balayées ;

un septième jeu d'instructions déterminant la phase qui maximise la réponse du détecteur pour un ensemble donné de fenêtres ; et

15 un huitième jeu d'instructions rassemblant essentiellement toutes les valeurs et déterminant à partir des valeurs la distorsion de ladite au moins une impulsion.

Selon des modes de réalisation préférés, le logiciel informatique comprend en outre un ou plusieurs des jeux d'instructions suivants :

20 - un jeu d'instructions compensant la distorsion de phase ;
- un jeu d'instructions amenant un laser à émettre ladite au moins une impulsion comprenant les fenêtres de référence et balayant se déplaçant à la manière d'un faisceau unique entre le laser et le détecteur ;

25 - un jeu d'instructions enregistrant le spectre de génération de deuxième harmonique intégré en fréquence, dans lequel le détecteur comprend un cristal de génération de deuxième harmonique et un spectromètre ;

- un jeu d'instructions recevant des valeurs de mesure de spectre d'une photodiode, le détecteur étant ladite photodiode.

Selon encore un autre aspect, l'invention propose un procédé d'utilisation d'un laser, le procédé comprenant :

30 (a) l'émission d'une impulsion de faisceau laser ;

(b) la caractérisation de l'impulsion en isolant au moins deux bandes spectrales et le balayage d'au moins une bande en utilisant un dispositif de mise en forme d'impulsion programmable et en déterminant une dérivée première d'une phase sur un spectre entier de l'impulsion ; et

35 (c) la mesure d'une réponse optique non linéaire en créant une référence interne dans l'impulsion et en balayant un retard entre des formes d'onde correspondantes.

Selon des modes de réalisation préférés, le procédé comprend en outre en une ou plusieurs des étapes suivantes consistant à :

- mesurer un retard dépendant de la fréquence introduit par la réflexion de l'impulsion par un miroir diélectrique à large bande ;
- 5 - la corrélation croisée entre des sous-bandes spectrales de l'impulsion en utilisant le dispositif de mise en forme d'impulsion programmable ;
- le calcul automatique d'une distorsion de phase dans l'impulsion et la correction automatique de la distorsion de phase dans les impulsions suivantes dans les limites de moins de cinq itérations en moins de cinq minutes, dans lequel les
- 10 impulsions ont chacune une durée inférieure à 1 picoseconde ;
- la transmission d'une première bande spectrale de l'impulsion à travers une fente fixe du dispositif de mise en forme d'impulsion ; la transmission d'une deuxième bande différente de l'impulsion à travers la fente de balayage ; et le blocage du spectre restant de l'impulsion pendant l'opération de caractérisation en
- 15 établissant la phase des pixels qui doivent être bloqués de façon répétitive et alternée à des valeurs de zéro et de π et en limitant la résolution optique du dispositif de mise en forme d'impulsion ;
- l'élimination en grande partie des parties spectrales indésirables par une polarisation ;
- 20 - l'élimination en grande partie des parties spectrales indésirables par une manipulation d'amplitude ;
- l'élimination en grande partie des parties spectrales indésirables par une manipulation de phase ;
- l'optimisation d'un miroir diélectrique multicouche au moins en partie sur la
- 25 base de la mesure ;
- l'optimisation d'un laser à fibres au moins en partie sur la base de la mesure ;
- l'ajustement d'un miroir déformable au moins en partie sur la base de la mesure ;
- 30 - l'optimisation d'un réseau de Bragg au moins en partie sur la base de la mesure.

Des avantages et des caractéristiques supplémentaires de la présente invention deviendront évidents à partir de la description qui suit, lue conjointement avec les dessins joints.

35 La figure 1 est une vue schématique montrant un mode de réalisation de laboratoire préféré du système de laser de la présente demande ;

la figure 2 est une vue schématique montrant un mode de réalisation de microscopie préféré du système de laser de la présente demande ;

les figures 3 et 4 sont des vues schématiques montrant un mode de réalisation particulier du procédé, dans lequel une modulation d'amplitude (fentes de transmission) par un dispositif de mise en forme d'impulsion est utilisée pour isoler les bandes spectrales dans le spectre de laser du système de laser préféré ;

5 la figure 5 est un ensemble de schémas montrant un isolement et une manipulation de phase du spectre par le système de laser préféré et leur contrepartie dans le domaine temporel ;

les figures 6 à 10 sont des graphes montrant des résultats de manipulation de phase attendus par le système de laser préféré ;

10 la figure 11 est un graphe montrant des résultats de manipulation de phase attendus par un premier autre mode de réalisation du système de laser ;

la figure 12 est un graphe montrant des résultats de manipulation de phase attendus par un deuxième autre mode de réalisation du système de laser, où aucune référence n'est utilisée ;

15 la figure 13 est un organigramme montrant des premières autres instructions logicielles pour le système de laser ;

la figure 14 est un organigramme montrant des instructions logicielles préférées pour le système de laser ;

20 la figure 15 est un organigramme montrant des deuxièmes autres instructions logicielles pour le système de laser, où aucune référence n'est utilisée ;

la figure 16 est une vue schématique montrant un autre mode de réalisation du système de laser ; et

la figure 17 est un graphe montrant des résultats de manipulation de phase attendus par un autre mode de réalisation du système de laser.

25 L'agencement de la configuration de matériel préférée pour un laboratoire est montré sur la figure 1. Un oscillateur laser Ti:saphir 21 (de préférence obtenu auprès de KMLabs, fréquence de répétition de 86 MHz, bande passante à mi-hauteur de ~100 nm à 810 nm) et un dispositif de mise en forme d'impulsion plié 4 fois 51 sont utilisés. Le dispositif de mise en forme d'impulsion 51 comprend un modulateur de
30 lumière spatial 23 à 640 pixels unidimensionnel (autrement dit, comportant une rangée de pixels) à masque double, qui est de préférence le modèle CRi SLM-640-D, obtenu auprès de Cambridge Research & Instrumentation, Inc. D'autres modes de réalisation du modulateur de lumière spatial qui peuvent réaliser (imiter) une modulation de phase, d'amplitude ou de polarisation par une réfraction, une
35 absorption, ou une rotation de polarisation de la lumière, sont également appropriés. De manière similaire, d'autres modes de réalisation de dispositifs de mise en forme d'impulsion programmables qui ne sont pas de la conception 4 fois mais qui peuvent être utilisés pour commander la phase et l'amplitude spectrale sont également

appropriés. Dans le mode de réalisation préféré, chaque impulsion dans le faisceau laser 24 a de préférence une durée inférieure à 1 picoseconde, et plus préférablement inférieure à 15 femtosecondes. Le faisceau dans le dispositif de mise en forme 4 fois est dispersé par un réseau 31, dirigé par un miroir plat 25 et focalisé sur le SLM 23 par un miroir incurvé 33. Le SLM est soutenu par un miroir réfléchissant 53. Le faisceau laser de sortie est renvoyé par des miroirs de direction 27 et 29. Le faisceau est ensuite focalisé par un miroir sphérique ($f = 250$ mm) recouvert d'argent 35 sur un cristal KDP 37 d'une épaisseur d'environ 20 μm . Un signal de génération de deuxième harmonique ("SHG") est séparé de la lumière infrarouge par un filtre de verre BG39 de 3 mm 39 et refocalisé par une lentille 41. Dans un autre mode de réalisation plus coûteux, un détecteur de spectromètre couplé à une fibre (tel que le modèle USB4000 d'Ocean Optics) est utilisé au lieu du détecteur à photodiode. Dans cette autre variante, le signal de SHG est intégré spectralement pour les mesures de retard de groupe de sorte que le spectromètre agit en tant que détecteur monocanal. Dans encore un autre mode de réalisation, un détecteur non linéaire tel qu'une photodiode non linéaire peut être utilisé au lieu du cristal de SHG et des éléments optiques joints dans le bras de détection. Le détecteur à photodiode 43 préféré est du type à réponse à deux photons intégré en fréquence avec une bande interdite qui est supérieure à l'énergie photonique du laser mais inférieure à deux fois l'énergie photonique du laser. La photodiode mesure ou détecte en fonctionnement des valeurs analogiques de MII intégré en fréquence ou d'excitation à deux photons, mais ne mesure pas dans le domaine fréquentiel comme le font les spectromètres beaucoup plus coûteux et compliqués. Une photodiode appropriée est présentée dans le document de Ranka et d'autres, « Autocorrelation Measurement of 6-fs Pulses Based on the Two-Photon-induced Photocurrent in a GaAsP Photodiode », Opt. Lett. 22 (17), 1344 à 1346 (1977).

Dans les constructions préférées, un contrôleur informatique programmable 45 est connecté au SLM 23 et au détecteur 43, et comprend une mémoire ROM et une mémoire RAM sans transitoire pour mémoriser les instructions logicielles. Le terme « mémoire » est utilisé pour comprendre, mais sans y être limité, une mémoire fixe ou amovible, des lecteurs de disque dur, des disques compacts, des cartes mémoire flash, des bandes magnétiques, et similaires. Le logiciel est exécuté sur un microprocesseur ou une autre unité centrale dans le contrôleur ou associée à celui-ci, et des périphériques d'entrée, tels qu'un clavier et un écran d'affichage, sont utilisés pour le paramétrage manuel de valeurs cibles et pour observer visuellement les valeurs résultantes mesurées automatiquement.

Les systèmes de laser et procédé présents sont idéalement appropriés pour une microscopie étant donné qu'un spectromètre n'est pas nécessaire. Le mode de

réalisation préféré d'un système de microscopie est montré sur la figure 2. Un oscillateur laser accordable 121 émet un faisceau d'impulsions ultra courtes 124, qui sont envoyées à un dispositif de mise en forme d'impulsion 4 fois réfléchissant 151 comprenant un SLM programmable 123 (similaire à celui décrit ci-dessus pour le mode de réalisation de laboratoire), un miroir réfléchissant 153, et un réseau 131. Un miroir incurvé 133 et des miroirs de direction 125, 127 et 129 sont également utilisés. Un détecteur à photodiode de détection 143 est monté dans un plan focal d'un objectif d'un microscope 155 qui reçoit les impulsions mises en forme et les focalise sur un échantillon cible dans celui-ci. Un contrôleur informatique programmable 145 est connecté au SLM 123 et au laser 121 et les commande, et reçoit les signaux détectés provenant du détecteur à photodiode 143 pour d'autres calculs, une commande de matériel et une sortie de données, comme celui du mode de réalisation de laboratoire.

Avec le présent système, une fonction de spectromètre est déléguée au dispositif de mise en forme d'impulsion 51. Une modulation d'amplitude spectrale (transmission $T = 0$ ou 1) est utilisée pour isoler deux bandes spectrales étroites, comme montré sur les figures 3 à 5. La superposition temporelle entre les formes d'onde correspondantes est obtenue en mesurant une réponse optique non linéaire (« NLO ») et en recherchant l'interférence intra-impulsionnelle multiphoton constructive (« MII »). Si on suppose que les distorsions de phase dans la bande étroite peuvent être approchées par une droite, seule la pente (c'est-à-dire, le retard) doit être ajustée pour trouver le signal non linéaire maximum.

En variante, la procédure peut être considérée comme une corrélation croisée assistée par dispositif de mise en forme entre des sous-bandes spectrales. Une fonction de phase spectrale linéaire, $\varphi_{\text{delay}} = \tau \cdot (\omega - \omega_{\text{slit}})$, est encodée avec un retard variable τ sur l'une des bandes spectrales. Le décalage de la fréquence de porteuse ω par la fréquence centrale de la bande, ω_{slit} , permet d'effectuer une corrélation croisée similaire à une intensité des impulsions se propageant de manière colinéaire (balayage τ). Les valeurs de retard correspondant aux maxima des traces de corrélation croisée tracent la dérivée première du masque de phase de compensation, $\varphi'_c(\omega)$. Une fois qu'une des fentes de transmission (« T-slits »), également appelées ouvertures ou fenêtres, a été balayée dans la plage de fréquence spectrale, la dérivée première de la phase de compensation peut être interpolée sur le spectre entier. Son intégration directe sur une fréquence ω donne la phase spectrale de l'impulsion $\varphi(\omega)$, qui est égale à $-\varphi_c(\omega)$. Ce procédé est appelé dans le présent document « MIIPS-S ».

Le SLM 23 est approprié à une modulation d'amplitude et de phase programmable. Une mise en forme d'amplitude est utilisée pour sélectionner deux bandes étroites de largeur δ dans le spectre de laser d'entrée de largeur Δ ($\delta \ll \Delta$).

Une mise en forme de phase est utilisée pour appliquer une corrélation croisée aux formes d'onde correspondantes à l'emplacement cible et récupérer le retard de groupe relatif entre les deux bandes spectrales sélectionnées. Les T-slits (voir "T_{Scan}" et "T_{Fixed}" sur la figure 3) sont choisies de manière à avoir une largeur de 12 à 31 pixels (de préférence ~10 nm ou 0,03 rad/fs à 800 nm, 0,32 nm par pixel, pour 31 pixels). Une région spectrale fixe à proximité du centre est désignée en tant que référence interne T_{Fixed}, et l'autre T_{Scan} est décalée sur l'ensemble de pixels du SLM après chaque τ -scan sur la base d'une commande automatique du contrôleur et de son logiciel. Les deux T-slits sont décalées spectralement d'au moins une largeur pour éviter des distorsions des traces de corrélation croisée par l'interférence entre des contributions intra-bande et inter-bande dans le signal de SHG. Les traces de corrélation croisée sont ajustées à une fonction gaussienne pour déterminer le retard relatif. Les graphes de masque de phase de la figure 5 montrent la relation consistant en ce que, lorsque la pente raide de τ -scan est ajustée, elle modifie le retard des émissions de bande spectrale étroite.

Il conviendrait de se référer au graphe central et au graphe inférieur de la figure 7 dans lesquels des tracés de retard en fonction du nombre de pixels sont montrés pour le SLM. Dans chaque tracé, la partie spectrale souhaitée de référence fixe du faisceau est désignée en tant qu'ouverture ou « Ref.T-slit » et le cercle à l'intérieur de celle-ci est la valeur de retard moyenne dans celui-ci. Cette ouverture ou T-slit permet au dispositif de mise en forme d'impulsion de transmettre la région spectrale étroite ou une partie de chaque impulsion correspondant à celle-ci. Les autres ouvertures dans ces tracés, qui sont inclinées vers le haut et vers l'extérieur par rapport à « Ref.T-slit » sont une série de fentes ou d'ouvertures de transmission balayées ou déplacées. Les ouvertures déplacées T-Scan, montrées en couches adjacentes les unes aux autres, sont créées, une par τ -scan de laser subséquent dans la série ou le train après que la Ref.T-slit (T_{Fixed}) initiale a été créée dans le SLM ; à des fins de clarté, chaque τ -scan subséquent peut être en réalité pour une ouverture de position de pixel différente. Les cercles dans chaque T_{Scan} indiquent la valeur de retard correspondant au maximum ajusté de la réponse non linéaire pour chaque fenêtre à fente. La figure 7 représente une itération bien qu'elle comprenne de multiples τ -scans dans l'itération. Les pixels à l'extérieur des T-slits ouvertes bloquent la transmission du spectre d'impulsion restant. En outre, une pente est plus souhaitable qu'une phase constante pour le retard et le retard sert maximiser une réponse à deux photons, telle qu'une MII ou une corrélation croisée. Les fentes de T_{Scan} sont ajustables automatiquement par une commande de logiciel informatique du dispositif de mise en forme d'impulsion.

Dans un mode de réalisation en variante, les ouvertures T_{Scan} passées sont laissées ouvertes alors que les T-windows sont déplacées. Par exemple, bien que la partie transmettant à travers T_{Scan} soit ajustée, au moins une impulsion est transmise mais plus généralement une multitude d'impulsions sont transmises, alors que la phase est ajustée. A la suite de l'ajustement de phase, cette partie du spectre peut être laissée dans le mode de transmission, tout en ouvrant la fenêtre T_{Scan} suivante et elle sert à augmenter l'intensité et à diminuer la durée d'impulsion de la référence, les deux caractéristiques étant bénéfiques pour les mesures de T_{Scan} suivantes. Cette approche est montrée sur la figure 17. En tant qu'autre option, les valeurs de temps optimales peuvent être lissées ou moyennées par le logiciel à des fins de compensation. L'approche montrée sur la figure 7 est une approche similaire à celle décrite ci-dessus, mais dans ce cas, une T-slit est choisie pour ajuster la phase de la partie de longueur d'onde plus grande du spectre et une deuxième T-slit est choisie pour ajuster la phase de la longueur d'onde plus courte du spectre. Les données pour les deux fentes de référence ont des points communs, ce qui permet de les fusionner comme cela est davantage expliqué ci-après.

Notez que même si une T-slit de référence unique peut être utilisée, il est avantageux d'attribuer différentes T-slits de référence pour une reconstruction $\varphi'_c(\omega)$ dans les parties rouge et bleue du spectre, et ensuite de superposer les deux courbes de mesure résultantes en utilisant les points communs. La phase et sa dérivée première sont mises à zéro dans le présent mode de réalisation au niveau du pixel 319, au centre du spectre infrarouge. Le graphe supérieur sur la figure 7 montre des données normalisées attendues de la première itération. Comme mentionné précédemment, la largeur de T-slit pour les deux bandes spectrales, fixe et balayée, est de préférence de 31 pixels, cependant, au niveau des bords spectraux et de SLM ou des sections extérieures, la largeur de T-slit est augmentée. La T-slit de référence est choisie pour se trouver au niveau des pixels 244 à 274 et 364 à 394 pour les mesures dans la partie rouge et bleue du spectre, respectivement. Les cercles montrent les positions des maxima de corrélation croisée, trouvés par un ajustement gaussien.

Les étapes de procédure pour la compensation de mesure sont comme suit. Premièrement, une fente de référence T_{Fixed} est définie. Deuxièmement, la phase dans la fente de balayage T_{Scan} est ajustée de manière indépendante pour trouver le retard entre les formes d'onde correspondant à T_{Fixed} et T_{Scan} . Troisièmement, la deuxième étape est répétée alors que T_{Scan} est balayée sur les pixels du SLM. Quatrièmement, les fentes de balayage sont élargies pour les extrémités du spectre. Cinquièmement, une fente de référence différente est définie (comparer le graphe central et le graphe inférieur de la figure 7) pour surmonter un espace entre les fentes de référence et de

balayage. Sixièmement, d'autres fentes de balayage sont ouvertes à différents emplacements spectraux/de SLM. Septièmement, on continue d'utiliser les ouvertures de fente de balayage ajustées précédemment pendant les impulsions laser suivantes pour mesurer le retard par rapport à la forme d'onde de référence dans celles-ci. Cela est de préférence exécuté par le contrôleur et le logiciel d'une manière automatique en moins d'environ cinq minutes, et sans nécessiter un déplacement physique de matériel.

Une mesure et une compression uniques ont rétabli une impulsion avec une GDD non linéaire importante et ont résulté en une intensité de la SHG supérieure à 80 % du maximum, attendu pour une impulsion à transformation limitée (TL). Deux ou trois itérations de mesure-compensation supplémentaires (d'environ 5 minutes chacune avec le présent matériel) devraient amplifier l'intensité de la SHG à 97 à 100 %. Les spectres de SHG attendus et le signal de SHG intégré spectralement pour six itérations consécutives de compensation de distorsion de phase dans l'autre configuration de laboratoire avec un spectromètre sont montrés sur la figure 6. Les données attendues indiquent que trois itérations semblent suffisantes pour compresser l'impulsion jusqu'à TL dans la limite de bruit. Le graphe en encart sur la figure 6 illustre l'amélioration importante attendue de l'intensité de la SHG avec la première itération des système et procédé présents. Le profil attendu pour $\phi'(\omega)$ est montré par un fin trait sombre passant par des points (cercles) expérimentaux dans le graphe supérieur de la figure 7.

Deux signaux de référence sont utilisés sur la figure 7. Pour le graphe central, la T-slit de référence est à ~ 260 , tandis que pour le graphe inférieur, la T-slit est au pixel ~ 380 . Cela est effectué de sorte qu'il existe une bonne superposition des deux côtés du spectre. Alors que les mesures sont prises, il n'y a qu'une seule référence, cependant, les deux moitiés du spectre sont réalisées séparément.

Conceptuellement, pour les constructions du mode de réalisation préféré, seulement deux parties de l'impulsion sont abordées à la fois. Cependant, pour le deuxième autre mode de réalisation examiné ci-après, une seule région est abordée à la fois et il n'y a pas de région de référence. Dans les modes de réalisation préférés, la phase d'une partie est ajustée localement jusqu'à ce qu'un signal optique non linéaire maximum soit détecté, indiquant une MII constructive maximum. Le calcul de balayage se déplace ensuite vers une partie suivante jusqu'à ce que la phase entière soit mesurée par rapport à la région spectrale de référence. Dans tous les cas, l'impulsion est divisée en un nombre discret de régions ou de parties spectrales (généralement un nombre entre 3 et 3000). Par la suite, la phase de chaque partie est ajustée. Cette approche isole avantageusement l'attention sur les ailes de l'impulsion et elle peut être mise en oeuvre sans l'utilisation d'un spectromètre pour mesurer le

spectre de la réponse optique non linéaire. Ce procédé peut, en variante, être combiné avec les procédés MIIPS[®] précédents, soit en tant qu'amélioration supplémentaire, soit en tant que premier balayage.

Pour un autre mode de réalisation des système de laser et procédé présents, la phase d'une des régions est modifiée par une constante. La constante est modifiée de 0 à 2B dans une des régions, alors que le système mesure un signal NLO qui résulte de la somme (ou de la différence) des fréquences dans la région mesurée et des fréquences dans une région désignée en tant que région de référence (généralement au centre du spectre où l'intensité est maximum). Cette version est idéale pour récupérer une phase binaire, mais elle fonctionne également avec des distorsions de phase arbitraires. La figure 11 illustre le spectre d'impulsion (montré par un trait incurvé plein), la phase inconnue (montrée par un trait incurvé en pointillés) et la phase mesurée (montrée par des traits pleins horizontaux courts) qui correspondent à la valeur négative de la phase introduite pour sa compensation. Une fois mesurée, une fonction de lissage ou une fonction spline peut être appliquée pour réduire les discontinuités dans la phase.

La figure 6 illustre des spectres de SHG attendus pour aucune compensation de phase sur le SLM et des masques de compensation sélectionnés après la présente compensation de distorsion de phase de MIIPS-S. L'encart montre la dépendance attendue du signal de SHG intégré spectralement vis-à-vis du nombre de cycles d'itération de mesure-compensation.

Les miroirs diélectriques à large bande, dont les propriétés de réflexion reposent sur une ingénierie précise de leur structure multicouche, sont des sources potentielles de distorsion d'impulsions ultra courtes. Un miroir New Focus NIR5102 est utilisé ici en tant qu'exemple. Les données attendues pour la mesure et la compensation de distorsions de phase introduites par le miroir diélectrique, qui reflètent les impulsions laser mises en forme, sont montrées sur la figure 8. Le graphe inférieur sur la figure 8 fournit les données attendues avec des angles d'incidence de 45° et de 46° pour plusieurs oscillations de GDD distinctes, où le retard de groupe change rapidement jusqu'à 150 fs. Ces caractéristiques sont le résultat d'une interférence telle que de Gires–Tournois. Le fin trait plein mappe le spectre de laser et les traits en pointillés marquent le niveau d'intensité $1/e^2$. Lorsqu'une impulsion TL est réfléchi par un tel miroir, la complexité de la phase spectrale introduite peut être déduite de la structure dans le spectre de SHG du graphe supérieur sur la figure 8. Le fin trait plein est le spectre de SHG attendu après la présente compensation. Les pics dans les spectres de SHG pour des impulsions déformées sont bien corrélés avec ceux provenant des oscillations de GDD si on prend en compte les processus à deuxième harmonique et fréquence de somme. Cela

est dû au fait que les oscillations de GDD forment des axes de symétrie (locale) dans la phase spectrale.

Les calculs de distorsion de dérivée première effectués par le logiciel du présent système sont idéalement appropriés pour des fonctions spectrales à haut gradient telles que celles produites par des interférences illustrées sur la figure 8. Ces interférences se produisent dans de petites régions (par exemple, inférieure à $1/10^{\circ}$ de la largeur spectrale) dans le spectre et résultent en des retards de groupe supérieurs à 100 fs ou en des sauts de phase de plus de 10B par rapport aux autres régions spectrales. Cette approche à dérivée première est beaucoup plus robuste que les calculs de dérivée seconde et, par conséquent, fournit une meilleure analyse en temps réel dans cette situation.

La légère désadaptation d'impédance dans un simple miroir de Bragg quart d'onde la rend inadéquate pour diriger des impulsions ultra courtes dans des dispositifs classiques à cause des oscillations de GDD résultantes, qui déforment et élargissent sérieusement l'impulsion. Le profil de forme d'onde après un rebond sur un miroir diélectrique large bande (angle d'incidence de 45°) dans un système classique est montré en noir foncé dans la partie principale de la figure 9. Ces données utilisaient la même configuration de laboratoire et un procédé connu en tant que mise en forme de multiples peignes indépendants pour récupérer la trace de corrélation croisée. Une mise en forme de phase uniquement et le masque de correction de distorsion de phase sont utilisés pour produire une impulsion de référence TL, qui subit une corrélation croisée avec la forme d'onde déformée sur le cristal KDP pour obtenir les résultats attendus dans la partie principale de la figure 9. De plus, l'encart sur la figure 9 montre l'autocorrélation interférométrique attendue de l'impulsion laser après la présente compensation de MIIPS-S, indiquant que l'impulsion devrait être recompressée correctement malgré les oscillations de GDD introduites par le miroir diélectrique large bande.

La capacité des miroirs diélectriques multicouches à manipuler la phase d'impulsions ultra courtes a été utilisée pour concevoir des miroirs dits à dispersion contrôlée, en vue d'introduire une phase spectrale spécifique dans une impulsion laser de l'ordre de la femtoseconde. Un miroir à dispersion contrôlée exemplaire est présenté dans le brevet US n° 5 734 503 intitulé « Dispersive Dielectric Mirror » qui a été délivré à Szipocs et d'autres le 31 mars 1998. La conception de miroirs à dispersion contrôlée dépend dans une certaine mesure de la mesure de la dispersion du miroir fabriqué (ou du réseau de Bragg à fibres) et de l'étalonnage entre la fonction de phase de conception et la fonction de phase réelle mesurée. Les inventions présentées ici sont idéalement appropriées pour mesurer la dispersion de miroirs à dispersion contrôlée et pour étalonner leur conception et leur mise en

oeuvre. En outre, l'invention présentée ici peut être utilisée pour fournir des mesures de dispersion de certaines conceptions de laser dans la plage des femtosecondes et peut être utilisée pour prescrire une combinaison de miroirs à dispersion contrôlée afin de rendre la sortie du système de laser limitée en transformation. Ces mesures
 5 peuvent être effectuées pour compenser les distorsions de phase spectrale d'ordre élevé des lasers à fibres également. Le procédé de mesure de phase présenté ici peut également être utilisé pour compenser les distorsions de phase de l'optique en aval du laser comprenant des objectifs de microscope, des fibres optiques et d'autres optiques nécessaires pour des applications spécifiques. Les miroirs à dispersion contrôlée
 10 peuvent alors être conçus en fonction des mesures effectuées par ce procédé pour corriger les distorsions de phase et garantir la distribution d'impulsions limitées en transformation.

L'organigramme du logiciel de la figure 14 concerne les modes de réalisation actuellement préférés du présent système, et suppose que la pente est ajustée à
 15 chaque étape et suppose des itérations optionnelles. Dans un cas plus général, les itérations ne sont pas nécessaires, mais améliorent la mesure d'impulsion et la sortie de compensation d'une manière rapide et automatisée ; par exemple, en moins d'une minute pour six itérations.

La manière selon laquelle l'ordinateur détermine la dérivée première locale
 20 comprend l'entrée d'une valeur de phase constante dans l'un des faisceaux transmis et la recherche de la phase constante optimale, ou la modification de la pente de la phase pour l'un des faisceaux transmis et la recherche de la pente optimale. Cela peut être réalisé, en variante, en entrant une phase quadratique pour l'un des faisceaux transmis et en recherchant l'amplitude optimale pour la phase quadratique à chaque
 25 position.

Dans la version préférée du présent système, la phase de l'une des régions est modifiée par une fonction linéaire avec une pente. La pente est modifiée tandis que le système mesure un signal NLO qui résulte de la somme (ou de la différence) des fréquences dans la région mesurée et des fréquences dans une région désignée en tant
 30 que région de référence (généralement au centre du spectre où l'intensité est maximum). La figure 10 illustre cet autre spectre d'impulsion (montré par un trait noir plein), la phase inconnue (montrée par un trait en pointillés) et la phase mesurée (montrée par un trait fin) qui correspondent à la valeur négative de la phase introduite pour sa compensation.

35 L'organigramme du logiciel de la figure 13 est associé au premier autre mode de réalisation et suppose que la pente est ajustée à chaque étape (c'est-à-dire que la phase est ajustée, mais pas la pente de la phase) et il suppose des itérations optionnelles. Au lieu d'un SLM en phase et amplitude dans le plan de Fourier, il y a

une série de miroirs qui sont balayés manuellement ou par le programme d'ordinateur ; dans cet exemple, les miroirs sont inclinés selon l'angle (pente) souhaité. Pour obtenir l'équivalent des ouvertures T-split, des fentes physiques peuvent être utilisées ou les miroirs peuvent être placés en mosaïque de sorte qu'ils dévient la lumière dans une direction différente hors du trajet de faisceau (généralement la direction verticale).

Un deuxième autre mode de réalisation des système de laser et procédé présents nécessite une seule région spectrale (c'est-à-dire qu'aucune région spectrale de référence n'est nécessaire). Avec référence à la figure 12, la phase d'une région spectrale est modifiée par une fonction quadratique pour cette version. La courbure de la fonction est modifiée tandis que le système mesure le signal NLO total. Le spectre d'impulsion (montré par un trait noir plein), la phase inconnue (montrée par un trait en pointillés), et la phase mesurée (montrée par des traits fins et courts), sont illustrés. Ce procédé est similaire au premier autre mode de réalisation, excepté qu'une phase quadratique est utilisée et qu'aucune impulsion de référence n'est nécessaire.

Avec référence à la figure 15, les instructions logicielles pour ce deuxième autre mode de réalisation utilisent une seule fente (à titre de comparaison, deux fentes étaient utilisées pour les modes de réalisation préférés). La présente logique de logiciel suppose des itérations optionnelles. La mise en oeuvre de ce mode de réalisation exemplaire utilise un SLM en phase et amplitude dans une configuration de réflexion 4 fois, cependant, ce procédé peut être utilisé avec un SLM en phase uniquement ou avec un miroir déformable. Dans cette construction à titre d'exemple, il n'y a qu'une seule région de fente, mais il devrait y avoir une résolution suffisante pour définir une courbure (parabole) dans cette région.

Le programme d'ordinateur pour tous les modes de réalisation du présent document sélectionne automatiquement la région mesurée, ajuste la phase de la région spectrale mesurée, et trouve l'interférence intra-impulsion multiphoton constructive maximum (« MII ») sur la base de cette mesure. Le logiciel ajuste ensuite la phase de toutes les régions spectrales pour provoquer une MII maximum. Le programme élimine ainsi en grande partie, tout en mesurant, les distorsions de phase spectrale d'ordre élevé de la série d'impulsions. En option, le programme d'ordinateur peut itérer sur les mêmes régions spectrales ou il peut ajuster la plage des régions spectrales pour l'itération suivante, afin de produire une mesure plus fine. En option, le programme d'ordinateur peut délivrer une fonction qui est équivalente aux distorsions de phase qu'il a compensées. En outre, en option, le logiciel peut délivrer une durée d'impulsion, une phase spectrale mesurée, une phase

temporelle mesurée, et d'autres sorties de caractérisation d'impulsion complémentaire mesurée pour une analyse visuelle par l'opérateur.

Les système et procédé présents sont idéalement appropriés pour mesurer et/ou optimiser les distorsions optiques provoquées par des optiques à miroir diélectrique large bande multicouche. Il est également envisagé que les système et
5 procédé présents soient utilisés pour optimiser un laser à fibres dans la plage des femtosecondes sur la base des mesures obtenues. Par exemple, un fabricant de laser peut allonger, raccourcir ou autrement modifier une ou plusieurs fibres optiques dispersives en réponse aux mesures. En variante, l'intensité de la pompe laser et/ou
10 d'une optique à miroir déformable dans le dispositif d'extension ou dans le dispositif de compression peut être modifiée manuellement ou automatiquement (par une commande d'ordinateur) sur la base des mesures. Un tel miroir déformable est présenté dans la publication de demande internationale PCT n° WO 2009/086122 intitulée « Direct Ultrashort Laser System ».

Il est envisagé, en variante, qu'un blocage de transmission au niveau du
15 dispositif de mise en forme d'impulsion soit effectué avec un polariseur ou un cristal de SHG qui est sensible à la polarisation. Le polariseur peut être commandé automatiquement par l'ordinateur pour tourner la polarisation de parties indésirables du spectre vers un degré orthogonal à celui de l'impulsion d'entrée afin d'éliminer
20 essentiellement les parties indésirables qui ont une polarisation perpendiculaire ou d'éliminer leur contribution dans le signal non linéaire en utilisant une réponse non linéaire sensible à la polarisation. Il est connu en tant que forme d'exemple, que la SHG dépend de la polarisation du faisceau d'entrée par rapport aux axes du cristal non linéaire. En tant qu'autre variante, les parties indésirables de l'impulsion sont
25 diffractées hors du trajet de faisceau par une modulation haute fréquence d'un masque de phase. Au lieu d'imiter une modulation d'amplitude, une modulation de phase peut être utilisée pour supprimer la contribution dans le signal non linéaire des parties indésirables du spectre au moyen de leur interférence destructive. Une autre variante obtient une réponse d'une optique non linéaire d'un ordre supérieur à 1,5 par
30 rapport à une intensité crête du faisceau laser ; par exemple, la génération de deuxième ou de troisième harmonique. Une autre variante utilise une modulation de phase qui réduit la MII des parties spectrales indésirables, laquelle peut également sélectionner les parties transmises.

En référence à la figure 16, une configuration matérielle d'un autre mode de
35 réalisation comprend un oscillateur laser 221, un premier dispositif de mise en forme d'impulsion à SLM programmable 223, un amplificateur 225, un miroir de division 227, un deuxième dispositif de mise en forme d'impulsion à SLM programmable 229 et un détecteur à photodiode 243. Le premier dispositif de mise en forme 223 agit en

tant que dispositif de mise en forme de correction commandé automatiquement par des calculs logiciels d'un contrôleur informatique 245 qui sont basés sur les mesures provenant du deuxième dispositif de mise en forme 229. Le deuxième dispositif de mise en forme 229 et le détecteur 243 mesurent les impulsions séparées des impulsions principales par le miroir 227 dans ce qui peut être décrit comme un trajet de faisceau auxiliaire. Bien que ce mode de réalisation soit plus coûteux parce qu'il nécessite deux dispositifs de mise en forme d'impulsion commandés par ordinateur, il apporte, cependant, un avantage différent en ce que la sortie de faisceau principale est toujours disponible et optimisée sans interruption. Cela est avantageux pour toutes les applications de lasers ultra rapides où une optimisation au vol est souhaitée. La liste qui suit de ces applications est donnée en tant qu'exemple et n'est pas destinée à être exhaustive ou à limiter l'invention : des procédures chirurgicales, un usinage, une détection de serrage, une détection d'environnement, une détection à base de filament, une spectrométrie de masse à activation induite par laser, une imagerie à deux photons, et des applications de défense qui nécessitent que le laser soit prêt à tous moments. Ce mode de réalisation est également avantageux lorsque des faisceaux d'intensité très élevée sont compressés. La mesure, qui interrompt le trajet de faisceau auxiliaire, est effectuée par le deuxième dispositif de mise en forme d'impulsion 229. De plus, un dispositif de mise en forme peut être utilisé pour étalonner l'autre lors de l'utilisation du procédé préféré décrit ci-dessus.

En résumé, une approche préférée pour les système et procédé présents ajuste l'heure d'arrivée entre les faisceaux laser de différente fréquence qui sont formés en sélectionnant de multiples bandes spectrales par le dispositif de mise en forme d'impulsion. Le SLM est alimenté de sorte que tous les pixels à l'extérieur des fentes provoquent une transmission nulle (une modulation d'amplitude) ou atténuent la contribution de parties associées du spectre dans le signal non linéaire. Le contrôleur amène automatiquement le dispositif de mise en forme d'impulsion à laisser une bande spectrale fixe et balaye ou déplace la deuxième bande sur le spectre. Seule la lumière provenant de bandes spectrales de référence et balayées sélectionnées est autorisée à contribuer au signal non linéaire utilisé pour une rétroaction. Chaque bande spectrale correspond à une impulsion de lumière et le retard entre les deux impulsions est ajusté en introduisant une inclinaison dans la phase. La bande fixe fournit la référence, mais sans nécessiter une impulsion de faisceau laser divisé ou séparé. A chaque position, le dispositif de mise en forme d'impulsion programmable ajuste la phase de la région spectrale correspondant à la deuxième bande (de balayage) afin d'augmenter à un maximum un signal optique non linéaire. A la fin du balayage, les valeurs pour chaque section sont assemblées les unes aux autres ou combinées pour obtenir la dérivée première de la phase spectrale sur le spectre entier.

La phase est récupérée par une simple intégration de la dérivée première sur la fréquence. Le contrôleur utilise les instructions logicielles pour comparer automatiquement l'impulsion de bande balayée à l'impulsion de bande fixe qui agit en tant que référence. Le logiciel détermine de ce fait la distorsion de phase des impulsions en ajustant la pente de la phase locale de la région spectrale couverte par la deuxième bande et trouve le signal non linéaire maximum (par exemple, un signal à deux photons provenant de la photodiode). Cette procédure est répétée automatiquement pour les autres régions du spectre. Une fois que la phase spectrale a été obtenue, les distorsions de phase peuvent être éliminées optionnellement pour produire une impulsion compressée. En tant qu'autre option, ces étapes peuvent être itérées pour affiner l'élimination des distorsions de phase pour les impulsions suivantes. Il conviendrait de noter alternativement que le présent système peut être utilisé pour ne mesurer qu'une distorsion d'impulsion, telle qu'une distorsion de phase, ou utilisé à la fois pour mesurer et corriger les caractéristiques des impulsions.

La description qui précède des modes de réalisation a été fournie à des fins d'illustration et de description. Elle n'est pas destinée à être exhaustive ou à limiter l'invention. Les éléments ou les caractéristiques individuels d'un mode de réalisation particulier ne sont généralement pas limités à ce mode de réalisation particulier, mais, lorsque cela est applicable, sont interchangeables et peuvent être utilisés dans un mode de réalisation sélectionné, même si cela n'est pas spécifiquement montré ou décrit. Ceux-ci peuvent également être modifiés de nombreuses manières. Par exemple, l'intensité de l'absorption et de la luminescence à deux photons dans un cristal de ZnO, la SHG provenant de granules d'amidon, ou une autofluorescence à deux photons endogène d'un tissu biologique peuvent, en variante, être utilisées au lieu d'une conversion-élévation dans un cristal de SHG, en plus d'une diode à deux photons. La génération de troisième harmonique totale (THG) dans l'air peut également être utilisée pour fournir le signal optique non linéaire nécessaire.

En outre, bien que l'optique de dispersion préférée soit un réseau, il peut s'agir, en variante, d'un prisme, d'un prisme-réseau, d'un réseau de Bragg ou d'un réseau de fibres intégrées. Un SLM en amplitude a été présenté pour isoler les régions spectrales, cependant, des fentes physiques, des fibres, un réseau de miroirs MEMS capables de réfléchir l'impulsion hors de la mesure, un miroir déformable, ou un modulateur acousto-optique définissant les phases contiguës 0-B-0-B afin de provoquer une diffraction, ou définissant dans cette région une fonction linéaire ou parabolique très large, des matériaux avec une absorption pouvant être commandée peuvent, en variante, être utilisés, bien que divers avantages puissent ne pas être obtenus. La modulation d'amplitude peut être remplacée par une modulation de phase pure tant que cette dernière permet une suppression efficace de la contribution de

l'extérieur des fentes de balayage et de référence dans le signal non linéaire. De plus, le SLM a été présenté pour introduire une phase dans une région spectrale discrète, mais d'autres optiques comprennent des fibres, un réseau de miroir MEMS, un miroir déformable, un modulateur acousto-optique, un filtre diffractif programmable acousto-optique (de l'expression anglaise « *Acousto-Optic Programmable Diffractive Filter* », abrégée en « AOPDF »), ou un groupe de miroirs indépendants qui peuvent être déplacés de manière indépendante. En plus, une photodiode à deux photons a été présentée pour mesurer l'étendue de la MII dans une ou plusieurs régions spectrales de l'impulsion, cependant, d'autres détecteurs ou des optiques supplémentaires comprennent un cristal de SHG, une SHG de surface, une émission dans la plage des térahertz, une génération de troisième harmonique à partir d'un gaz, une fluorescence d'excitation à deux photons ou des procédés de production d'ions totale.

Des modes de réalisation ont été présentés dans le présent document, lesquels utilisent une ou deux fentes, ouvertures ou fenêtres, cependant, davantage de fentes, ouvertures ou fenêtres peuvent être utilisées bien que divers avantages puissent ne pas être obtenus. Il convient de noter que les termes « slit » et « T » ne sont pas destinés à indiquer une quelconque forme d'ouverture spécifique. Il est envisagé, en variante et de manière désavantageuse, qu'une mise en oeuvre manuelle par rapport à automatique de n'importe quelle partie des procédés présentés dans le présent document peut être effectuée par l'opérateur, mais cela ralentira le fonctionnement du système. Bien que des dimensions, des matériaux et des modèles matériels spécifiques aient été présentés, on devrait apprécier que d'autres peuvent être utilisés bien que certains des présents avantages puissent ne pas être obtenus. Néanmoins, ces changements, modifications ou variantes ne doivent pas être considérés comme s'écartant de l'étendue de l'invention.

REVENDICATIONS

1. Système de laser comprenant :

un laser émettant en fonctionnement des impulsions laser ;

5 un dispositif de mise en forme d'impulsion mettant en forme en fonctionnement les impulsions ;

un détecteur recevant en fonctionnement les impulsions mises en forme, le détecteur ayant une réponse optique non linéaire intégrée en fréquence ; et

10 un contrôleur amenant en fonctionnement le dispositif de mise en forme à sélectionner au moins une partie spectrale des impulsions à travers le dispositif de mise en forme, la partie spectrale étant inférieure à une moitié du spectre entier ;

le contrôleur, le détecteur et le dispositif de mise en forme mesurant en fonctionnement et corrigeant automatiquement une distorsion de phase indésirable dans au moins quelques unes des impulsions.

15

2. Système selon la revendication 1, comprenant en outre un microscope recevant au moins quelques unes des impulsions laser transmises à travers le dispositif de mise en forme d'impulsion.

20

3. Système selon la revendication 1 ou 2, dans lequel la partie spectrale de référence des impulsions laser, sélectionnée par le dispositif de mise en forme d'impulsion, agit en tant que référence à laquelle sont comparées par le contrôleur des parties spectrales balayées des impulsions laser, sélectionnées par au moins une zone mobile du dispositif de mise en forme d'impulsion.

25

4. Système selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, comprenant en outre des instructions logicielles dans le contrôleur compensant automatiquement les distorsions de phase mesurées en introduisant une phase correspondante qui annule les distorsions.

30

5. Système selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, comprenant en outre au moins une optique parmi : (a) un miroir diélectrique multicouche, et (b) un réseau de Bragg, située dans le trajet de faisceau ;

35 le contrôleur mesurant automatiquement la phase introduite par l'optique d'une manière calculée sans algorithme d'apprentissage génétique, et en collectant une

génération de deuxième harmonique uniquement de parties du spectre au lieu d'utiliser le spectre entier.

5 6. Système selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, dans lequel la sélection du dispositif de mise en forme de parties spectrales des impulsions à travers le dispositif de mise en forme comprend une transmission.

10 7. Système selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, dans lequel la sélection du dispositif de mise en forme de parties spectrales des impulsions à travers le dispositif de mise en forme comprend la mise en forme d'au moins l'une : (a) d'une phase, et (b) d'une polarisation, pour réduire une réponse non linéaire provenant de parties indésirables du spectre.

15 8. Système selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, dans lequel le détecteur est une photodiode avec une réponse optique non linéaire provoquée par les impulsions de sortie.

20 9. Système selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, comprenant en outre des instructions logicielles dans le contrôleur mesurant automatiquement une distorsion de phase dans les impulsions laser en déterminant une dérivée première locale d'une phase sur un spectre des impulsions.

25 10. Système selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, comprenant en outre des instructions logicielles dans le contrôleur répétant automatiquement des instructions de mesure et de compensation pour affiner la qualité des impulsions de sortie, une première itération permettant une élimination d'au moins 80 % des distorsions de phase.

30 11. Système selon l'une quelconque des revendications 1 à 10, dans lequel les impulsions laser ont chacune une durée inférieure à 1 picoseconde.

12. Système selon l'une quelconque des revendications 1 à 11, dans lequel les impulsions laser ont chacune une durée inférieure à 15 femtosecondes.

13. Système selon l'une quelconque des revendications 1 à 12, dans lequel les corrections de phase mesurées sur une partie de faible intensité d'une sortie de faisceau laser sont mises en oeuvre sur un deuxième dispositif de mise en forme d'impulsion programmable agissant sur le faisceau laser de sortie principal.

5

14. Logiciel informatique pour un système de laser, le logiciel comprenant :
un premier jeu d'instructions créant des fenêtres spectrales de sélection par le dispositif de mise en forme d'impulsion ;

un deuxième jeu d'instructions provoquant une réduction par le dispositif de mise en forme d'impulsion de parties spectrales d'au moins une impulsion laser dans les régions autres que celles sélectionnées à travers les fenêtres ;

10

un troisième jeu d'instructions établissant au moins l'une des fenêtres en tant que référence ;

15

un quatrième jeu d'instructions balayant les valeurs de phase dans au moins l'une des fenêtres ;

un cinquième jeu d'instructions enregistrant les valeurs provenant d'un détecteur capable de mesurer une réponse optique non linéaire à partir d'un faisceau de sortie ;

20

un sixième jeu d'instructions comparant les valeurs détectées en fonction des valeurs balayées ;

un septième jeu d'instructions déterminant la phase qui maximise la réponse du détecteur pour un ensemble donné de fenêtres ; et

un huitième jeu d'instructions rassemblant essentiellement toutes les valeurs et déterminant à partir des valeurs la distorsion de ladite au moins une impulsion.

25

15. Logiciel informatique selon la revendication 14, comprenant en outre un jeu d'instructions compensant la distorsion de phase.

30

16. Logiciel informatique selon la revendication 13 ou 14, comprenant en outre un jeu d'instructions amenant un laser à émettre ladite au moins une impulsion comprenant les fenêtres de référence et de balayage se déplaçant à la manière d'un faisceau unique entre le laser et le détecteur.

35

17. Logiciel informatique selon l'une quelconque des revendications 14 à 16, comprenant en outre un jeu d'instructions enregistrant le spectre de génération de

deuxième harmonique intégré en fréquence, dans lequel le détecteur comprend un cristal de génération de deuxième harmonique et un spectromètre.

5 18. Logiciel informatique selon l'une quelconque des revendications 14 à 17, dans lequel le détecteur est une photodiode, comprenant en outre un jeu d'instructions recevant les valeurs de mesure de spectre de la photodiode.

19. Procédé d'utilisation d'un laser, le procédé comprenant :
 (a) l'émission d'une impulsion de faisceau laser ;
 10 (b) la caractérisation de l'impulsion par l'isolement d'au moins deux bandes spectrales et le balayage d'au moins une bande en utilisant un dispositif de mise en forme d'impulsion programmable et en déterminant une dérivée première d'une phase sur un spectre entier de l'impulsion ; et
 (c) la mesure d'une réponse optique non linéaire en créant une référence interne
 15 dans l'impulsion et en balayant un retard entre les formes d'onde correspondantes.

20. Procédé selon la revendication 19, comprenant en outre la mesure d'un retard dépendant de la fréquence introduit par la réflexion de l'impulsion par un miroir diélectrique à large bande.

20 21. Procédé selon la revendication 19 ou 20, comprenant en outre la corrélation croisée entre des sous-bandes spectrales de l'impulsion en utilisant le dispositif de mise en forme d'impulsion programmable.

25 22. Procédé selon l'une quelconque des revendications 19 à 21, comprenant en outre le calcul automatique d'une distorsion de phase dans l'impulsion et la correction automatique de la distorsion de phase dans les impulsions suivantes dans les limites de moins de cinq itérations en moins de cinq minutes, dans lequel les impulsions ont chacune une durée inférieure à 1 picoseconde.

30 23. Procédé selon l'une quelconque des revendications 19 à 22, comprenant en outre à :
 la transmission d'une première bande spectrale de l'impulsion à travers une fente fixe du dispositif de mise en forme d'impulsion ;

la transmission d'une deuxième bande différente de l'impulsion à travers la fente de balayage ; et

le blocage du spectre restant de l'impulsion pendant l'opération de caractérisation en établissant la phase des pixels qui doivent être bloqués, de façon répétitive et alternée à des valeurs de zéro et de π et en limitant la résolution optique du dispositif de mise en forme d'impulsion.

24. Procédé selon l'une quelconque des revendications 19 à 23, comprenant en outre l'élimination en grande partie des parties spectrales indésirables par une polarisation.

25. Procédé selon l'une quelconque des revendications 19 à 24, comprenant en outre l'élimination en grande partie des parties spectrales indésirables par une manipulation d'amplitude.

26. Procédé selon l'une quelconque des revendications 19 à 25, comprenant en outre l'élimination en grande partie des parties spectrales indésirables par une manipulation de phase.

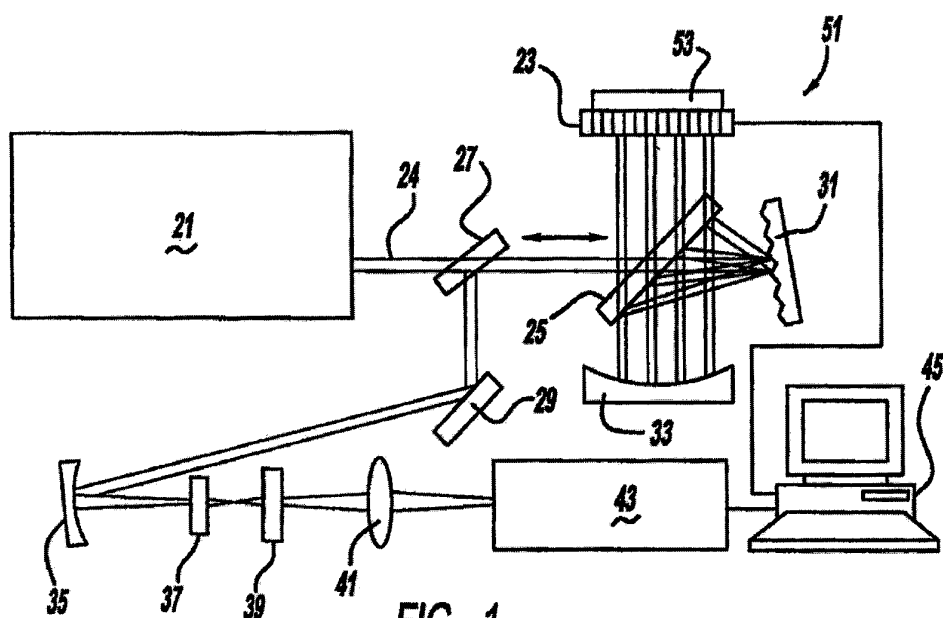
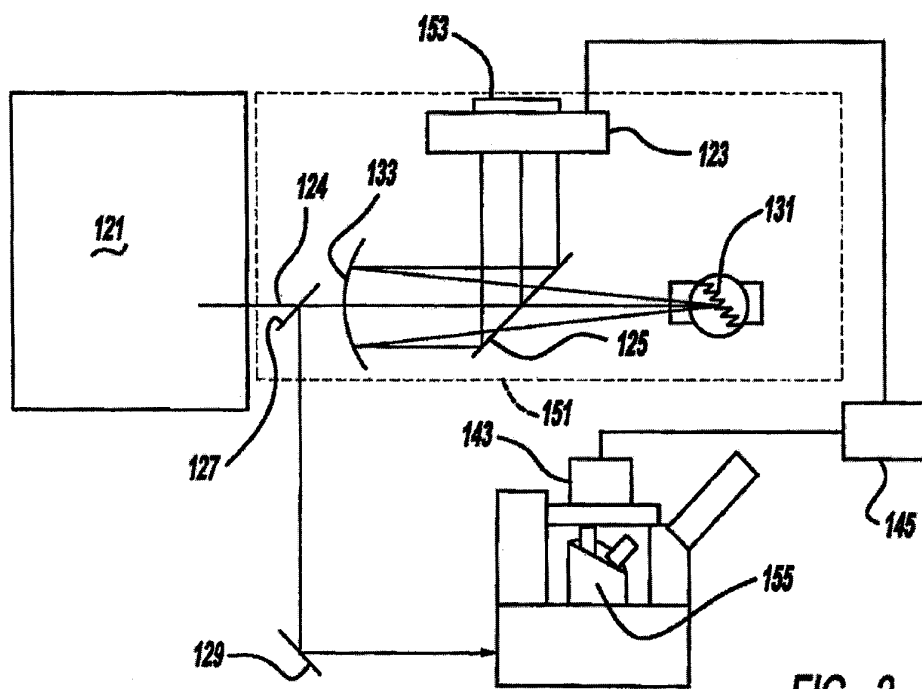
27. Procédé selon l'une quelconque des revendications 19 à 26, comprenant en outre l'optimisation d'un miroir diélectrique multicouche au moins en partie sur la base de la mesure.

28. Procédé selon l'une quelconque des revendications 19 à 27, comprenant en outre l'optimisation d'un laser à fibres au moins en partie sur la base de la mesure.

29. Procédé selon l'une quelconque des revendications 19 à 28, comprenant en outre l'ajustement d'un miroir déformable au moins en partie sur la base de la mesure.

30. Procédé selon l'une quelconque des revendications 19 à 29, comprenant en outre l'optimisation d'un réseau de Bragg au moins en partie sur la base de la mesure.

1/11

FIG - 1FIG - 2

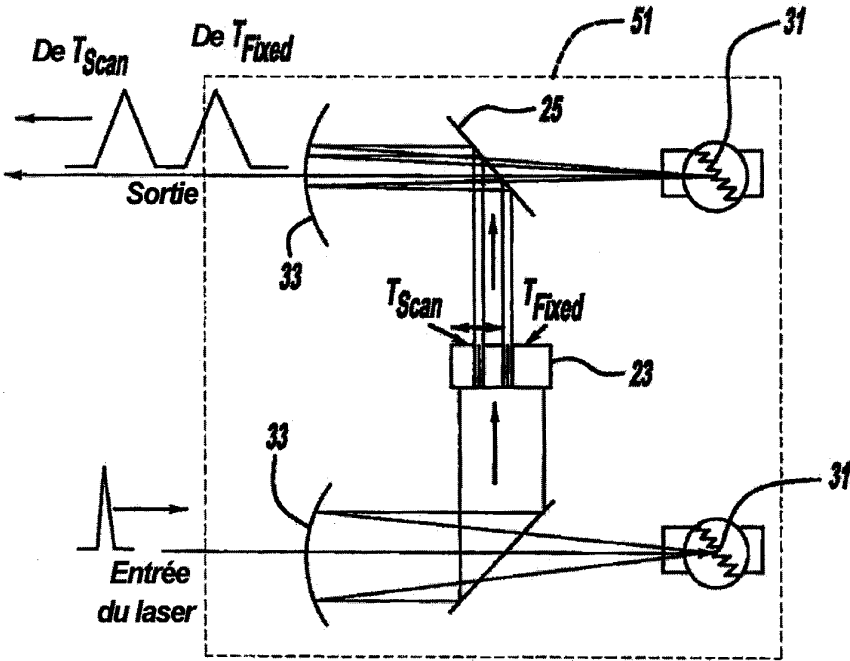


FIG - 3

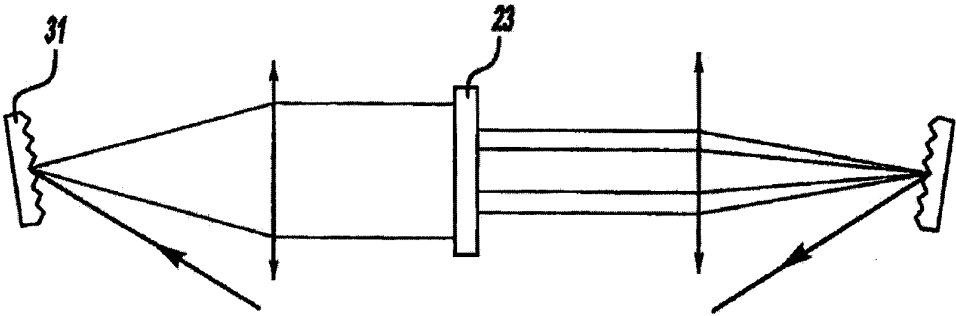
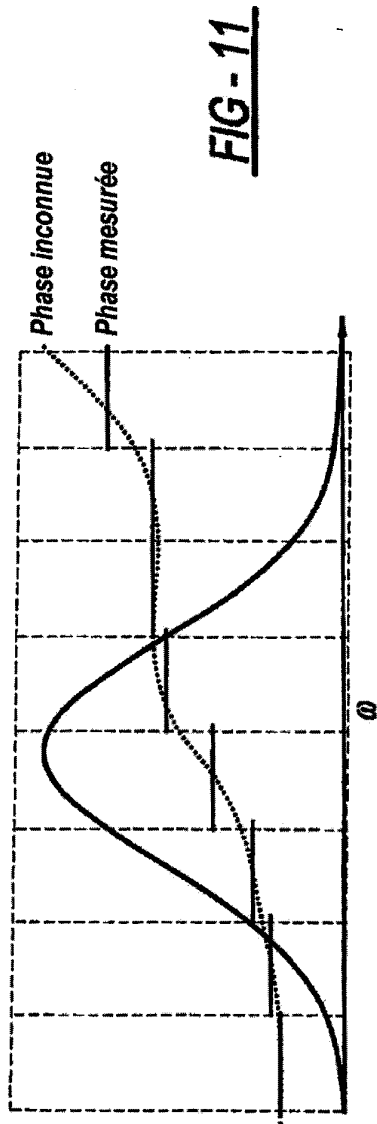
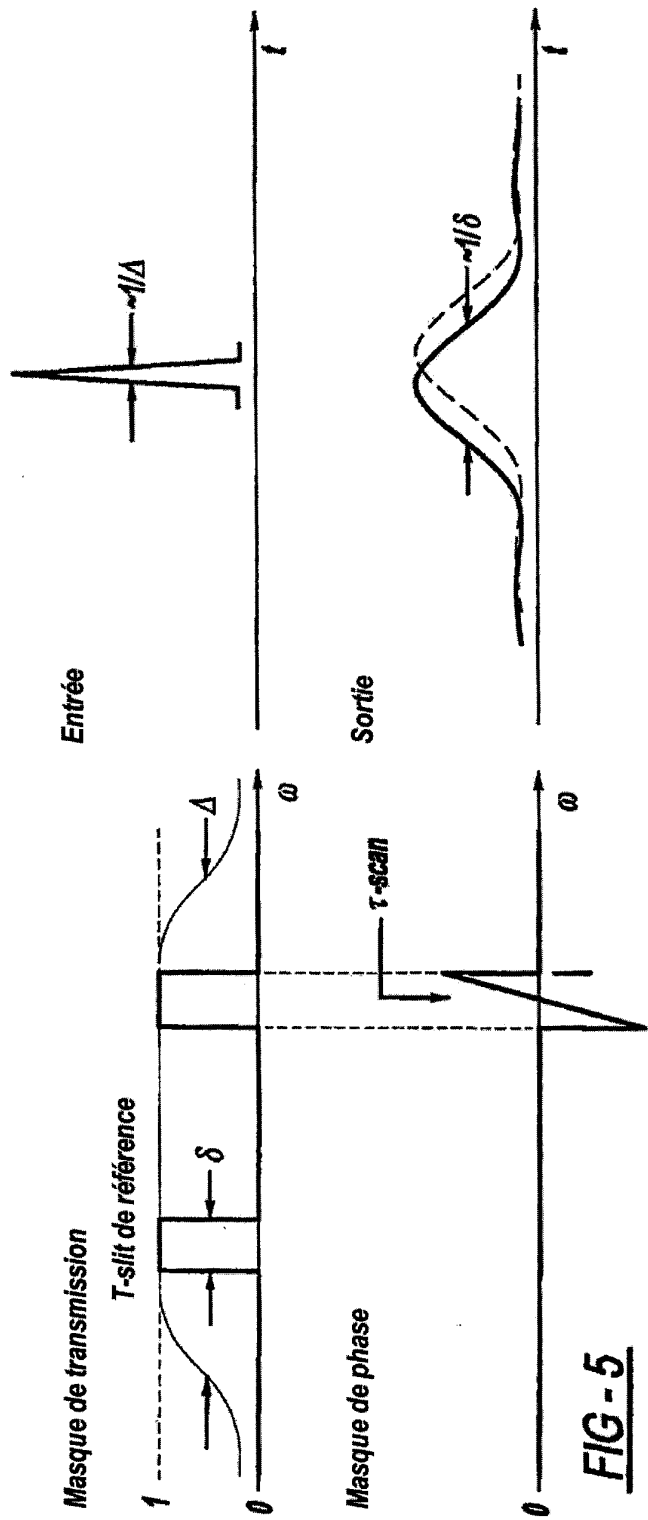
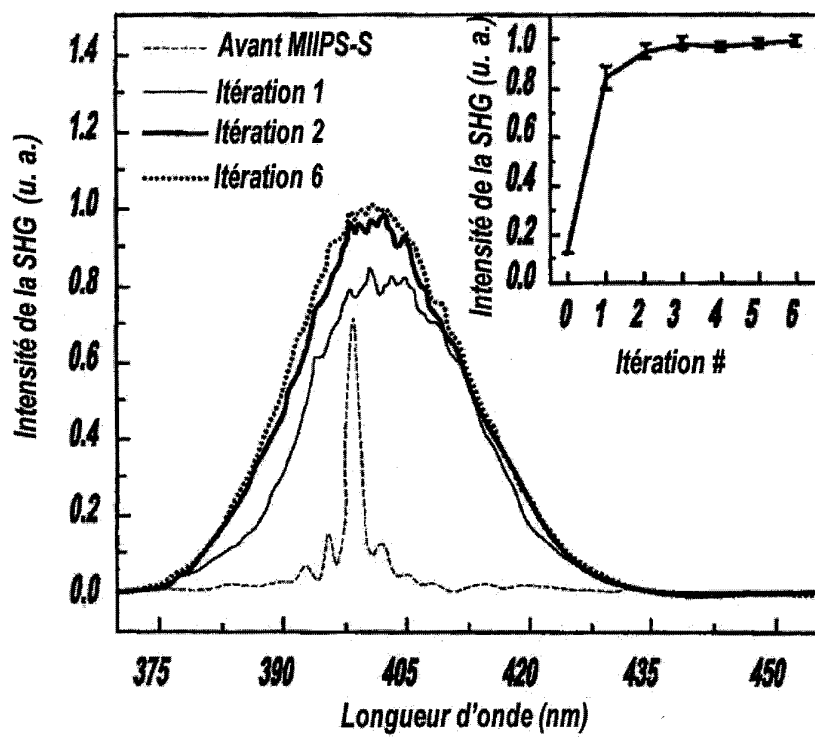
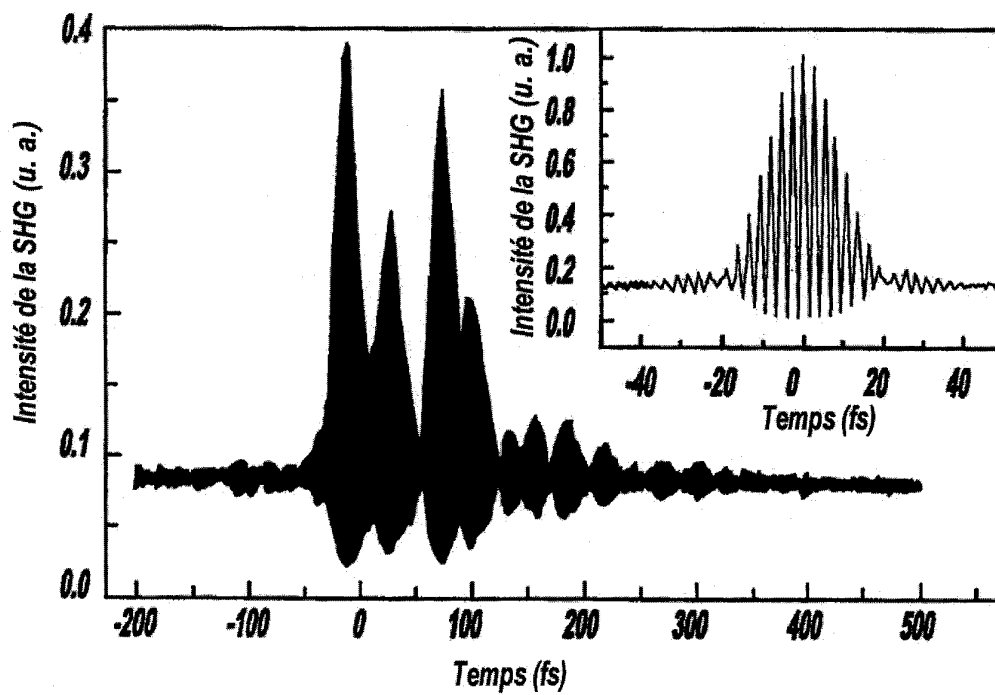


FIG - 4



4/11

FIG - 6FIG - 9

5/11

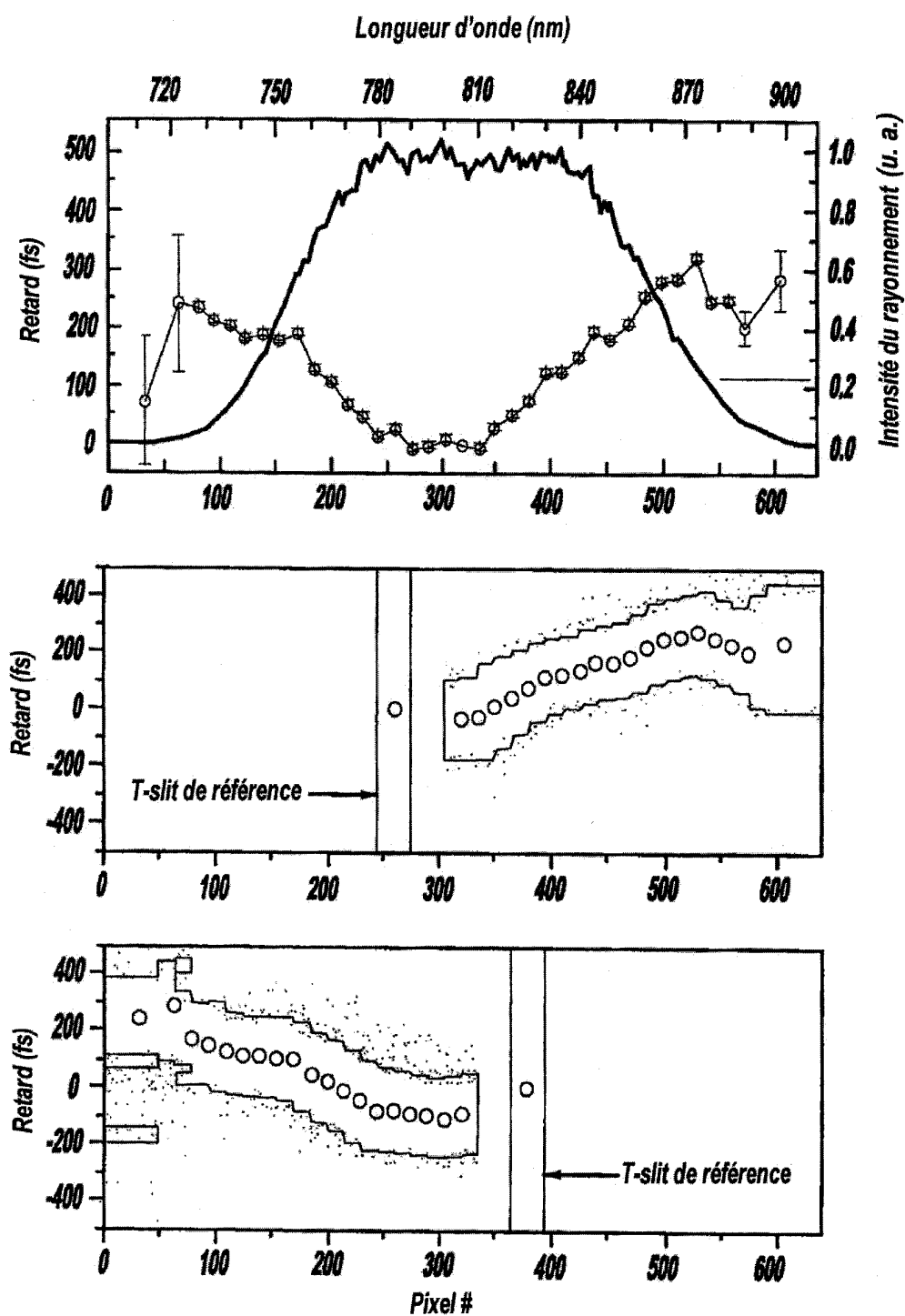
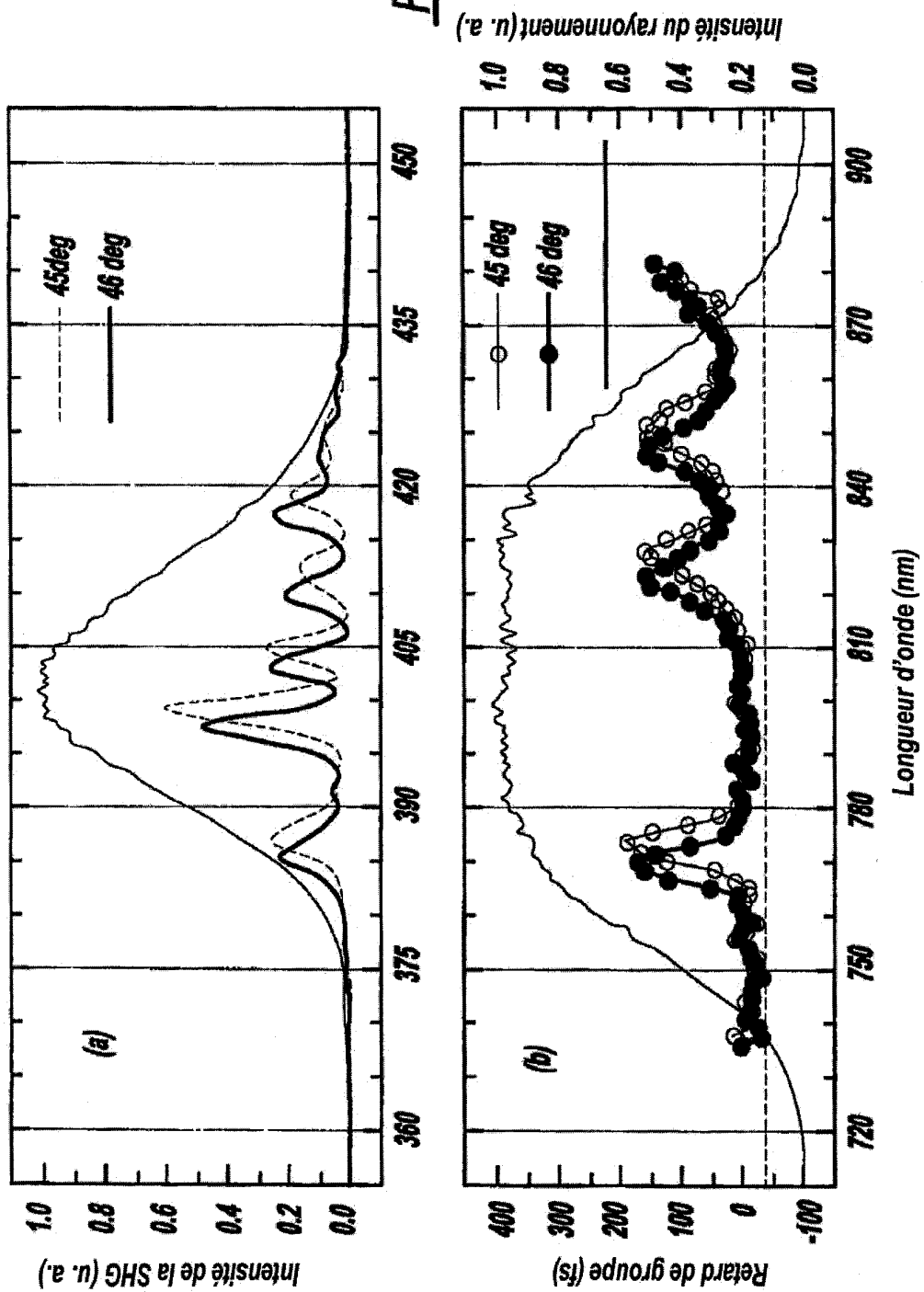
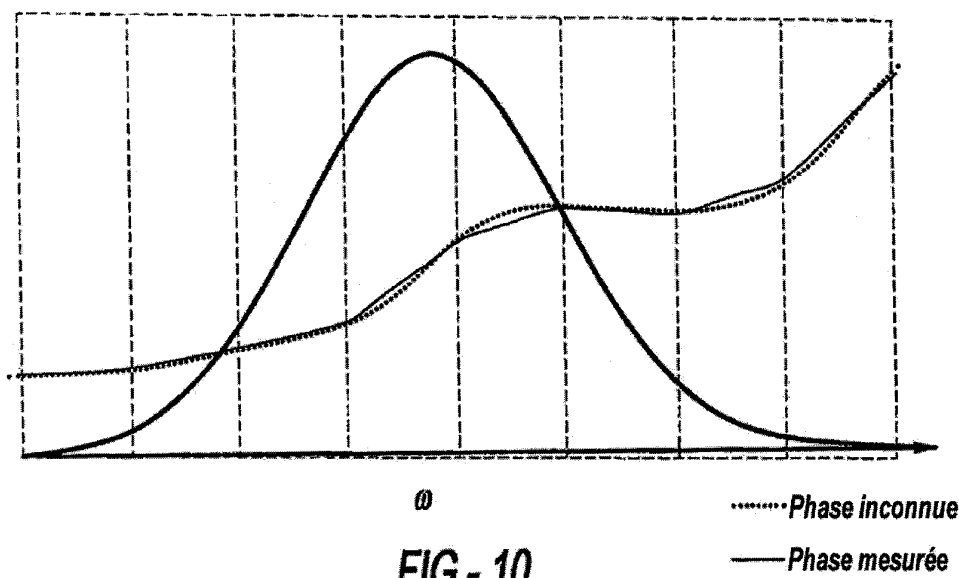
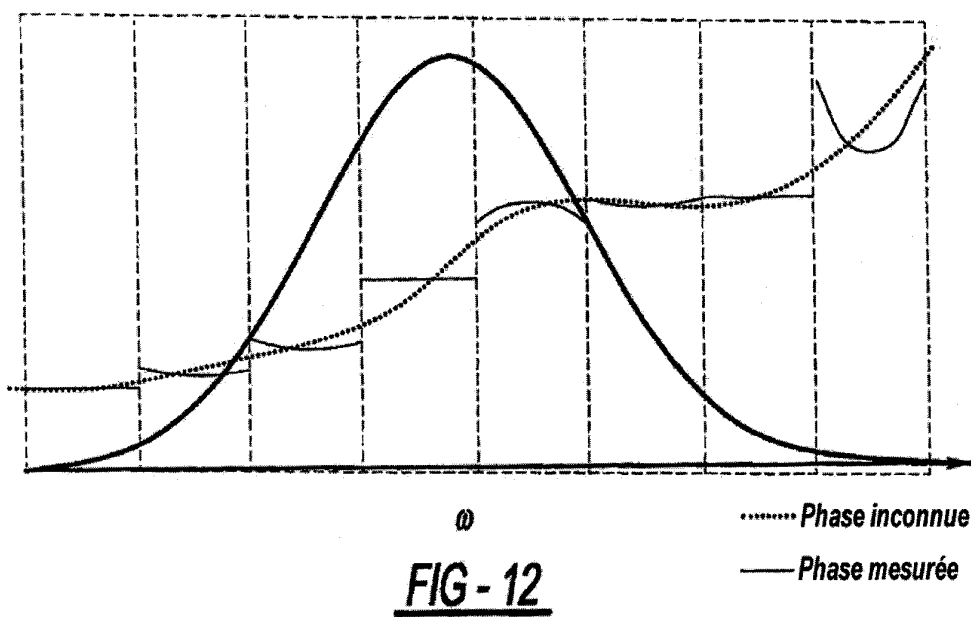
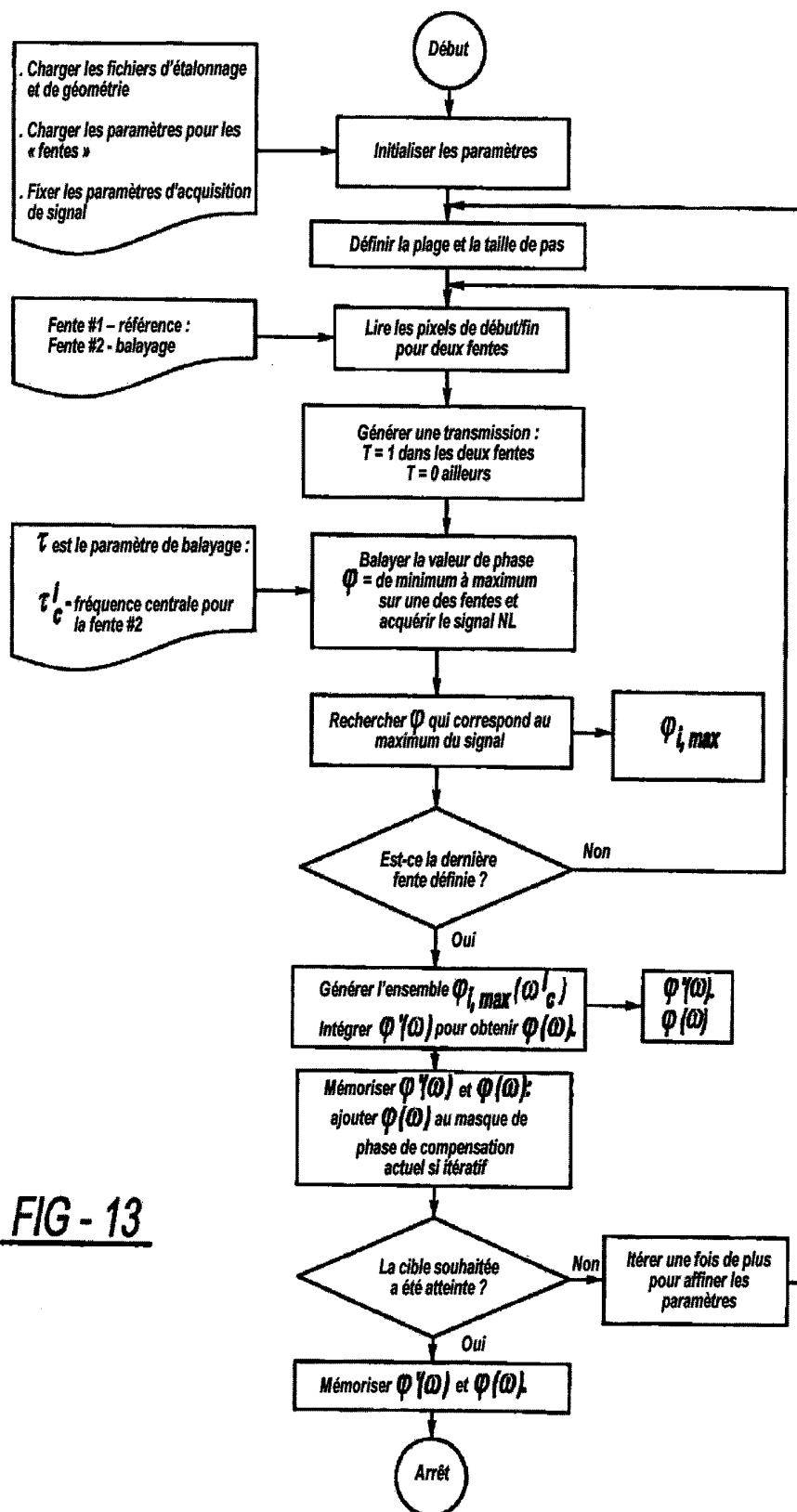
**FIG-7**

FIG - 8

7/11

FIG - 10FIG - 12

8/11



9/11

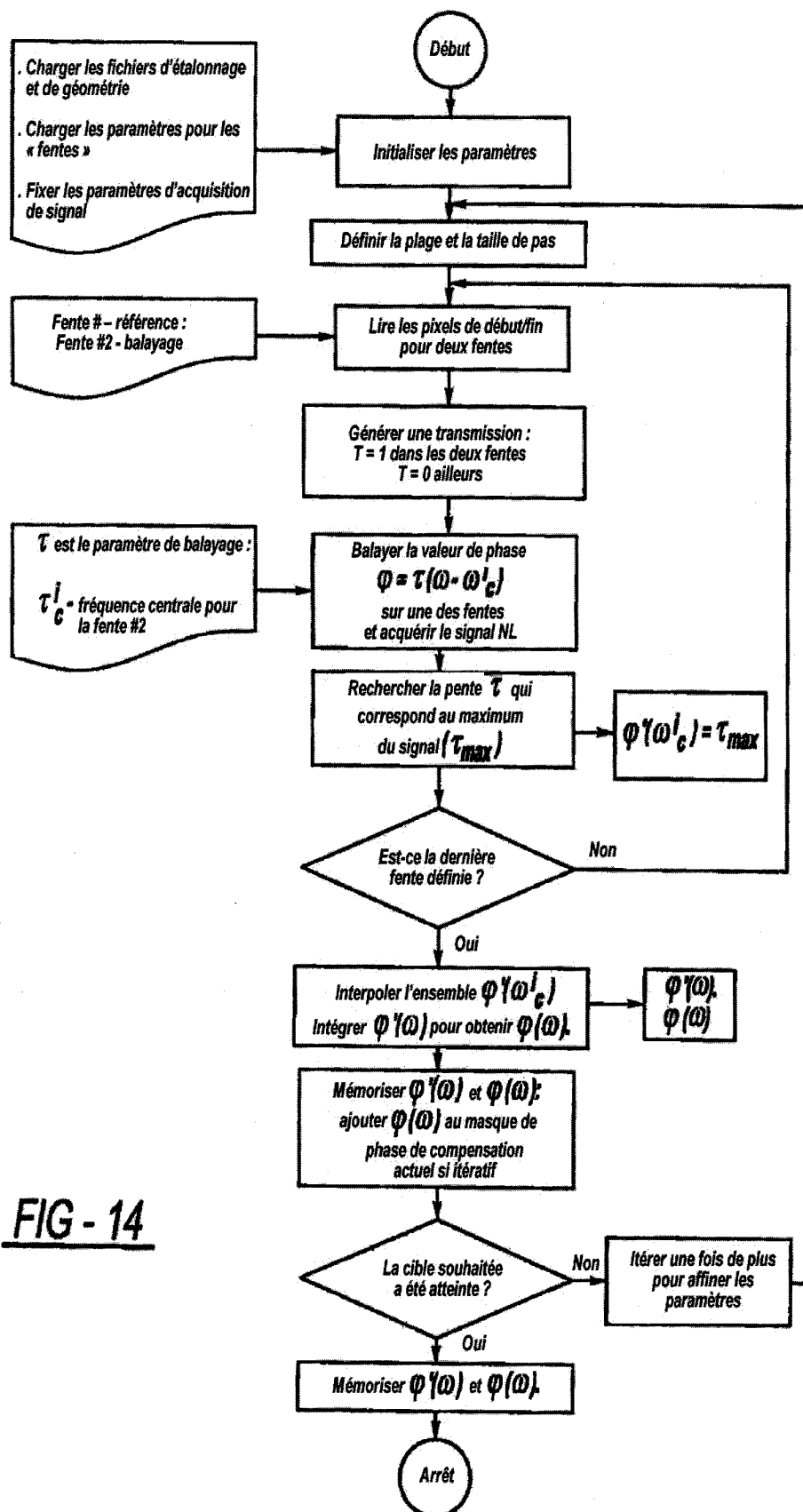


FIG - 14

10/11

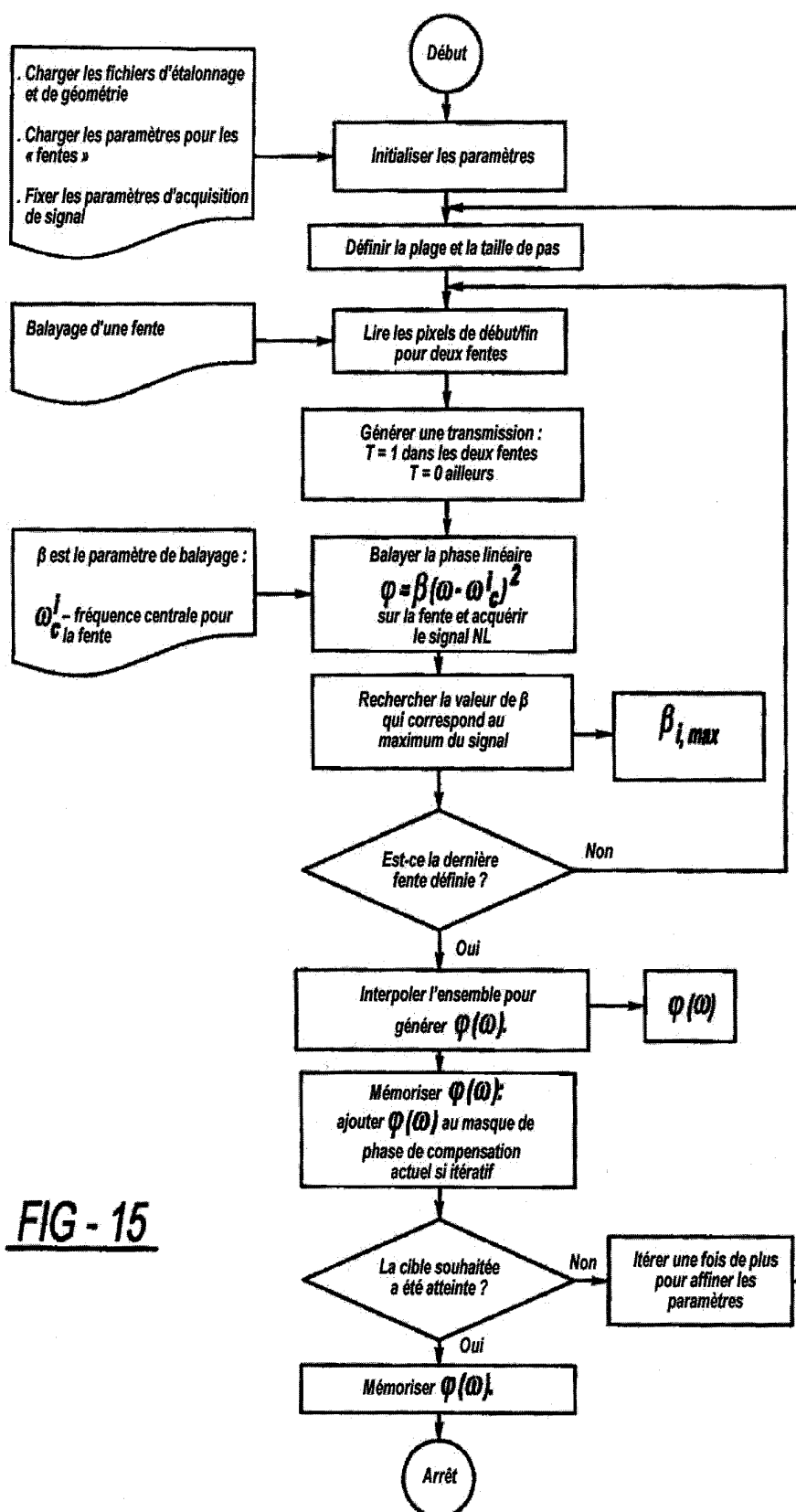
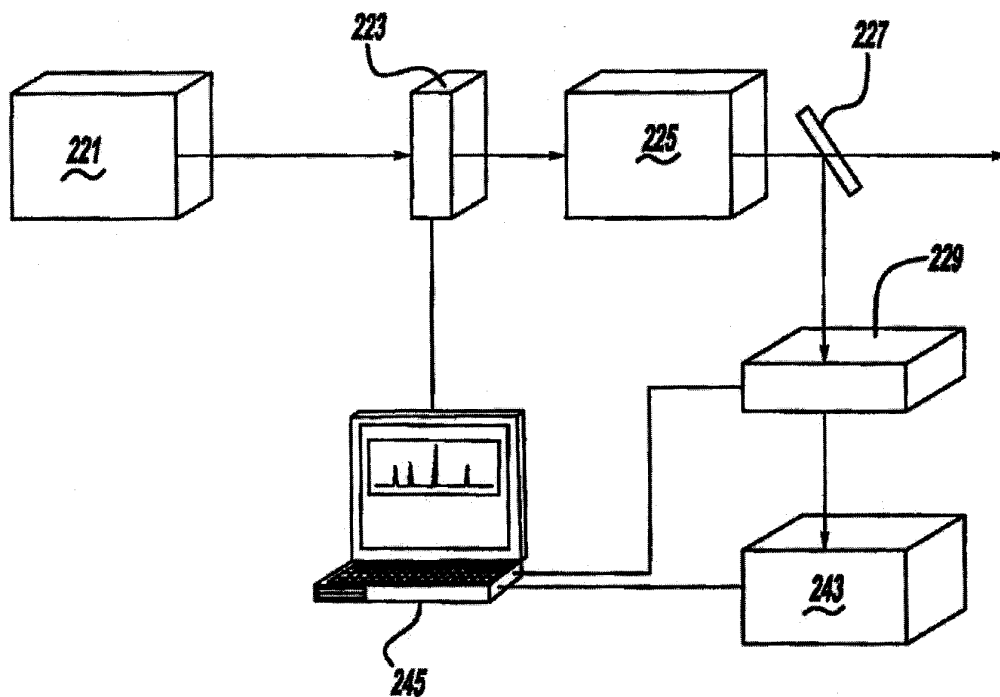
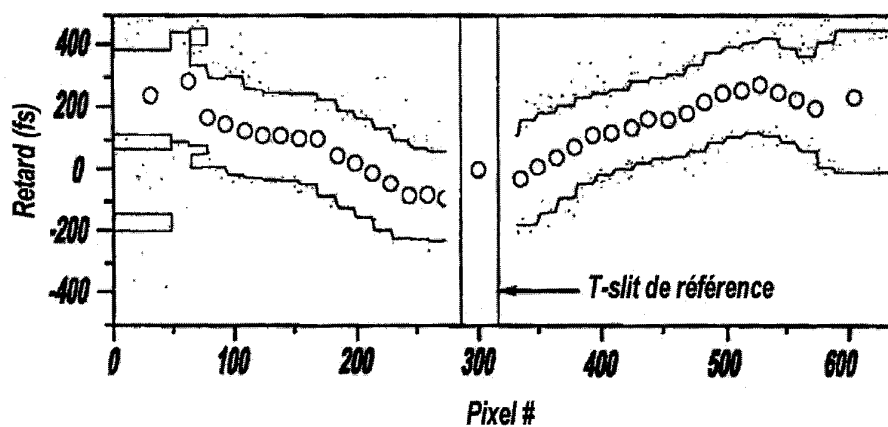


FIG - 15

11/11

FIG - 16FIG - 17