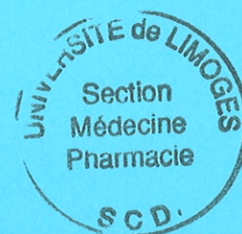


UNIVERSITE DE LIMOGES

FACULTE DE PHARMACIE



ANNEE 2007

THESE N° ~~374~~  
3324/1

**LES LASERS FEMTOSECONDES ET LEURS APPLICATIONS**

**THESE  
POUR LE DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN  
PHARMACIE**



présentée et soutenue publiquement  
le mercredi 27 juin 2007 à Limoges

par

Xavier SOUBRA

Né le 23 novembre 1981 à Châteauroux.

JURY

Président : Monsieur le Professeur DUROUX Jean Luc (Directeur de Thèse)

Juges : Monsieur LIAGRE Bertrand, Maître de Conférences  
Monsieur KHIYATI Younès, pharmacien

1.9.2006

# UNIVERSITE DE LIMOGES

\*\*\*\*\*

## FACULTE DE PHARMACIE

\*\*\*\*\*

DOYEN DE LA FACULTE : Monsieur le Professeur Gérard HABRIOUX

ASSESEUR : Madame le Professeur Dominique CHULIA

ASSESEUR : Monsieur Francis COMBY

### PROFESSEURS :

BENEYTOUT Jean-Louis	BIOCHIMIE et BIOLOGIE MOLECULAIRE
BOTINEAU Michel	BOTANIQUE ET CRYPTOGAME
BROSSARD Claude	PHARMACOTECHNIE
BUXERAUD Jacques	CHIMIE ORGANIQUE
	CHIMIE THERAPEUTIQUE
CARDOT Philippe	CHIMIE ANALYTIQUE
CHULIA Albert	PHARMACOGNOSIE
CHULIA Dominique	PHARMACOTECHNIE
DELAGE Christiane	CHIMIE GENERALE ET MINERALE
DESMOULIERE Alexis	PHYSIOLOGIE
DREYFUSS Gilles	PARASITOLOGIE-MYCOLOGIE
DUROUX Jean-Luc	PHYSIQUE-BIOPHYSIQUE
HABRIOUX Gérard	BIOCHIMIE FONDAMENTALE
LACHATRE Gérard	TOXICOLOGIE
MOESCH Christian	HYGIENE HYDROLOGIE
	ENVIRONNEMENT
OUDART Nicole	PHARMACODYNAMIE
ROGEZ Sylvie	BACTERIOLOGIE-VIROLOGIE

## MAITRES DE CONFERENCES

ALLAIS Daovy	PHARMACOGNOSIE
BASLY Jean-Philippe	CHIMIE ANALYTIQUE
BATTU Serge	CHIMIE ANALYTIQUE ET BROMATOLOGIE
CALLISTE Claude	BIOPHYSIQUE, MATHEMATIQUES, INFORMATIQUE
CARDI Patrice	PHYSIOLOGIE
CLEDAT Dominique	CHIMIE ANALYTIQUE
COMBY Francis	CHIMIE THERAPEUTIQUE
DELEBASSEE Sylvie	BACTERIOLOGIE-VIROLOGIE
DREYFUSS Marie-Françoise	CHIMIE ANALYTIQUE ET BROMATOLOGIE
FAGNERE Catherine	CHIMIE ORGANIQUE
FROISSARD Didier	BOTANIQUE ET CRYPTOGAME
JAMBUT Anne-Catherine	CHIMIE THERAPEUTIQUE
LARTIGUE Martine	PHARMACODYNAMIE
LIAGRE Bertrand	SCIENCES BIOLOGIQUES
LOTFI Hayat	TOXICOLOGIE
MARION-THORE Sandrine	CHIMIE THERAPEUTIQUE
MARRE-FOURNIER Françoise	BIOCHIMIE
MOREAU Jeanne	IMMUNOLOGIE
PARTOUCHE Christian	NEUROLOGIE, ENDOCRINOLOGIE
POUGET Christelle	PHARMACIE GALENIQUE
ROUSSEAU Annick	BIOMATHEMATIQUES
SIMON Alain	CHIMIE PHYSIQUE ET CHIMIE MINERALE
TROUILLAS Patrick	BIOMATHEMATIQUES ET INFORMATIQUE
	PHARMACEUTIQUE
VIANA Marylène	PHARMACOTECHNIE
VIGNOLES Philippe	BIOMATHEMATIQUES

**PROFESSEUR CERTIFIE :**

MARBOUTY Jean-Michel

ANGLAIS

**ATER A MI-TEMPS :**

BEGAUD-GRIMAUD Gaelle

See M.le Prof. BOTINEAU

COURTIOUX Bertrand

See M. le Prof. DREYFUSS

LE JEUNE Anne-Hélène

See M.le Prof. BOTINEAU

MOUSSEAU Yoanne

See M. les Prof. DREYFUSS et MOESCH

SAMARA Maha

See Mme le Prof. OUDART

YAHIAOUI Samir

See M. le Prof. BUXERAUD

# REMERCIEMENTS



*FIGURE REPRODUIT AVEC L'OBLIGEANCE DE LA NATIONAL FOOTBALL LEAGUE.*


MERCI à MONSIEUR DUROUX DE M'AVOIR DIRIGÉ DANS LE CHEMIN DES FUTURS THÈSES!!!

MERCI à MONSIEUR LIAGRÉ D'AVOIR ACCEPTER DE FAIRE PARTI DE MON JURY!

MERCI à MONSIEUR YOUNES D'AVOIR AUSSI ACCEPTER D'ÊTRE DANS MON JURY!

MERCI à MA ZUNA QUE J'AIME PLUS QUE TOUT ET QUI EST AUPRÈS DE MOI DEPUIS PLUS DE 6 ANS!

MERCI à TOUTE MA FAMILLE D'ÊTRE TOUJOURS LÀ POUR MOI QU'ELLE SOIT EN FRANCE, AUX USA, AU LIBAN OU DANS TOUT AUTRE PAYS!

JE TENAIS, DANS CE COURS INTERLUDE, À REMERCIER TOUTES LES PERSONNES PHYSIQUES PLUS DE 18 ANS QUI M'ONT ACCOMPAGNE DANS DES SOIREES DE DEBAUCHE DIGNE DU CAPITAINE JACK SPARROW. MALGRE LE PEU DE RHUM QUI COULA DURANT NOS NOMBREUSES AVENTURES, NOTRE BREUVAGE FÛT LA KOENIGSBIER 

DONC MERCI À TOUT L'EQUIPAGE QU'ON NOMMA LES ADLK (AMIS DE LA KOENIGS) ! JE ME PERMETS DONC DE LES CITER :

FLIBUSTIER ALEXANDRE ET SA COMPAGNE VIRGINIE  
FREEBOOTER FLORENT ET SA COMPAGNE GAELLE  
BOUCANIER JULIEN  
TIPIAK MARTIAL  
CORSAIRE PHILIPPE ET SA COMPAGNE MARIE LAURE  
BUCANEER THOMAS  
VRLJ BUTERS TONY ET SA COMPAGNE NATHALIE  
MAITRE DE TIMONERIE BERLIOZ  
MAITRE DE TIMONERIE DOC  
BOSCO GEOFFREY ET FANNY

MERCI AUSSI AUX AMIS DE TOUJOURS DU BERRY :

ALEX  
BRICE  
EDOUARD  
FRED  
JULIEN

MERCI AUX AMIS SI NOMBREUX DE LA FILIALE REPARTITION :  
FLORIAN LE. CAPTAIN HARLOCK PICARD !

MERCI AUSSI A VIOLAINE !

MERCI AUX AMIS DE LA PROMOTION PHARMA 2001 QUE J'AIME BIEN :  
NICOLAS, PIRATE A MOVING  
ARMAND NOTRE SHIFU  
YOUNES SOUFFRE DOULEUR DE AIR JORDAN  
PIERRE C. ET SA COMPAGNE LAURE  
MARIE EMILIE ET ARNAUD SON COMPAGNON

GAELE ET ANTOINE SON COMPAGNON  
ERIC UNIQUE REPARTITEUR DE LA PROMO  
BENEDICTE MAEVA JULIE  
RAPHAEL ET SA COMPAGNE HELENE  
LORIE  
MATHIEU F. AINSI QUE MATHIEU R.  
M. POKORA

SINON POUR LES AUTRES DE LA PROMOTION PHARMA 2001 QUE JE N'AI  
PAS CITE SUR CES DIFFERENTS PARAGRAPHERS. MERCI DE NE PAS ME  
RECONTACTER!

SAUF SI ERREURS DE MA PART 



*PERSONNAGE REPRESENTÉ AVEC L'OBLIGEANCE DE DISNEY*

**MERCI MICKEY !!!!!**

# PLAN

---

<b>INTRODUCTION</b>	<b>10</b>
HISTORIQUE :	10
<b>A. LE LASER FEMTOSECONDE</b>	<b>13</b>
1. QU'EST-CE QU'UN LASER ?	13
1.1. INTRODUCTION :	13
1.2. PRINCIPE DU LASER :	14
1.3. FONCTIONNEMENT D'UN LASER :	16
1.3.1. L'oscillateur laser :	16
1.3.2. La chaîne d'amplification :	18
1.4. DIFFERENTS TYPES DE LASER :	19
1.4.1. CRISTALLINS (A SOLIDE) :	19
1.4.2. À COLORANTS :	19
1.4.3. À GAZ :	19
1.4.4. À SEMI-CONDUCTEURS - DIODES LASER - VCSEL :	20
1.4.5. À ELECTRONS LIBRES (LEL) :	21
1.4.6. FIBRES :	22
2. LE LASER FEMTOSECONDE :	23
2.1. HISTORIQUE :	23
2.2. GENERALITES SUR LE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT :	24
2.3. ANALYSE D'UN LASER FEMTOSECONDE A COLORANTS :	26
2.3.1. L'oscillateur femtoseconde CPM à colorants :	26
2.3.2. L'amplificateur d'impulsions femtosecondes à colorants :	31
2.4. ANALYSE D'UN LASER FEMTOSECONDE SOLIDE (ANNEXE 1).	33
3. CONCLUSION :	33
<b>B. APPLICATION A LA CHIRURGIE REFRACTIVE</b>	<b>34</b>
1. L'OEIL HUMAIN ET LA CORNEE :	34
1.1. PHYSIOLOGIE DE L'OEIL HUMAIN ET DE LA CORNEE :	34
1.1.1. Anatomie :	34
1.1.2. La cornée :	38
a) Sa structure :	38
b) Son rôle optique :	39
1.1.3. L'œil et la vision :	41
1.1.4. Accommodation :	44
1.1.5. Anomalies de la vision :	45
1.2. CHIRURGIE REFRACTIVE :	48
1.2.1. La chirurgie de remodelage :	48
2. LE LASER FEMTOSECONDE EN CHIRURGIE REFRACTIVE :	51



2.1. GENERALITES :	51
2.2. UTILISATION EN OPHTALMOLOGIE :	53
2.2.1. Les lasers femtosecondes commerciaux :	53
2.2.2. BUTS DE LA TECHNIQUE :	55
2.2.3. REALISATION :	57
2.2.4. Avantages de la technologie femtolaser :	59
2.2.5. Inconvénients de la technologie femtolaser :	62
2.2.6. Nouveautés 2006 :	64
2.2.7. Le futur :	65
3. CONCLUSION :	67

## **C. APPLICATIONS A LA PHYSIQUE DE L'ATMOSPHERE** **68**

1. CONTEXTE :	68
2. LE TERAMOBILE :	71
2.1. GENERALITES :	71
2.2. LE SYSTEME :	71
3. LE LABORATOIRE MOBILE «TERAMOBILE» :	77
4. SYSTEMES DE DETECTION :	79
5. APPLICATION : VERS UN PARATONNERRE LASER ?	81
5.1. L'EFFET CHIRP :	82
5.2. L'ENERGIE D'IONISATION :	83
5.3. COMPARAISON : NATURE – TERAMOBILE :	83
5.4. ENJEUX ET LIMITES :	86
6. CONCLUSION :	87

## **CONCLUSION** **89**

## **BIBLIOGRAPHIES** **90**

## **ANNEXE 1** **97**

# INTRODUCTION

## Historique :



*Niels Bohr (1885-1962)*

« L'énergie emmagasinée par un atome ne peut prendre que certaines valeurs particulières formant une suite discontinue », telle est l'hypothèse formulée par le physicien Niels Bohr au début du siècle dernier afin d'expliquer le spectre de raies de l'onde électromagnétique émise par un atome soumis à une excitation.

Au début du XX<sup>ème</sup> siècle, les connaissances scientifiques conduisaient à une représentation assez précise de la structure de la matière. Le siècle précédent avait donné naissance à l'hypothèse moléculaire à partir des lois quantitatives de la chimie (Dalton, Avogadro), puis à l'électron grâce aux expériences de Jean Perrin. Parallèlement, la structure de l'atome se dévoilait progressivement et aboutit à la découverte des ions positifs et des isotopes (J.-J. Thomson), qui ont permis l'introduction du numéro atomique  $Z$  (ordre de classement dans le tableau périodique des éléments) et du nombre de masse  $A$  d'un atome.

Durant la première décennie du XX<sup>ème</sup> siècle, Hertz et Maxwell ont participé au développement tant expérimental que théorique de l'électromagnétisme. La théorie électromagnétique permettait de rendre compte de l'ensemble des phénomènes de l'optique ondulatoire et de l'optique géométrique. Afin d'expliquer également les processus liés à la structure microscopique de la matière, un lien fut établi entre le modèle de l'atome de Thomson (les électrons sont élastiquement liés au noyau) et la théorie électromagnétique. Le résultat permis d'interpréter de manière satisfaisante les expériences d'interaction entre un champ électromagnétique et un atome comme la diffusion du rayonnement par un atome

(diffusion Thomson, diffusion Rayleigh) ou les phénomènes d'absorption (bandes d'absorption correspondant à des fréquences de résonances liées au mouvement de l'électron). En revanche, le phénomène pourtant fondamental de l'émission de rayonnement électromagnétique demeurait sans explication convaincante.

La décennie suivante fut marquée par l'abandon du modèle de l'atome de Thomson suite aux expériences de déviation de particules  $\alpha$  menées par Rutherford en 1911, ce qui ouvrit la voie au modèle de l'atome d'hydrogène de Bohr issue de la balbutiante théorie quantique. Le développement de cette dernière fut ponctué par les travaux de Planck et de Louis de Broglie, et par les débats tumultueux désormais célèbres entre Bohr et Einstein. La théorie quantique a permis d'expliquer les phénomènes d'émission de rayonnement électromagnétique par l'introduction de la quantification des niveaux énergétiques de l'atome. À l'origine, la première idée de quantification avait été introduite par le physicien allemand Planck en 1900 pour expliquer la forme du spectre du rayonnement électromagnétique issu d'un four élevé à une certaine température. Le spectre continu issu d'une source thermique (à présent décrit par la loi de Planck) et le spectre de raies issu de sources lumineuses à décharge (expliqués par la structure des niveaux d'énergie des atomes ionisés issue de la théorie quantique) furent ainsi expliqués. Désormais, la dualité onde-corpuscule introduite par la théorie quantique permettait de caractériser la lumière à la fois par sa nature ondulatoire (« onde électromagnétique », propagation, diffraction) et par sa nature corpusculaire (« photon », énergie, quantité de mouvement). Dès 1917, Albert Einstein décrit le principe de l'émission stimulée (ou émission induite). En 1950, Alfred Kastler (Prix Nobel de Physique en 1966) propose un procédé de pompage optique, qui a été validé expérimentalement par Brossel, Kastler et Winter deux ans plus tard. Mais ce n'est qu'en 1953 que le premier maser<sup>1</sup> (maser au gaz ammoniac) est conçu par J. P. Gordon, H. J. Zeiger et Ch. H. Townes.

---

<sup>1</sup> Maser : (*Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) est un dispositif permettant d'émettre un faisceau cohérent de micro-ondes. Les masers sont utilisés notamment en interférométrie et en métrologie. Ils servent également à obtenir la fréquence de référence utilisée dans les horloges atomiques.



*Charles Townes (1915-)*

Au cours des six années suivantes, de nombreux scientifiques tels N. G. Bassov, A. M. Prokhorov, A. L. Schawlow et Ch. H. Townes contribuent à adapter ces théories aux longueurs d'ondes du visible. Townes, Basov, et Prokhorov partagèrent le Prix Nobel de Physique en 1964 pour leurs travaux fondamentaux dans le domaine de l'électronique quantique, qui ont mené à la construction d'oscillateurs et d'amplificateurs basés sur le principe du Maser-Laser. En 1960, le physicien américain Théodore Maiman obtient pour la première fois une émission laser au moyen d'un cristal de rubis. Un an plus tard, Ali Javan met au point un laser au gaz (hélium et néon) puis en 1966, Peter Sorokin construit le premier laser à liquide.

L'une des toutes premières applications industrielles du laser, réalisée en 1965 par un laser à rubis, consistait à usiner un perçage de 4.7 mm de diamètre et de 2 mm de profondeur dans du diamant. Cette opération était réalisée en 15 min, alors qu'une application classique prenait 24 heures.

En 1967, Peter Houlcroft découpe 2,5 mm d'acier inoxydable à une vitesse de 1m/min, sous di-oxygène avec un laser CO<sub>2</sub> de 300 W<sup>2</sup> et conçoit la première tête de découpe. Dans la même période en 1963 des chercheurs américains tel que White et Anderholm montre qu'il est possible de générer une onde choc à l'intérieur d'un métal suite à une irradiation laser impulsionnelle. Les pressions exercées sont de l'ordre de 1 GPa. Bien que les procédés soient démontrés, il faut attendre leurs associations à des machines adaptées pour qu'ils soient implantés en milieu industriel. Ces conditions sont remplies à la fin des années 70. Et les premières plates formes industrielles sont implantées en France dès les années 80.

Le laser devient un moyen de lecture en 1974, avec l'introduction des lecteurs de codes barres. En 1978, les *Laserdiscs* sont introduits, mais les disques optiques ne deviennent d'usage courant qu'en 1982 avec le disque compact.

# A. Le Laser femtoseconde

## 1. Qu'est-ce qu'un laser ?

### 1.1. Introduction :

L'effet laser est un principe d'amplification cohérente de la lumière par émission stimulée. C'est l'acronyme anglais de « *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* » (en français, « amplification de la lumière par émission stimulée de radiations »).

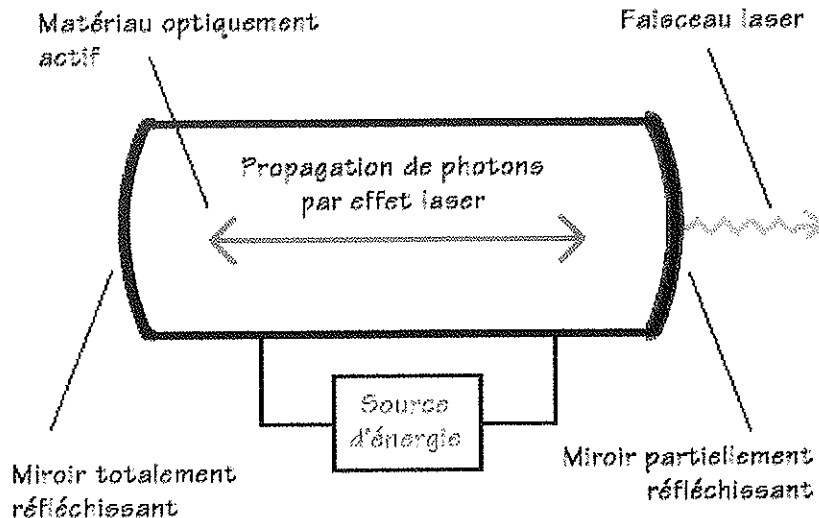
La plupart des amplificateurs optiques sont basés sur l'effet laser. Une source laser est une source de lumière spatialement et temporellement cohérente basée sur l'effet laser.

Une source laser associe un amplificateur optique basé sur l'effet laser à une cavité optique, encore appelée résonateur, généralement constituée de deux miroirs, dont au moins l'un des deux est partiellement réfléchissant, c'est-à-dire qu'une partie de la lumière sort de la cavité et l'autre partie est réinjectée vers l'intérieur de la cavité laser. Les caractéristiques géométriques de cet ensemble imposent que le faisceau émis soit généralement peu divergent, c'est à dire spatialement cohérent. Avec certaines longues cavités, la lumière laser peut être extrêmement directionnelle. Les caractéristiques géométriques de cet ensemble imposent également que le rayonnement émis soit d'une grande pureté spectrale, c'est à dire temporellement cohérent. Le spectre du rayonnement contient en effet un ensemble discret de raies très fines, à des longueurs d'ondes définies par la cavité et le milieu amplificateur. La finesse de ces raies est cependant limitée par la stabilité de la cavité et par l'émission spontanée au sein de l'amplificateur (bruit quantique). Différentes techniques permettent d'obtenir une émission autour d'une seule longueur d'onde.

Au XXI<sup>ème</sup> siècle, le laser est plus généralement vu comme un amplificateur de tout rayonnement électromagnétique, dont fait partie la lumière visible. Les longueurs d'ondes concernées étaient d'abord les micro-ondes (voir définition du maser), puis elles se sont étendues aux domaines de l'infrarouge, du visible, de l'ultraviolet et on commence même à les appliquer aux rayons X.

## 1.2. Principe du laser :

### Schéma de principe d'un laser



Pour comprendre comment fonctionne un laser, il est nécessaire d'introduire le concept de quantification de la matière : les électrons sont répartis sur des niveaux d'énergie discrets (les « couches »). Cette hypothèse est *fondamentale* et *non intuitive* : si on considère l'image selon laquelle les électrons orbitent autour du noyau, cela revient à dire qu'ils ne peuvent se trouver que sur certaines orbites bien précises.

Dans la suite, on considérera un atome ne possédant qu'un électron, pour simplifier la discussion. Celui-ci est susceptible de se trouver sur plusieurs niveaux. La connaissance du niveau sur lequel se trouve cet électron définit l'état de l'atome. Ces états sont numérotés par ordre croissant d'énergie avec un nombre entier  $n$ , pouvant prendre les valeurs 1, 2, ... L'état  $n = 1$  est donc l'état d'énergie la plus basse, correspondant à un électron sur l'« orbite » la plus proche du noyau.

Il n'est pas indispensable de quantifier la lumière (c'est-à-dire de parler de *photon*) pour expliquer qualitativement le fonctionnement d'un laser, même si cela s'avère indispensable pour expliquer le concept d'émission spontanée. Nous parlerons quand même de photons lorsque cela fournit une image facilitant la compréhension des concepts évoqués.

Venons-en aux principaux processus d'interaction entre la lumière et la matière, à savoir l'absorption, l'émission *stimulée* et l'émission *spontanée*.

- **L'absorption :**

Lorsqu'il est « éclairé » par un rayonnement électromagnétique (la lumière), un atome peut passer d'un état  $n$  à un état  $n' > n$ , en prélevant l'énergie correspondante sur le rayonnement. Ce processus est *résonnant* : la fréquence du rayonnement doit être proche d'une *fréquence de Bohr atomique* pour qu'il puisse se produire. Les fréquences de Bohr atomiques sont définies par  $h\nu = \Delta E$ , où  $h$  est la constante de Planck ( $6,626 \cdot 10^{-34}$  J.s),  $\Delta E$  la différence de niveau d'énergie entre l'état excité  $n'$  et normal  $n$  de l'atome et  $\nu$  la fréquence du rayonnement incident. On peut interpréter ce processus comme l'absorption d'un photon du rayonnement (d'énergie  $h\nu$ ) faisant passer l'atome du niveau d'énergie  $E_n$  vers le niveau d'énergie  $E_{n'}$ . La condition de résonance correspond alors à la conservation de l'énergie.

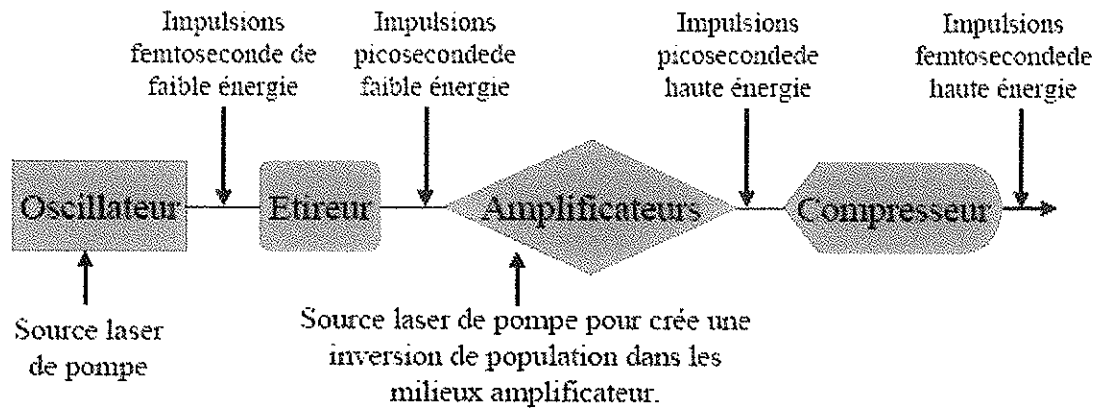
- **L'émission stimulée :**

Ce processus est le symétrique du précédent : un atome dans l'état  $n'$  peut se désexciter vers le niveau  $n$  sous l'effet d'une onde électromagnétique, qui sera alors *amplifiée*. Comme pour l'absorption, ce processus n'est important que si la fréquence du rayonnement incident  $\nu$  est proche de la fréquence de Bohr  $\nu_{nn'}$ . On peut l'interpréter comme l'émission d'un photon d'énergie  $h\nu$  qui vient s'« ajouter » au rayonnement (ce photon ayant les mêmes caractéristiques que le photon incident).

- **L'émission spontanée :**

Un atome dans un état excité  $n'$  peut se désexciter vers un état  $n$ , même en l'absence de rayonnement. Le rayonnement est émis dans une direction aléatoire, et sa fréquence est égale à la fréquence de Bohr  $\nu_{nn'}$ . On peut interpréter ce processus comme l'émission d'un photon d'énergie  $h\nu$  dans une direction aléatoire.

## 1.3. Fonctionnement d'un laser :



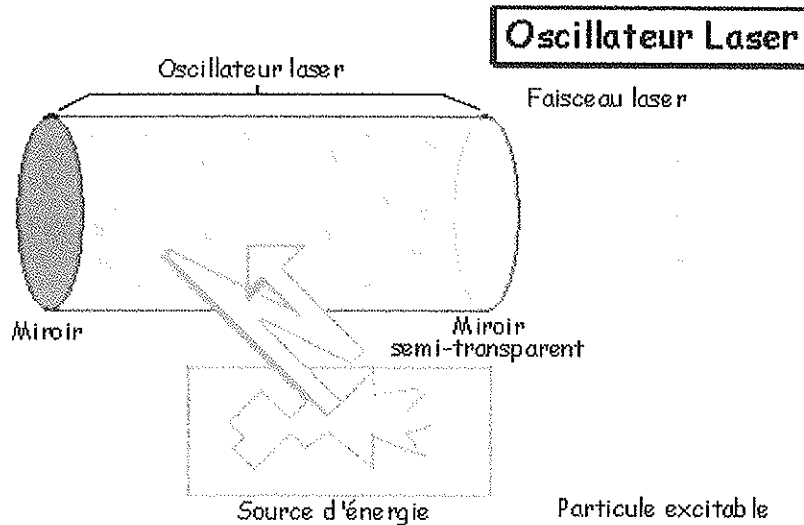
*Schéma du principe laser*

### 1.3.1.L'oscillateur laser :

Pour fabriquer la lumière laser, il faut un oscillateur laser et une source d'énergie. L'oscillateur est une sorte de boîte en forme de cylindre allongé avec, à chacune de ses extrémités, un miroir. Il contient le milieu laser : particules excitées (atomes, ions ou molécules) se trouvant sous forme de solide, de liquide ou de gaz. Le rubis est par exemple un milieu laser solide souvent utilisé. Les particules excitées y sont les ions chrome.

La source d'énergie fournit assez d'énergie aux particules pour obtenir une inversion de population (plus de particules excitées que de particules non excitées). L'énergie absorbée par les particules du milieu laser pourra être potentiellement libérée sous forme de lumière. La source d'énergie peut être de différents types : lumineuse, électrique ou chimique, par exemple.





*Schéma d'un oscillateur laser*

L'oscillateur laser va servir à produire la lumière. Imaginons un photon émis spontanément dans le milieu laser dont la trajectoire est perpendiculaire aux plans des miroirs. En rencontrant une particule excitée, il va stimuler la libération d'un deuxième photon.

Les deux photons identiques peuvent à leur tour stimuler d'autres libérations de photons et ainsi de suite, jusqu'à ce que le groupe de photons rencontre le miroir. Leur trajectoire étant perpendiculaire au plan de celui-ci, ils seront renvoyés strictement en sens inverse et continueront de nouveau à provoquer des émissions stimulées. Un peu comme dans une réaction en chaîne, le nombre des photons identiques qui vont et viennent entre les miroirs va donc augmenter à chaque passage : c'est la première amplification de la lumière laser.

Pour que le faisceau laser sorte de l'oscillateur laser, l'un des deux miroirs est semi-transparent : une partie de la lumière n'est pas réfléchiée par le miroir, elle traverse le miroir comme s'il était transparent. Lorsque la source d'énergie excite en continu les particules du milieu laser, l'oscillateur produit de la lumière laser en continu. Après une rapide phase de mise en route, le rayon sortant garde une puissance constante. Si la source d'énergie envoie par intermittence une décharge d'énergie dans l'oscillateur, la lumière laser est produite de manière discontinue, par impulsions très brèves et très intenses. On parle de laser impulsionnel.

La lumière laser produite par l'oscillateur peut ne pas avoir assez de puissance pour être utilisée directement, il est parfois nécessaire d'avoir une puissance beaucoup plus grande, il faut amplifier la lumière laser émise par l'oscillateur dans une série d'amplificateurs.

### 1.3.2. La chaîne d'amplification :

C'est une suite d'amplificateurs (milieu laser sans miroirs aux extrémités) dont le principe de fonctionnement est le même que celui d'un oscillateur. Les particules du milieu laser sont excitées par une source d'énergie et les photons qui vont traverser l'amplificateur vont produire par réaction en chaîne de nombreux autres photons identiques : la lumière laser est amplifiée. Étant donné l'absence de miroirs, les photons ne passent qu'une fois dans le milieu laser. Pour obtenir la puissance recherchée, plusieurs amplificateurs sont placés sur la trajectoire du faisceau laser. Au fur et à mesure de l'augmentation de la puissance, il faudra augmenter le diamètre du faisceau et des amplificateurs afin d'éviter que l'énergie grandissante de la lumière laser ne casse les composants optiques. Le faisceau sera ensuite focalisé par une lentille. La suite constituée de l'oscillateur, des amplificateurs et d'autres composants optiques (miroirs, lentilles...) constitue une chaîne laser.

On peut comparer ce processus à l'effet Larsen, qui se produit lorsqu'un amplificateur (la chaîne Hi Fi) a sa sortie (le haut-parleur) « branchée » sur l'entrée (le micro). Alors un bruit très faible capté par le micro est amplifié, émis par le haut-parleur, capté par le micro, réamplifié, et ainsi de suite... Bien sûr l'intensité du son ne croît pas indéfiniment (tout comme l'intensité de la lumière dans un laser) : l'amplificateur a des limites (il existe un volume maximum du son pouvant être produit). Notons que la fréquence du son émise par ce procédé est bien particulière, et dépend de l'amplificateur, de la distance entre le haut-parleur et le micro : il en est de même pour un laser.

## 1.4. Différents types de laser :

On classe les lasers selon six familles, en fonction de la nature du milieu excité.

### 1.4.1. Cristallins (à solide) :

Ces lasers utilisent des milieux solides, tels que des cristaux ou des verres comme milieu d'émission des photons. Le cristal ou le verre n'est que la matrice et doit être dopé par un ion. Le plus ancien est le laser à rubis dont l'émission provient de l'ion  $\text{Cr}^{4+}$ . D'autres ions sont très utilisés (la plupart des terres rares : le Titane et le Chrome, entre autres). La longueur d'onde d'émission du laser dépend essentiellement de l'ion dopant, mais la matrice influe aussi. Ainsi, le verre dopé au néodyme n'émet pas à la même longueur d'onde (1053 nm) que le YAG<sup>II</sup> dopé au néodyme (1064 nm). Ils fonctionnent en continu ou de manière impulsionnelle (impulsions de quelques microsecondes à quelques femtosecondes). Ils sont capables d'émettre aussi bien dans le visible, le proche infrarouge que l'ultraviolet.

Au-delà d'une dimension de cristal de qualité optique acceptable, ces lasers permettent d'obtenir des puissances de l'ordre du kW en continu et du GW en pulsé. Ils sont utilisés pour des applications tant scientifiques qu'industrielles, en particulier pour le soudage, le marquage et la découpe de matériaux.

### 1.4.2. À colorants :

Dans les lasers à liquide, le milieu d'émission est un colorant inorganique en solution liquide enfermé dans une fiole de verre. Le rayonnement émis peut aussi bien être continu que discontinu suivant le mode de pompage. Les longueurs d'onde émises peuvent être réglées à l'aide d'un prisme régulateur, ce qui rend ce type d'appareil très précis.

### 1.4.3. À gaz :

Le milieu générateur de photons est ici un gaz contenu dans un tube en verre ou en quartz. Le faisceau émis est particulièrement étroit et la fréquence d'émission est très pure. Les exemples les plus connus sont les lasers à hélium-néon (He-Ne, rouge, à 0,63 $\mu\text{m}$ ) qui sont

---

<sup>II</sup> YAG : *Yttrium Aluminium Garnet*, un grenat d'aluminium et d'yttrium, matériau cristallin utilisé dans les lasers.

utilisés dans les systèmes d'alignement (travaux publics, laboratoires), et les lasers pour spectacles.

À noter que les lasers à dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>, infrarouge, à 10,6µm) sont capables de produire de très fortes puissances (fonctionnement en impulsion) de l'ordre de 10<sup>6</sup> W. C'est le marquage Laser le plus utilisé dans le monde.

Il existe aussi une sous-famille des lasers à gaz : les lasers excimer<sup>III</sup> qui émettent dans l'ultra-violet. Dans la majorité des cas, ils sont composés d'au moins un gaz halogène et aussi parfois d'un gaz rare. Le terme "excimer" vient du mot anglais "dimer" qui signifie que le gaz est composé de deux molécules identiques (ex: Fluor (F<sub>2</sub>)). Or certains lasers excimer sont composés de deux molécules différentes (gaz rare et halogène ex: Argon et Fluor (ArF)), nous devrions les appeler "exciplex". Mais par abus de langage, les physiciens leur prêtent le nom de laser excimer.

#### 1.4.4.À semi-conducteurs - diodes laser - VCSEL :

Ces lasers sont principalement constitués d'une diode à semi-conducteur afin de produire un faisceau lumineux. Particulièrement compacts, les lasers à semi-conducteurs utilisent les jonctions électroniques entre semi-conducteurs de conductivités différentes pour générer des photons (l'un des matériaux les plus performants étant l'arséniure de gallium).

Le pompage se fait à l'aide d'un courant électrique qui enrichit le milieu générateur en trous d'un côté et en électrons de l'autre. La lumière est produite au niveau de la jonction par la recombinaison des trous et des électrons. Souvent, ce type de laser ne présente pas de miroirs de cavité : le simple fait de cliver le semi-conducteur, de fort indice optique, permet d'obtenir un coefficient de réflexion suffisant pour déclencher l'effet laser.

Les VCSEL ou diode laser à cavité verticale émettant par la surface (VCSEL pour l'anglais *vertical-cavity surface-emitting laser*) est un type de diode laser à semi-conducteur émettant un rayon laser perpendiculairement à la surface, contrairement aux lasers conventionnels à semi-conducteur émettant par la tranche.

---

<sup>III</sup>Laser excimer : de la contraction des mots anglais "excited" et "dimer" émet des ultra-violets qui permettent de gommer et resurfacier la cornée.

C'est cette famille de laser qui représente l'immense majorité (en nombre et en chiffre d'affaire) des lasers utilisés dans l'industrie. En effet, ses avantages sont nombreux : tout d'abord, il permet un couplage direct entre l'énergie électrique et la lumière, d'où les applications en télécommunications (à l'entrée des réseaux de fibres optiques). De plus, cette conversion d'énergie se fait avec un bon rendement (de l'ordre de 30 à 40 %). Ces lasers sont peu coûteux, très compacts (la zone active est micrométrique, voire moins, et l'ensemble du dispositif a une taille de l'ordre du millimètre). On sait maintenant fabriquer de tels lasers pour obtenir de la lumière sur quasiment tout le domaine visible, mais les lasers délivrant du rouge ou du proche infrarouge restent les plus utilisés et les moins coûteux. Leurs domaines d'applications sont innombrables : lecteurs optiques (CD), télécommunications, imprimantes, dispositifs de « pompage » pour de plus gros lasers (de type lasers à solide), pointeurs, etc. Noter que la réglementation en vigueur en France interdit d'en fabriquer éclairant au-delà de 1 000 mètres.

Un dispositif très proche dans son fonctionnement, mais qui n'est pas un laser, est la DEL (diode électroluminescente) : le dispositif de pompage est le même, mais la production de lumière n'est pas stimulée, elle est produite par désexcitation spontanée, de sorte que la lumière produite ne présente pas les propriétés de cohérence caractéristique du laser.

#### 1.4.5. À électrons libres (LEL) :

Ce type de laser est très particulier, car son principe est tout à fait différent de celui exposé plus haut. La lumière n'y est pas produite par des atomes préalablement excités, mais par un rayonnement synchrotron<sup>IV</sup> produit par des électrons accélérés. Un faisceau d'électrons, provenant d'un accélérateur à électrons, est envoyé dans un *onduleur* créant un champ magnétique périodique (grâce à un assemblage d'aimants permanents). Cet onduleur est placé entre deux miroirs, comme dans le schéma d'un laser conventionnel : le rayonnement synchrotron est amplifié et devient cohérent, c'est-à-dire qu'il acquiert les caractéristiques de la lumière produite dans les lasers.

Il suffit de régler la vitesse des électrons pour fournir une lumière de fréquence ajustée très finement sur une très large gamme, allant de l'infrarouge aux rayons X, et la puissance laser peut être également ajustée par le débit d'électrons jusqu'à des niveaux élevés. On peut

---

<sup>IV</sup> Le synchrotron est un instrument permettant l'accélération à haute énergie de particules stables chargées.

également disposer d'impulsions laser d'intervalle court et précis. Tout cela rend ce type de laser très polyvalent, et très utile dans les applications de recherche. Il est cependant plus coûteux à produire.

#### 1.4.6.Fibrés :

Le laser fibré est le dernier né de la technologie laser. Sa conception est assez révolutionnaire, car le milieu actif est une fibre optique dopée avec un ion de terre rare qui est principalement l'ytterbium. Ce laser possède sensiblement les mêmes longueurs d'onde que le laser YAG. Cependant, il est plus compact, plus stable et n'a pas besoin de mode de refroidissement. Il a également une meilleure qualité de faisceau, le diamètre de ce dernier étant plus faible, il a donc une meilleure résolution pour des applications de marquage.

Le Laser étudié dans le cadre de cette thèse est le laser femtoseconde qui est un laser solide émettant dans l'infrarouge (1 053 nm), inventé au début des années 80 et fût commercialisé dès 1990. La caractéristique principale de cet appareil est de travailler avec des impulsions extrêmement brèves, de l'ordre de la femtoseconde, soit  $10^{-15}$  seconde. Cette faible durée d'impulsion permet d'éviter les effets thermiques. En effet le rayon laser est tellement bref qu'il ne peut pas faire bouger les atomes, il a en revanche comme effet d'arracher les électrons des atomes (ionisation) et donc de former des ions qui vont créer un plasma froid (mélange gazeux d'ions et d'électrons). L'énergie transférée aux électrons ne leur permet pas d'aller très loin, et on assiste à une recombinaison des ions dans un espace proche de l'ionisation.

## 2. Le laser femtoseconde :

### 2.1. Historique :

Le premier laser délivrant des impulsions a été inventé en 1960. Il a permis à de nombreux chercheurs d'accroître leurs connaissances relatives à de nombreux processus initiés par des impulsions lumineuses. Ces événements ont été étudiés à l'échelle de la nanoseconde puis de la picoseconde.

Les chercheurs sont devenus très rapidement insatisfaits car de nombreux mécanismes intervenant dans la nature sont régis par des dynamiques se déroulant à des échelles de temps encore bien plus courtes.

Il est donc tout à fait compréhensible que cet état de fait ait poussé les scientifiques à développer des sources laser délivrant des impulsions ultra brèves : aujourd'hui femtosecondes (il reste par conséquent beaucoup de travail pour demain, mais cela est une toute autre histoire ...).

En 1988, au Lincoln Laboratory, les premières expériences sont réalisées avec comme milieu amplificateur le Titane Saphir. Les résultats prometteurs ont incité plusieurs fabricants à se lancer dans la production de ces cristaux. Entre 1989 et 1992, un programme Européen sur les chaînes d'amplification se développe. La première phase de ce programme consistait à accroître l'amplification déjà réalisée à l'aide de colorants. La deuxième phase tendait à développer une chaîne laser femtoseconde dans les matériaux solides à large bande spectrale.

Ainsi, en 1990, le premier oscillateur à Titane Saphir reposant sur la technique d'auto-blocage de modes<sup>V</sup> voit le jour. Très vite, ce type d'oscillateur apparaît dans un grand nombre de laboratoires.

Dès 1991, les chaînes d'amplification constituées de barreau de Titane Saphir sont elles aussi développées. Un phénomène nouveau apparaît, où les industriels et les laboratoires sont en concurrence directe au niveau des performances impliquant un développement rapide des lasers femtosecondes.

Depuis une quinzaine d'années, les lasers femtosecondes ont permis à notre collectivité de comprendre un grand nombre de processus allant des sciences fondamentales aux sciences

---

<sup>V</sup> auto-blocage de modes : par effet Kerr optique, découvert par hasard par une équipe écossaise et baptisé "magic mode-locking".

appliquées. Il est en effet possible de citer les études des réactions chimiques, de la photosynthèse, de la vision, de la physique des semi-conducteurs....

Des applications technologiques ont vu le jour plus récemment pour l'échantillonnage électro-optique permettant d'apprécier les performances temporelles ultimes des composants électroniques de demain, et pour les télécommunications optiques par fibres optiques. De nouvelles applications pointent à l'horizon (imprévues initialement) telles que l'imagerie en milieu diffus, la réalisation de nouveaux injecteurs d'accélérateurs linéaires, la production de champs optiques intenses de l'ordre du Petawatt ( $10^{15}$  Watts) (voie possible pour déboucher sur le laser à rayons X et pour relancer des études sur la fusion ...).

Les lasers femtosecondes sont devenus aujourd'hui plus faciles à utiliser, moins coûteux, moins encombrants et ils fournissent en routine des impulsions environ dix fois plus puissantes et bien plus courtes qu'en 1990. De nombreuses versions commerciales de ces lasers sont maintenant disponibles (les scientifiques précurseurs ont donc rempli parfaitement leur mission !), de telle sorte que ces outils ne sont plus réservés aux seuls spécialistes opticiens mais peuvent être utilisés par tout scientifique.

## 2.2. Généralités sur le principe de fonctionnement :

Avant de pénétrer dans le domaine de la femtoseconde, il est nécessaire de préciser que six femtosecondes (record actuel de la durée des impulsions dans le domaine des longueurs d'onde visibles) sont à une seconde ce que une seconde est à cinq millions d'années !

Ce point de vue est nécessaire pour bien comprendre que des impulsions femtosecondes ne s'engendrent pas et ne se "manipulent" pas aussi aisément que des impulsions picosecondes ou nanosecondes.

Mais ce regard sur l'aspect temporel des impulsions est insuffisant, il faut également tenir compte du principe d'incertitude de Heisenberg  $\Delta E \cdot \Delta t \approx \text{cste}$ . Les impulsions lumineuses qui ont une durée  $\Delta t$  extrêmement courtes sont caractérisées par le fait que les fréquences des photons s'étalent dans une bande  $\Delta \nu$  très large correspondant à une plage d'énergie  $\Delta E$ . Cette importante propriété aura de nombreuses conséquences sur le choix des différents constituants d'un laser femtoseconde : milieu amplificateur, traitement des optiques...



Une impulsion brève est ainsi une superposition cohérente de nombreuses fréquences individuelles dont les amplitudes s'ajoutent de façon constructive les unes avec les autres.

En effet, dans un laser, les fréquences d'oscillation (nombre de cycles d'oscillation par seconde) permises sont déterminées par deux facteurs : d'une part, la géométrie de la cavité qui impose l'existence d'un certain nombre de fréquences discrètes (de modes) et, d'autre part, la bande passante des composants de la cavité laser. Les fréquences des modes autorisées à exister sont déterminées par le fait que dans la cavité le champ électrique doit se répéter à l'identique après un aller-retour de la lumière.

Très souvent, pour des colorants laser et des solides dopés avec des ions des terres rares, la bande passante du milieu amplificateur de la cavité recouvre un très grand nombre de modes imposés par la géométrie. Si le laser opère à de nombreuses fréquences autorisées, la lumière résultante pourra être considérée comme un bruit puisque chaque mode n'aura aucune relation de phase avec les autres.

Pour engendrer une impulsion courte, les différents modes individuels doivent être "bloqués en phase" de telle sorte qu'ils s'ajoutent de façon constructive à un endroit de l'espace et de façon destructive partout ailleurs. Il est hors de question de traiter ici l'ensemble de tous les travaux développés à ce sujet. Le choix qui a été fait va consister à étudier le blocage de mode passif utilisé pour la première génération des lasers femtosecondes à colorants.

Aujourd'hui de nombreux lasers à colorants existent dans les laboratoires car ils émettent des impulsions dans le domaine visible des longueurs d'onde et l'analyse des mécanismes régissant leur fonctionnement nous permettra de mieux comprendre le fonctionnement des nouveaux lasers apparus depuis.

## 2.3. Analyse d'un laser femtoseconde à colorants :

Les premiers lasers femtosecondes à colorants sont apparus vers le milieu des années 70 [1, 2] mais ils étaient relativement instables et délicats à utiliser. Deux avancées importantes ont permis d'engendrer des impulsions stables au début des années 80.

Tout d'abord, en 1981, la technique du blocage de mode passif est apparue, le laser dit à impulsions contre propageantes CPM (Colliding Pulse Modelocking) a été inventé [3].

La deuxième innovation s'est produite en 1983. Il a été montré que la dispersion de vitesse de groupe (DVG) dans le laser pouvait être ajustée continûment et optimisée en insérant une séquence de prismes dans la cavité [4]. Cette nouvelle version du laser CPM fournit des impulsions aussi courtes que 27 fs [5].

Les lasers appartenant à cette famille ont été utilisés dans de nombreux domaines des sciences durant les années 80 [6].

Voici la structure et le principe de fonctionnement d'un laser CPM à colorants.

### 2.3.1. L'oscillateur femtoseconde CPM à colorants :

La composition de la cavité laser est représentée sur la figure 1. Elle est constituée d'un ensemble de miroirs qui lui donnent une configuration dite "en anneau".

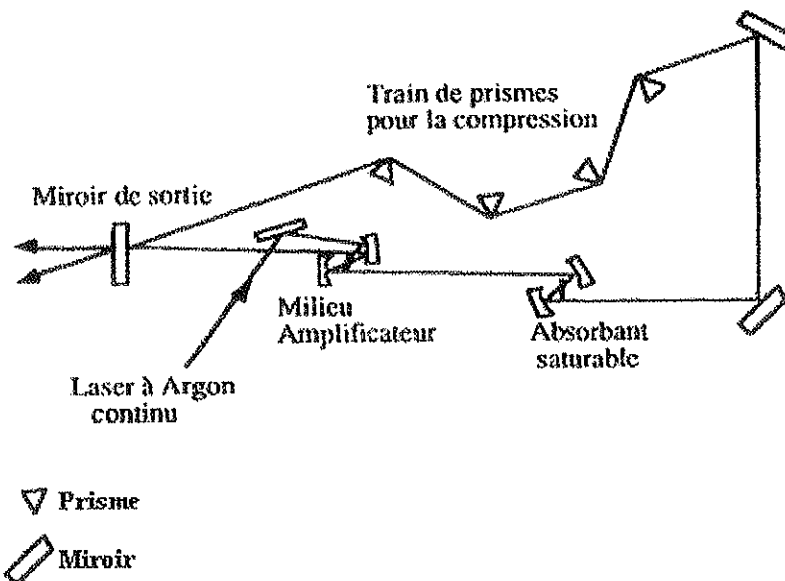


Figure 1 : Schéma du laser femtoseconde à colorants alimenté par un laser à Argon.

On y trouve tout d'abord une source d'énergie (laser à Argon) puis un milieu amplificateur constitué par un jet de colorant organique (très souvent la Rhodamine 6G) dissous dans un solvant (éthylène glycol). Le laser à argon continu excite en permanence les molécules organiques qui émettent à leur tour de très nombreuses fréquences car le spectre de fluorescence est très large. Recueillie par les deux miroirs, la lumière émise se propage dans l'anneau, à la fois dans le sens des aiguilles d'une montre et dans le sens inverse.

- **L'absorbant saturable :**

Pour créer des impulsions lumineuses brèves à partir de l'émission continue précédente, on introduit dans la cavité un interrupteur optique ultrarapide, qui ne laisse passer la lumière que pendant un temps très bref. Cet interrupteur optique est constitué par un second jet de colorant appelé "absorbant saturable". Les molécules de ce colorant organique (souvent DODCI) ont la propriété d'être absorbantes lorsqu'elles sont faiblement éclairées, et de devenir transparentes quand la puissance optique dépasse un certain seuil (l'absorption est saturée). Ce second jet de colorant joue le rôle d'un interrupteur de lumière commandé par la puissance lumineuse dans la cavité.

L'absorbant saturable reçoit en permanence la lumière provenant du milieu amplificateur et constitue de très nombreuses fréquences (de très nombreux modes). Parmi tous ces modes, seuls ceux qui vibrent en phase (c'est-à-dire ceux dont l'intensité est maximale au même instant) ont ensemble une intensité suffisante pour saturer l'absorbant saturable et le traverser (car leurs amplitudes s'ajoutent). Les autres modes s'opposent partiellement entre eux et peuvent même parfois se détruire. Leur intensité résultante est trop faible pour saturer l'absorbant et ces modes sont absorbés.

Les modes en phase formeront un "paquet de lumière" qui engendrera, après un grand nombre de tours dans la cavité, une impulsion lumineuse femtoseconde. Comme de la lumière tourne dans les deux sens dans la cavité, deux impulsions viennent de naître et voyagent ainsi en sens inverse.

Comme les deux impulsions sont "nées" ensemble, qu'elles circulent à la même vitesse et qu'elles parcourent le même chemin dans la cavité, elles se retrouvent ensemble dans l'absorbant saturable. Cependant l'énergie contenue dans leur front avant est alors perdue : elle sert à saturer l'absorbant, et seuls le maximum et le front arrière traversent l'interrupteur optique : les deux impulsions sont raccourcies par l'avant.

- **Le phénomène d'automodulation de phase (effet 1):**

A mesure que les deux impulsions voyagent en sens inverse dans la cavité, leur durée diminue. Naturellement ce mécanisme ne se répète pas à l'infini et la durée de l'impulsion n'atteint pas zéro car deux effets agonistes vont tendre à élargir l'impulsion.

Des impulsions de durée inférieure à 100 fs possèdent une puissance crête dans la cavité supérieure à 50 kW. Cette puissance est focalisée sur des taches de petite dimension (10µm) et la densité de puissance par unité de surface est de l'ordre de 200 GW/cm<sup>2</sup>. Pour de telles densités de puissance, il devient difficile de négliger les variations de l'indice optique du milieu avec l'intensité traversant ce milieu. Ce phénomène appelé "automodulation de phase" peut se décrire par un développement limité de l'indice  $n$  avec l'intensité lumineuse  $I(t)$ :

$$n(t) = n_0 + n_2 \cdot I(t)$$

où  $n_2$  est l'indice non linéaire du milieu.

L'effet observé sur l'expression temporelle du champ électrique est singulier. En effet, lorsque  $n_2$  est positif, l'automodulation de phase entraîne l'apparition de nouvelles fréquences : des basses fréquences (rouge) sur le front montant, et des hautes fréquences (bleu) sur le front descendant de l'impulsion (figure 2).

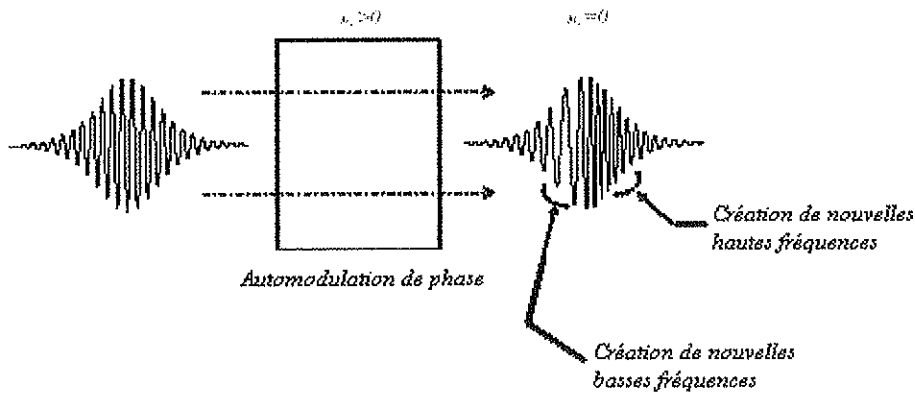


Figure 2 : schéma de principe de l'automodulation de phase d'une impulsion dans un milieu non linéaire.

Ce phénomène a pour effet d'élargir le spectre de l'impulsion tout en introduisant une modulation de fréquence. Si l'élargissement du spectre est très intéressant, puisqu'il offre la possibilité de réduire dans un même rapport la durée de l'impulsion ( $\Delta t \cdot \Delta \nu \approx \text{cte}$ ), il faudra tout d'abord éliminer la modulation de fréquence pour remettre toutes les fréquences en phase.

- **Le phénomène de dispersion de vitesse de groupe (effet 2) :**

Par ailleurs, lorsque les impulsions ont une durée inférieure à 100 fs, leur spectre possède une largeur telle ( $> 4 \text{ nm}$ ) que l'on ne peut plus négliger les variations de l'indice de réfraction entre les fréquences extrêmes du spectre. Les différentes fréquences n'induisant pas le même indice, elles ne se propagent pas à la même vitesse dans la cavité. Ce phénomène de "dispersion de vitesse de groupe" (DVG) a pour effet d'allonger l'impulsion et d'introduire un étalement des fréquences. Dans le visible, la dispersion du verre ou des solvants utilisés pour les jets de colorant est dite positive, c'est-à-dire que les basses fréquences composant le spectre voyage plus vite que les hautes fréquences.

Dans un laser femtoseconde ces deux effets (1 et 2) augmentent la durée de l'impulsion.

Imaginons cependant que l'on puisse créer artificiellement une dispersion de vitesse de groupe négative (plus importante pour le bleu que pour le rouge opposée à celle existant dans le laser, on pourrait compenser la modulation de fréquence introduite par automodulation de phase et neutraliser la dispersion de vitesse de groupe de la cavité. L'impulsion serait alors recomprimée.

Le système à quatre prismes en silice inséré dans la cavité est utilisé à cet effet. Son principe de fonctionnement est illustré sur la figure 3 en supposant que l'impulsion lumineuse se propage de gauche à droite et ne contient que deux fréquences que nous appellerons bleu (B) et rouge (R). Comme un prisme dévie spatialement plus le bleu que le rouge, dans le deuxième prisme le rouge a plus d'épaisseur à traverser que le bleu. Le rouge sort du deuxième prisme après le bleu.

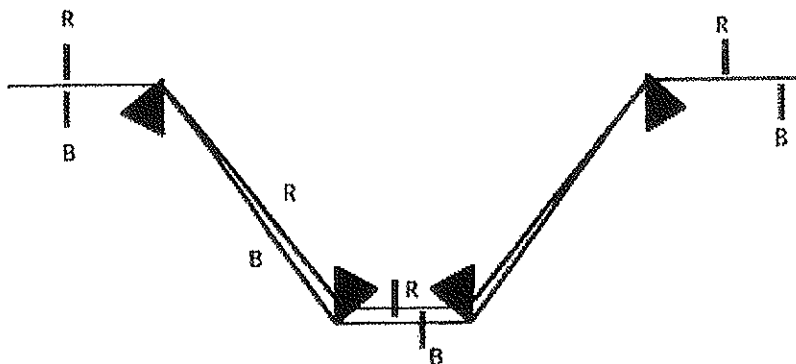


Figure 3 : schéma du système à quatre prismes présentant de la dispersion de vitesse de groupe négative.

La seconde paire de prismes sert, d'une part à doubler cet effet, et d'autre part, à superposer spatialement les faisceaux bleu et rouge. Au total l'ensemble des quatre prismes réalise une dispersion de vitesse de groupe négative et sert à comprimer les impulsions. Le décalage temporel apporté entre les différentes composantes spectrales de l'impulsion, ou plutôt leur déphasage  $\phi(\nu)$ , dépend de la fréquence et peut être développé en puissance de  $(\nu - \nu_0)$ , où  $\nu_0$  représente la fréquence centrale. Si le développement est limité aux trois premiers termes, on obtient :

$$\phi(\nu) = \phi_0(\nu_0) + (\nu - \nu_0) \cdot \phi' + \frac{1}{2}(\nu - \nu_0)^2 \cdot \phi''$$

$$\text{Avec } \phi' = \left( \frac{\partial \phi}{\partial \nu} \right)_{\nu=\nu_0} \quad \text{et} \quad \phi'' = \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial \nu^2} \right)_{\nu=\nu_0}$$

*Equation où  $\phi''$ , dérivé seconde du déphasage, représente la DVG*

On peut montrer que la dispersion de vitesse de groupe  $\phi''$  prend la forme  $\phi'' = A \cdot e \cdot B \cdot L$  pour un système à quatre prismes, où  $e$  est l'épaisseur de verre traversé et  $L$  la distance entre les arêtes des deux prismes de la même paire.  $A$  et  $B$  sont deux constantes positives qui ne dépendent que de la nature du verre constituant les prismes.

On comprend ainsi qu'en translatant finement un prisme, on peut ajuster la valeur de la dispersion de vitesse de groupe et optimiser le fonctionnement de l'oscillateur femtoseconde.

Aujourd'hui on parle beaucoup de transmission d'impulsions optiques par l'intermédiaire de fibres optiques : la propagation de solitons. Le lecteur pourra s'y intéresser grâce à [7, 8]

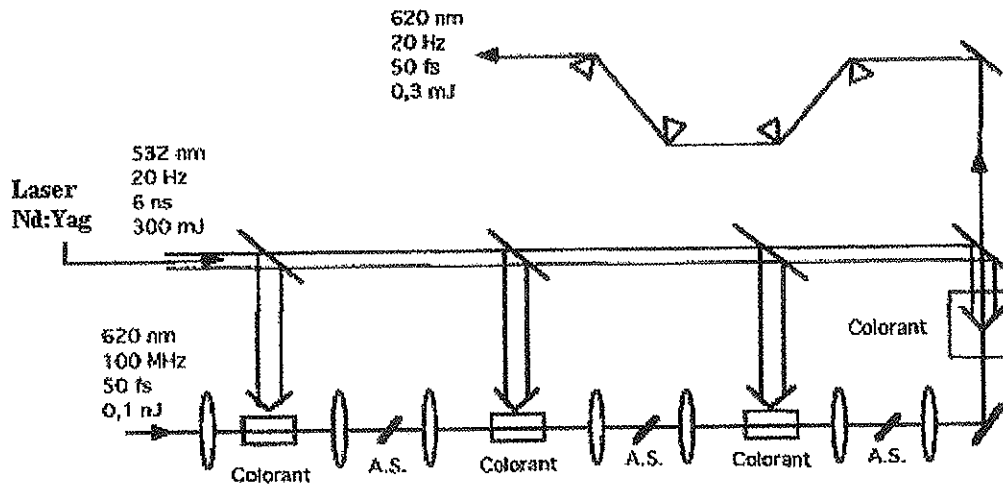
Si nous revenons à l'oscillateur décrit plus haut, il faut préciser qu'il produit typiquement des impulsions de 50 fs à une cadence proche de 100 MHz. L'énergie moyenne par impulsion est de l'ordre de 0,2 nJ ce qui correspond à une puissance crête d'environ 4 kW. Cette puissance est trop faible pour pouvoir créer avec efficacité la plupart des effets non linéaires. On estime à 1 MW le seuil typique des effets non linéaires dans les matériaux actuels. Il faut donc envisager d'amplifier les impulsions disponibles (produites par l'oscillateur) dont la longueur d'onde est imposée par le choix du couple de colorants : milieu amplificateur-absorbant saturable. Très souvent sa valeur est proche de 620 nm à plus ou moins 10 nm.

### 2.3.2.L'amplificateur d'impulsions femtosecondes à colorants :

Les systèmes amplificateurs à colorants existant de part le monde sont pratiquement tous conçus sur le même modèle. On se contentera ici de décrire les éléments composant l'amplificateur sans entrer dans l'explication du fonctionnement physique de l'amplification dans les colorants [9].

Le principe d'amplification d'impulsions très courtes consiste à exciter un colorant à l'aide d'un laser très puissant qui émet des impulsions nanosecondes. Les molécules sont désexcitées par émission stimulée lors du passage de l'impulsion très courte à amplifier. Le laser de pompe est donc utilisé comme une simple source d'énergie.

Une chaîne amplificatrice classique telle que représentée sur la figure 5, est composée de quatre étages présentant la même structure. Chaque étage est constitué d'une cuve de colorant amplificateur suivi d'un jet d'absorbant saturable destiné à découpler les étages amplificateurs entre eux. A l'entrée et à la sortie de chaque cuve, on dispose des diaphragmes qui permettent de ne laisser passer que le faisceau du laser femtoseconde et qui stoppent une grande partie de la fluorescence du colorant qui est émise dans un angle solide beaucoup plus important. Des systèmes optiques permettent de focaliser le faisceau sur le jet et d'augmenter son diamètre au fur et à mesure de sa progression dans la chaîne pour limiter la saturation de l'amplification. Pour des raisons de simplicité de construction, les trois premiers étages amplificateurs sont pompés transversalement tandis que, pour améliorer le profil spatial du faisceau amplifié, le quatrième étage est pompé longitudinalement.



A.S. = Absorbant saturable

Figure 4 : Schéma de la chaîne amplificatrice d'impulsions femtosecondes à colorants.

L'énergie lumineuse nécessaire à l'amplification est fournie par un laser Nd:Yag doublé en fréquence qui délivre des impulsions de l'ordre de 6 ns à 532 nm et d'énergie voisine de 300 mJ. La cadence d'un tel laser est souvent basse : de l'ordre de quelques dizaines de Hz et les performances des impulsions femtosecondes amplifiées sont intimement liées à la qualité de ce laser de pompe. De nombreuses équipes ont utilisé des lasers à vapeur de cuivre permettant d'atteindre 15 kHz au détriment du gain de la chaîne qui atteint  $10^4$  (il est de l'ordre de  $3 \cdot 10^6$  pour un Yag basse cadence). Ainsi à la sortie de la chaîne, on dispose classiquement d'impulsions de durée 50 fs, d'énergie 0,3 mJ.

Lors de son amplification la durée de l'impulsion a très nettement augmenté à cause de la dispersion de vitesse de groupe introduite par la traversée des cuves de colorants, des lentilles et de tous les éléments dispersifs composant l'amplificateur. On peut compenser cet effet en utilisant à nouveau une ligne dispersive à prismes identique à celle utilisée dans l'oscillateur.

Afin de ne pas aboutir à un système trop encombrant, il est possible de choisir des verres appropriés qui donnent une valeur suffisante à la constante B intervenant dans l'expression de la dispersion de vitesse de groupe  $\phi''$  rappelée plus haut. On retrouve alors à peu près la durée de l'impulsion délivrée par l'oscillateur.

Il est aisé de comprendre à ce stade que nous ne disposons d'impulsions femtosecondes amplifiées qu'à 620 nm. Il est possible de doubler leur fréquence (on double la fréquence du laser à l'aide d'un cristal non linéaire de iodate de lithium) pour atteindre l'ultraviolet ou de les focaliser très violemment pour créer un continuum de lumière blanche,



mais bien évidemment ces opérations abaissent l'énergie des nouvelles impulsions produites. Si l'on se souvient, c'est le couple des colorants utilisés dans l'oscillateur qui impose sa longueur d'onde de fonctionnement. Très peu de combinaisons milieu amplificateur-absorbant saturable conviennent et leur étude est très difficile [10].

Parallèlement à tous ces développements au cours des années 80, on a vu apparaître de nouveaux matériaux solides présentant la propriété de milieux amplificateurs à très large bande passante. Ce fut l'explosion des lasers femtosecondes à l'état solide [11,12].

## 2.4. Analyse d'un laser femtoseconde solide (Annexe 1) :

### 3. Conclusion :

Les applications initiales des lasers femtosecondes étaient essentiellement de nature : "spectroscopie résolue en temps", afin de comprendre la dynamique des tous premiers phénomènes régissant la mise hors équilibre de la matière par ces impulsions ultrabrèves. La montée en puissance des impulsions : "en route vers le petawatt", n'était pas prévue initialement, mais elle occupe aujourd'hui une large part de l'activité de l'industrie laser.

Ce type de laser permet aujourd'hui de nombreuses avancées aussi bien dans le domaine de la Médecine (avec la chirurgie réfractive) que dans celui des phénomènes météorologique (paratonnerre). Ces deux applications vont être développées au cours de cette thèse.

On pourra citer les autres applications que nous ne développerons pas :

- l'ablation laser ;
- la dynamique photochimique ultrarapide ;
- la découpe au laser femtoseconde (industrie).

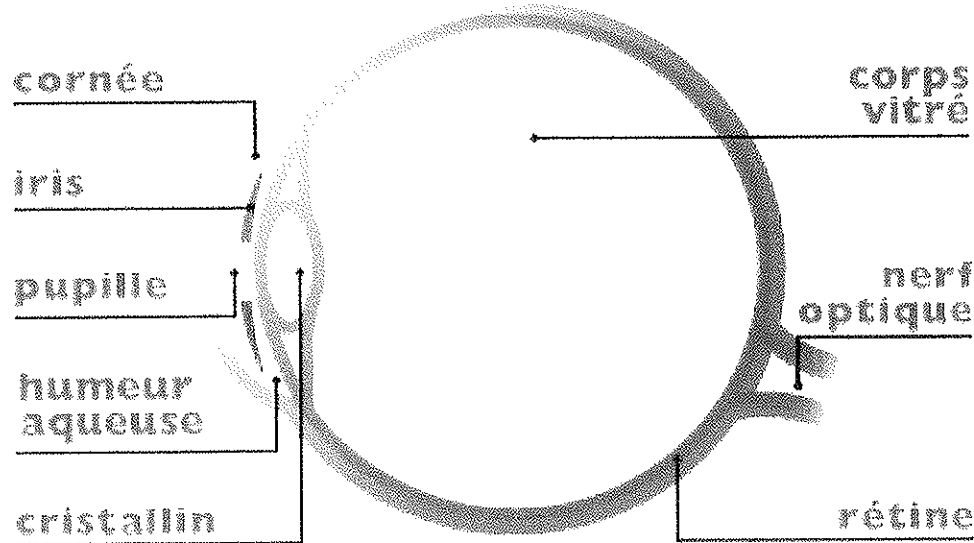
## B. Application à la chirurgie réfractive

### 1. L'oeil humain et la cornée :

#### 1.1. Physiologie de l'oeil humain et de la cornée :

L'oeil est un organe sensoriel très perfectionné de notre corps. C'est un appareil photographique composé de deux lentilles (la cornée et le cristallin), d'un diaphragme (l'iris), d'un capteur photosensible (la rétine) pour lequel l'accommodation du cristallin correspond à la mise au point. Les connexions nerveuses de la rétine effectuent des prétraitements évolués (détection des points de contour, regroupement de points de contour et de contours, analyse de texture, etc...) avant de transmettre ces informations au cerveau via le nerf optique. Le cerveau va interpréter les images des deux yeux et les fusionner pour reconstruire la scène 3D observée [28].

##### 1.1.1. Anatomie :



(globe salin que.  $\varnothing$  de 25 mm environ)

Figure 5 : coupe latérale de l'oeil

L'oeil est une sphère d'environ 25mm de diamètre. C'est un organe mobile contenu dans une cavité appelée globe oculaire, qui lui empêche tout mouvement de translation (avant

arrière), mais qui lui permet la rotation grâce à des muscles permettant d'orienter le regard suivant trois degrés de liberté. C'est ce qu'on appelle le champ visuel, qui peut atteindre 200°.

- **L'humeur aqueuse**

C'est un liquide transparent, continuellement filtré et renouvelé en 2 – 3 heures qui, avec le vitré, maintient la pression et la forme du globe oculaire. Il passe de la chambre postérieure vers la chambre antérieure à travers la pupille. Dans la chambre antérieure, il est éliminé au niveau du trabéculum (dans l'angle irido-cornéen) ou alors passe dans le canal de Schlemm. Le trabéculum est une sorte de filtre qui lorsqu'il se bouche (débris d'iris, excès de protéines) provoque l'augmentation de la pression d'où glaucome. L'humeur aqueuse est composée essentiellement d'eau, mais aussi de vitamine C, de glucose, d'acide lactique et de protéines. Son rôle est surtout nourricier (endothélium cornéen et iris), réparateur, régulateur de la pression intraoculaire, ainsi que maintien de la forme de l'oeil. La pression normale de l'oeil pour des sujets de moins de 40 ans est de 13 – 19mmHg. Chez les sujets de plus de 40 ans, elle est de 16 – 23mmHg.

- **L'iris**

C'est un diaphragme circulaire se réglant automatiquement suivant la quantité de lumière reçue. Les muscles qui sont responsables de la variation de son diamètre sont le dilatateur (qui contracte l'iris, ce qui a pour effet de dilater la pupille) et le sphincter (diminue le diamètre de la pupille). Quand le diamètre est petit, la profondeur de champ augmente, et il y a moins d'aberrations : la surface de cornée utilisée est faible et les anomalies de surface moins nombreuses favorisent la formation d'une image nette. Inversement la nuit, la faible quantité de lumière impose l'utilisation de la quasi totalité de la surface de la cornée. La quantité d'anomalies de surface impliquées dans la vision augmente sans pouvoir être compensée par le cristallin : c'est la myopie nocturne. L'iris définit la couleur de l'oeil qui dépend de l'épaisseur de l'éventail formé par les lamelles pigmentaires et de sa concentration en mélanine. Plus l'éventail est épais et contient de mélanine, plus l'oeil est foncé. La nutrition de l'iris est assurée par l'humeur aqueuse dans laquelle elle baigne, et par quelques petites artérioles.

- **La pupille**

C'est l'office central de l'iris. Son diamètre en lumière normale est de 3 à 6mm. L'augmentation du diamètre se nomme la mydriase et sa diminution le myosis. La mydriase est provoquée par l'excitation d'un nerf sensitif (ouïe, vue, odorat), par l'obscurité lors de coma ou de mort ; elle est fréquente chez les diabétiques, les épileptiques. Le myosis a lieu en présence d'une forte luminosité, d'un corps étranger (poussière...) lors d'un clignement de l'oeil ou d'un passage de la vision de loin à la vision de près, chez les usagers de dérivés morphiniques.

- **Le cristallin**

C'est une lentille transparente biconvexe vascularisée, située derrière l'iris, effectuant la mise au point pour obtenir la netteté à toute distance. La lumière entre par la cornée, traverse l'humeur aqueuse puis la pupille. Là, le cristallin fait converger les rayons lumineux sur la rétine en modifiant sa courbure d'où variation de sa puissance : c'est l'accommodation. En bombant, le cristallin augmente sa puissance. Le cristallin perd de son élasticité avec l'âge : c'est la presbytie. Le jaunissement du cristallin ou perte de sa transparence avec le temps provoque une opacification : c'est la cataracte. La cataracte peut avoir des causes non naturelles : drogue, alcool, rayons X, U.V., infrarouges, traumatisme, suite d'un décollement de rétine. Lorsque l'on a une cataracte, certaines longueurs du visible sont mal perçues, en particulier le bleu.

- **Le vitré ou corps vitré**

C'est une masse gélatineuse transparente entourée par la membrane hyaloïdienne et premier constituant de l'oeil (90% de son volume).

Son rôle est de maintenir la rigidité du globe oculaire et de bien coller la rétine contre le fond du globe oculaire. Sa structure (95% d'eau) le fait intervenir dans le maintien de la pression intraoculaire et lui permet d'absorber les pressions auxquelles il est soumis sans altérer la fonction de l'oeil.

- **La rétine**

C'est un tissu sensible et fragile sur lequel viennent se former les images. C'est une membrane nerveuse qui tapisse le fond de l'oeil, d'environ 0,25 mm d'épaisseur et de surface à peu près égale à celle d'un timbre-poste dans laquelle se trouvent plus de 130 millions de cellules nerveuses photoréceptrices : les cônes (6-7 millions) et les bâtonnets (130 millions).

Ces cellules permettent de voir les détails, les lumières, les couleurs, les formes et les mouvements. Elles captent l'influx nerveux et le transmettent au cerveau pour le décoder et former une image.

La rétine peut distinguer une lumière très faible, telle la flamme d'une bougie à une distance de 10 km dans l'obscurité totale. On peut distinguer plus de 100 nuances différentes et 750 niveaux de luminosité.

- **Le nerf optique**

Le nerf optique, long de 35 à 55 mm s'étend de la papille au chiasma et comporte environ un million de fibres réparties en un grand nombre de faisceaux séparés. La papille est un point précis de la rétine où convergent toutes les fibres optiques issues des cellules visuelles.

Ce point ne contient donc pas de cellules visuelles, c'est un point de l'oeil qui ne voit pas, on l'appelle aussi la tâche aveugle. Le chiasma est la zone où se croisent les deux nerfs optiques.

Le rôle du nerf optique est de transmettre l'image rétinienne au cerveau [29].

## 1.1.2. La cornée :

### a) Sa structure :

La cornée, directement au contact de l'extérieur, est une membrane transparente de structure régulière et ordonnée, composée de 5 couches [30] :

- épithélium : 32 microns d'épaisseur, cellules de type pavimenteux se renouvelant rapidement. La qualité de la réflexion qui donne l'éclat au regard est liée à la régularité de la surface épithéliale (superficielle et en contact avec l'extérieur), et à l'intégrité du film lacrymal qui se renouvelle à chaque clignement de paupière ;
- membrane de Bowman : couche de transition de 12 microns d'épaisseur, de nature conjonctive ;
- stroma : très épais (400 microns), il représente 90% de l'épaisseur totale de la cornée. Son tissu conjonctif très spécifique comprend les éléments habituels du tissu conjonctif. Il contient de l'eau, des substances organiques, du collagène... Tous ces éléments sont présents dans des règles quantitatives et qualitatives très particulières assurant la transparence de la cornée. Il peut perdre sa transparence suite à un traumatisme, s'il contient trop d'eau...
- membrane de Descemet : 6 microns d'épaisseur ;
- endothélium : 6 microns d'épaisseur, membrane interne, fragile et très fine. La qualité et la quantité de ces cellules varient avec l'âge.

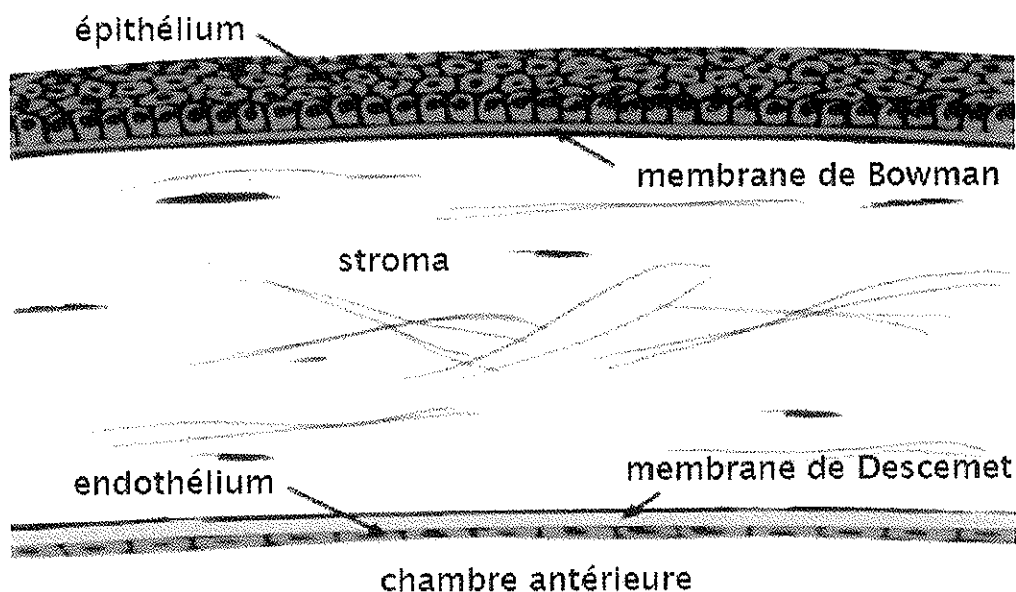


Figure 6 : la cornée.

C'est la structure qui a la plus grande sensibilité tactile du corps humain, ce qui explique que même d'infimes particules (des corps étrangers) qui s'y déposent soient aussi douloureuses et invalidantes. Heureusement, les fibres dont est constituée la cornée sont résistantes et se réparent en général rapidement à la suite d'une lésion, sans qu'il ne reste de cicatrice, préservant ainsi la vision.

La cornée est nourrie essentiellement par les larmes qui amènent l'oxygène, un peu par l'humeur aqueuse et les vaisseaux sanguins au niveau du limbe. Si l'oxygénation de la cornée ne se fait plus ou se fait mal, exemple de lentille de contact trop serrée, alors des vaisseaux sanguins se forment et pénètrent dans la cornée pour amener l'oxygène nécessaire.

Il en résulte une gêne visuelle due à ces vaisseaux qui forment une image constante dans le champ visuel.

#### b) Son rôle optique :

La vision commence à la cornée, la porte d'entrée de la lumière dans l'oeil puisque la cornée transmet plus de 85% de la lumière incidente, lorsque les longueurs d'ondes sont comprises entre 300 et 2500 nm. Une petite partie de la lumière incidente est donc perdue, principalement par un phénomène de diffusion, une autre partie est réfléchi, permettant l'étude en microscopie spéculaire [31].

La cornée possède plus des deux tiers du pouvoir réfractif de l'oeil. La puissance réfractive de la cornée dépend de son rayon de courbure et de l'index réfractif des différents milieux que la lumière va traverser.

Différents concepts sont utilisés pour décrire les propriétés optiques de la cornée :

- la courbure de la cornée est exprimée par le rayon de courbure d'un plan méridien (plan contenant l'axe optique) ou cliniquement en dioptrie kératométrique ;
- la forme est exprimée par la position relative de la surface par rapport à une surface de référence choisie (ex : sphère) ;
- les déformations locales de la surface sont exprimées en micromètre. La finesse de la surface est très importante en optique car des micro-irrégularités de la surface cornéenne peuvent dégrader l'image de manière significative ;
- le pouvoir de la cornée, exprimé comme la réfraction en dioptrie ( $\delta$ ), est une propriété optique dépendant de la forme de la cornée et de l'index réfractif de la surface.

Une cornée est d'autant plus puissante qu'elle est courbe, c'est-à-dire que son rayon de courbure est faible. Son rayon de courbure avant est de l'ordre de 7,8 mm et celui de la face arrière est de 6,8 mm. Son épaisseur est variable, en moyenne 550  $\mu\text{m}$ , et plus mince au centre.

Avec un indice de réfraction  $n = 1,376$ , les pouvoirs réfractifs des couches antérieure et postérieure sont respectivement de 48,6 dioptries<sup>VI</sup> (abrégé :  $\delta$ ) et  $-6,8 \delta$  en moyenne. Dans la pratique, on substitue à ces deux couches une surface réfractive dont le pouvoir réfractif est de 42-44  $\delta$ .

La cornée évolue peu avec l'âge. Elle s'aplatit d'environ 0,5  $\delta$  vers l'âge de 30 ans et de 1  $\delta$  vers les 70 ans. Durant l'âge adulte, une cornée moyenne est plus aplatie de 0,5  $\delta$  selon le méridien vertical comparé au méridien horizontal. C'est ce qui explique bien souvent l'apparition d'astigmatisme. Cette différence entre les deux méridiens diminue avec l'âge et disparaît finalement vers les 70 ans. Une cornée « standard » a une surface plus bombée au centre et aplatie à la périphérie.

La surface représentative de la vision est une zone dont le diamètre avoisine celui de la pupille. Le diamètre de cette dernière diminue d'ailleurs avec l'âge. De grandes variations existent entre personnes du même âge. Une étude a démontré que la taille moyenne de la pupille pour des individus âgés de 20 et 80 ans était respectivement de 4,5mm et 3,5mm en présence d'une forte luminosité. En faible luminosité, le diamètre de la pupille passe à 8 mm à 20 ans et 5 mm pour les octogénaires. Ces résultats sont cliniquement importants car la plupart des chirurgies réfractives au laser traitent une zone de 6,5mm de diamètre.

Les propriétés mécaniques de la cornée sont moins bien connues. La partie centrale épaisse de 250  $\mu\text{m}$  est supposée assurer la stabilité mécanique de la cornée. Quant à la zone périphérique, moins étudiée, elle est certainement importante dans les procédures réfractives telles que les anneaux intra-cornéens ou bien les kératotomies radiales et astigmatiques. Grâce aux avancées en imagerie médicale et à l'étendue des chirurgies réfractives, le comportement de la cornée devrait être prochainement mieux connu.

---

<sup>VI</sup> Dioptrie : En Optique, la dioptrie est une unité de vergence homogène à l'inverse d'une longueur. Le symbole de la dioptrie est la lettre grecque  $\delta$  (delta).



### 1.1.3. L'œil et la vision :

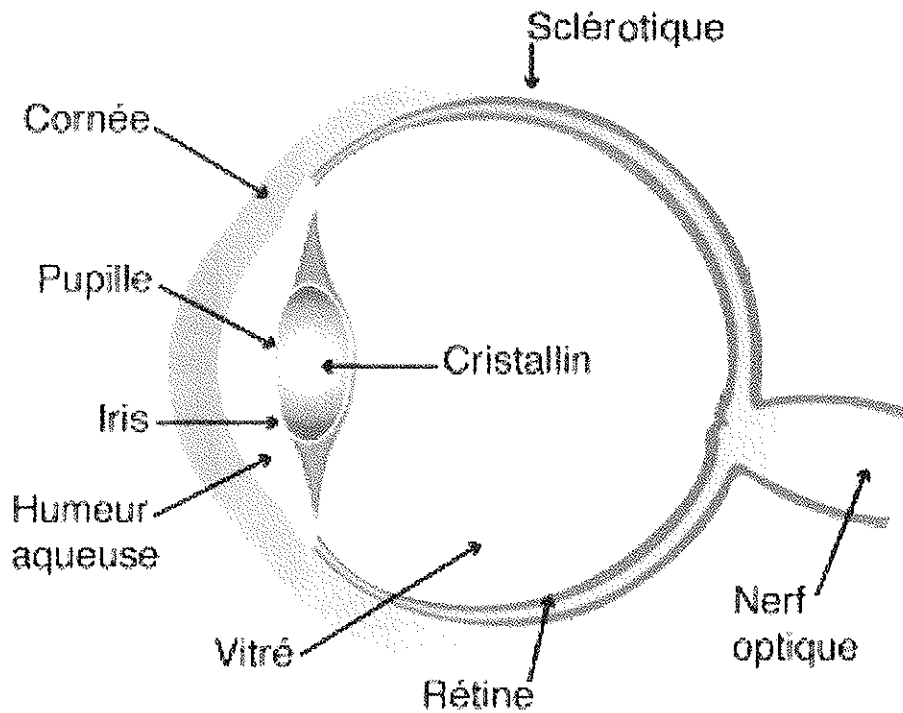
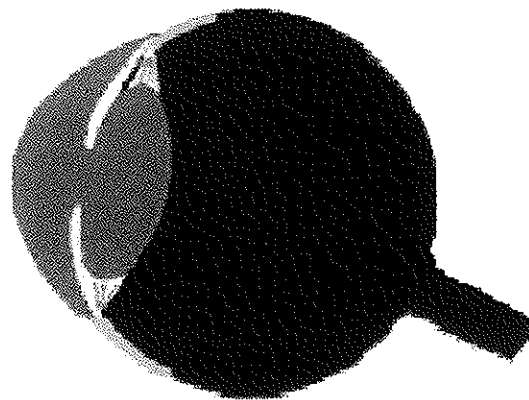
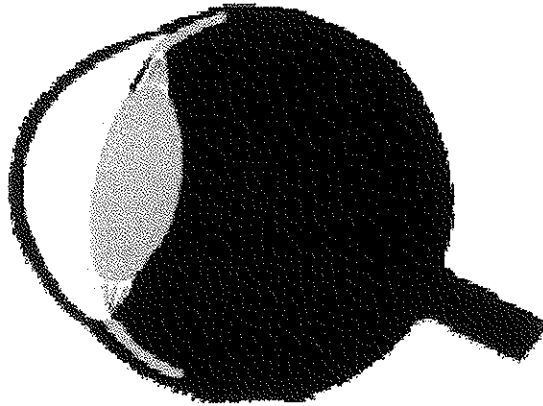


Figure 7 : Schéma de l'œil humain.

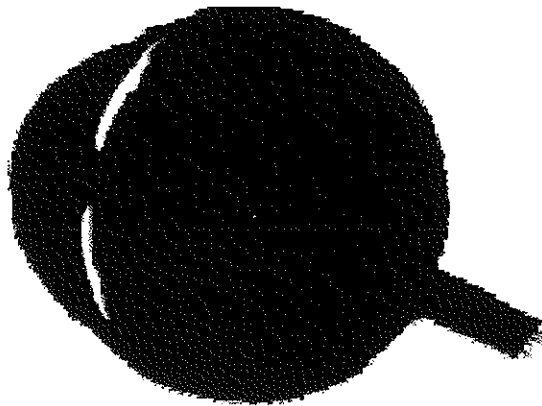
Tout point-objet visible émet des rayons lumineux qui constituent un faisceau lumineux dirigé vers l'œil. Ces faisceaux traversent en premier la cornée : il s'agit de la partie extérieure de l'œil. Cette partie du blanc de l'œil - la sclérotique - est transparente afin de laisser passer correctement la lumière. Elle est extrêmement fragile et possède la plus grande sensibilité tactile du corps humain.



Puis les faisceaux traversent un milieu liquide transparent qui ne dévie pas les rayons de leur trajectoire initiale. Il s'agit de l'humeur aqueuse.

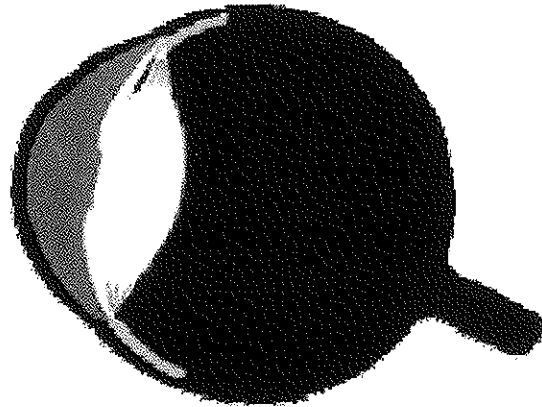


Les faisceaux passent ensuite par la pupille, dont l'ouverture est réglée par l'iris afin d'adapter l'oeil à la luminosité. Par faible luminosité, l'iris se dilate et par conséquent le diamètre de la pupille augmente (jusqu'à 8 millimètres) pour capter le maximum de rayons lumineux. Inversement, lors de forte luminosité, l'iris se contracte pour ne laisser passer qu'une petite quantité de lumière.



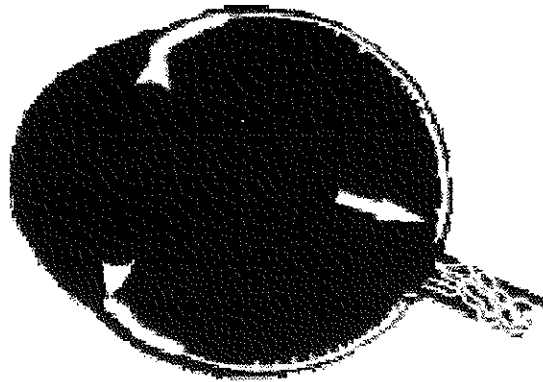
L'étape suivante est la traversée du cristallin, puis celle du corps vitré. Le rôle du cristallin est de faire converger chacun des faisceaux en un point-image net sur la rétine. Pour ce faire, il est plus ou moins étiré ou relâché à l'aide de petits muscles de sorte à ajuster sa vergence pour que les points-image se forment exactement sur la rétine, et cela quelle que soit la distance de l'objet à l'oeil. On appelle ce phénomène l'accommodation (voir 1.1.4). L'amplitude de cette accommodation est par ailleurs très grande chez l'enfant, ce qui explique par exemple la mauvaise habitude qu'ont les enfants de se pencher trop près de leur cahier. A

partir de la cinquantaine, cette accommodation devient inférieure à 3 dioptries: le sujet commence à être gêné pour lire.



Après cette traversée, les innombrables faisceaux donnent lieu à d'innombrable points-image sur la rétine. Tous ces points constituent l'image de l'objet visible formé par l'ensemble cornée-cristallin, qui peut être assimilé à une lentille convergente dont la distance focale serait de  $f = 0,015$  m. Sa vergence est donc de 66 dioptries.

Les photorécepteurs de la rétine ont toutefois une sensibilité limitée. En effet, ceux-ci ne captent pas les radiations lumineuses dont les longueurs d'ondes sont supérieures à 750 nm (infrarouge) et inférieures à 380 nm (ultraviolet).



Il existe différentes zones caractéristiques à la surface de la rétine:

- La partie centrale, la macula, se compose de nombreux cônes (jusqu'à 180 000 par  $\text{mm}^2$ ), connectés individuellement à des fibres nerveuses. Par conséquent, la sensibilité visuelle du centre de l'oeil est particulièrement accrue, les images sont donc d'une excellente définition. Sur la périphérie de la rétine, la quantité de cônes et de bâtonnets diminue. De plus, ils sont connectés aux fibres nerveuses par groupes entiers : le message nerveux est donc moins précis et la vision moins nette.

- La fovéa (tache jaune), partie centrale de la macula, est composée uniquement de cônes. Elle est donc la partie la plus sensible de l'oeil. Quand nous fixons un objet, nous tournons donc les yeux de façon à aligner l'image sur la fovéa.
- Au contraire, il existe une zone de la rétine qui ne voit pas la lumière car elle ne possède ni cônes ni bâtonnets : c'est la papille optique, qui représente la tête du nerf optique (là où convergent les fibres nerveuses). La vision stéréoscopique fait que cette tache n'est pas perçue par l'observateur.

L'existence de trois types de cônes seulement pour percevoir l'information "couleur" d'une lumière complexe quelconque a encore une autre conséquence. Dans la mesure où trois paramètres seulement suffisent à décrire l'information "couleur" telle qu'elle est perçue par l'oeil, la plupart des lumières existantes, même des lumières polychromatiques complexes, sont perçues par nous comme ayant une teinte identique à celle d'une des lumières monochromatiques du spectre visible,

#### 1.1.4. Accommodation :

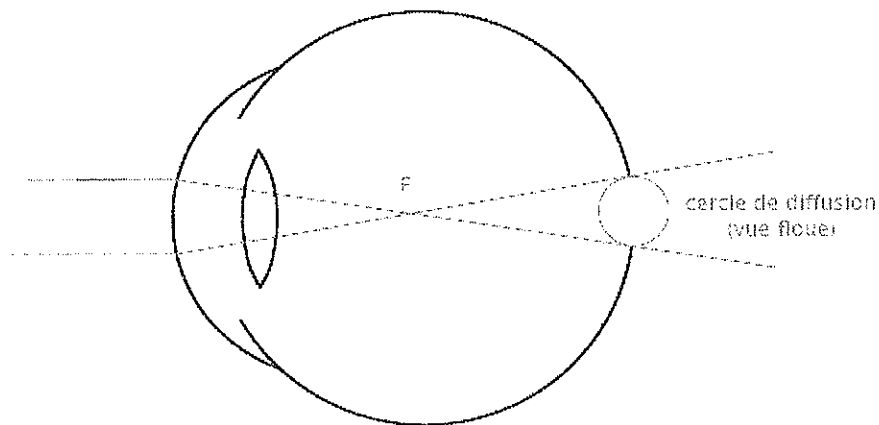
La courbure de la face antérieure du cristallin augmente sous l'influence de la contraction du muscle ciliaire ; cette variation de courbure entraîne une augmentation de la réfraction du cristallin et par conséquent une augmentation de la puissance de convergence du système optique oculaire. Cette propriété permet de former l'image rétinienne d'objets situés à différentes distances. Ce phénomène de mise au point est appelé accommodation [32].

### 1.1.5. Anomalies de la vision :

L'amétropie est une anomalie de la réfraction de l'oeil, congénitale ou acquise, caractérisée par une mauvaise mise au point des images rétiniennes venant d'objets situés à l'infini (myopie, astigmatisme) ou par un effort de mise au point (hypermétropie).

#### ✓ Myopie

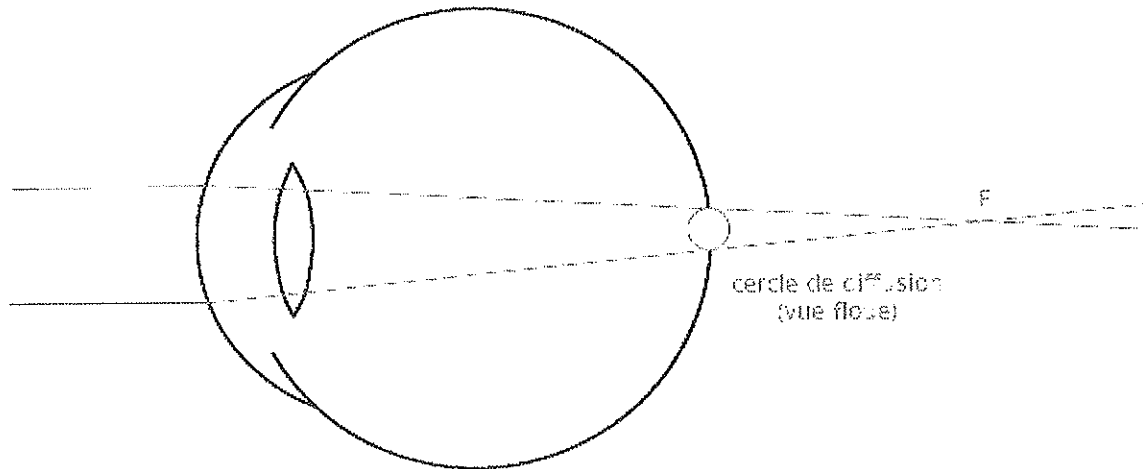
Due à une trop grande convergence de l'oeil ou à un diamètre antéro-postérieur de l'oeil trop long, l'image se forme avant la rétine. Le myope distingue mal les objets éloignés ; l'accommodation ne commence à jouer qu'à faible distance et ne lui permet de voir que des objets très rapprochés [33,34].



*Le foyer image  $F$  de l'oeil myope non accommodé se trouve devant la rétine à l'intérieur du globe oculaire et un objet éloigné (à l'infini) est reproduit sur la rétine de façon floue.*

#### ✓ Hypermétropie

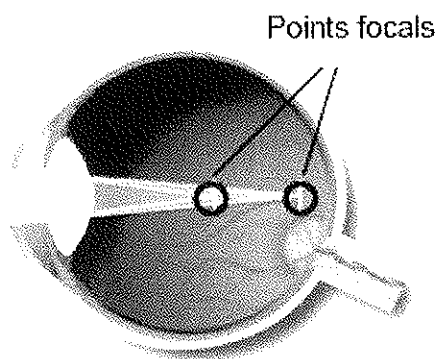
A l'inverse de l'anomalie précédente, celle-ci est due à une convergence trop faible des milieux transparents ou à un axe antéro-postérieur de l'oeil trop court. L'image se forme en arrière de la rétine. L'hypermétrope a une bonne vision de loin mais il a besoin d'une accommodation permanente et pénible. De plus, il distingue mal les objets rapprochés [35].



*Le foyer  $F$  de l'œil hypermétrope non accommodé se trouve derrière la rétine et un objet éloigné (à l'infini) est reproduit sur la rétine de façon floue.*

#### ✓ Astigmatisme

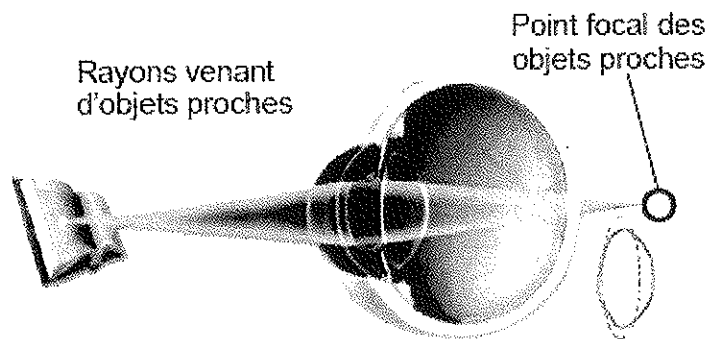
Il s'agit d'une variation de la courbure moyenne le long des plans méridiens qui empêche par exemple d'avoir une mise au point nette à la fois sur les lignes verticales et horizontales. L'astigmatisme est souvent associé à un autre défaut de réfraction. Lorsqu'il est faible, on le corrige aisément par des lunettes mais les forts astigmatismes, que l'on observe parfois après des greffes de cornée, ne sont jamais parfaitement corrigés de cette façon. L'astigmatisme a une vision déformée.



*L'œil astigmatique*

### ✓ Presbytie

Cette anomalie affecte tôt ou tard toute la population humaine. Il ne s'agit pas, contrairement aux défauts de réfraction précédents, d'une mauvaise puissance dioptrique de la cornée mais d'un épaissement et d'une rigidification du cristallin entraînant une réduction du parcours d'accommodation d'où une vue floue en vision rapprochée.



*L'oeil presbyte*

### ✓ Kératocône

Le kératocône correspond à une déformation en cône du centre de la cornée avec amincissement entraînant une myopie et un astigmatisme évolutifs, contre-indiquant une opération par laser. Dans les premiers temps, la correction de la vision peut se faire par des lunettes ou mieux par des lentilles de contact rigides adaptées. Cependant, l'évolution du kératocône peut nécessiter une greffe de la cornée, opération dont le taux de réussite est excellent (à environ 95%).

## 1.2. Chirurgie réfractive :

La chirurgie réfractive est une chirurgie visant à modifier le rayon de courbure cornéen antérieur pour que l'image d'un objet lointain se forme sur la rétine et non en arrière ou en avant de celle-ci. Elle fait appel à des techniques micro-chirurgicales, c'est-à-dire qui se pratiquent sous microscope et également au laser, et ne cesse de se développer en raison d'une amélioration rapide de l'instrumentation.

La chirurgie réfractive est appliquée aux sujets intolérants aux systèmes traditionnels (lunettes et surtout lentilles de contact) [36], et permet actuellement de corriger chirurgicalement les affections suivantes :

- ❖ la myopie ;
- ❖ l'astigmatisme congénital ou acquis (par exemple après une intervention de cataracte, après une greffe ou après un accident) ;
- ❖ la myopie associée à un astigmatisme ;
- ❖ l'hypermétropie ;
- ❖ l'hypermétropie associée à un astigmatisme ;
- ❖ la presbytie dans certaines conditions.

On distingue trois techniques :

- la chirurgie incisionnelle,
- la chirurgie de remodelage que l'on développera car le laser femtoseconde y intervient,
- la chirurgie additive.

### 1.2.1. La chirurgie de remodelage :

Cette chirurgie regroupe l'ensemble des techniques visant à modifier la forme de la cornée. L'avènement du laser Excimer a actuellement placé cette chirurgie au premier plan des interventions réfractives.

Le laser Excimer est un laser à ultra violet utilisant le gaz fluorine et l'argon, il envoie un faisceau lumineux froid qui ablate le tissu cornéen (comme un petit coup de gomme). Ce laser est différent de ceux utilisés pour la rétine, la peau, l'iris ou les capsules du cristallin. Le laser Excimer est utilisé depuis plus de dix ans et permet de surfacer la cornée pour en modifier la courbure avec une précision de l'ordre d'un quart de micron.



Cette précision permet, aujourd'hui, de traiter, avec la plus grande sécurité, la plupart des troubles réfractifs.

La cornée est resurfacée au laser Excimer directement (photokératectomie réfractive au laser Excimer) ou après découpe d'une fine lamelle (LASIK).

Ces deux procédures sont réalisées sans hospitalisation sous analgésie locale topique par simple collyre. Photokératectomie réfractive (PKR) et laser assisted in situ keratomileusis (LASIK) utilisent le même laser excimer.

✓ **PKR (photokératectomie réfractive)**

Cette intervention consiste à remodeler le profil de la cornée en appliquant le laser directement sur la surface de l'oeil après pelage chirurgical de la couche la plus superficielle de la cornée.

Le procédé est en perte de vitesse depuis la large diffusion du LASIK.

✓ **LASIK (laser assisted in situ keratomileusis)**

Dans cette chirurgie, le laser est appliqué dans l'épaisseur de la cornée (stroma), après avoir réalisé chirurgicalement un « volet » cornéen superficiel remis en place à la fin de l'intervention [37, 46]. La découpe du fin volet cornéen est indolore, rapide et précise ; elle est réalisée :

- manuellement ;
- mécaniquement (microkératome) ;
- au laser (laser femtoseconde Intralase ).

○ *Le microkératome :*

C'est l'appareil mécanique de découpe du volet cornéen superficiel. Cette action est très rapide (quelques secondes) et indolore. Ces appareils de micro-mécanique sont des pièces importantes et participent pleinement à l'obtention du résultat attendu. Le microkératome se pose sur un anneau qui maintient le globe oculaire en place tout en lui procurant une hyperpression transitoire afin de favoriser un passage simple, doux, régulier et fiable. Pendant la surpression, la vision est transitoirement interrompue. La progression de la tête sur l'anneau de succion, en marche avant puis en marche arrière, peut être soit automatisée, soit manuelle.

○ *Le laser femtoseconde :*

Il permet de fendre ou de cliver la cornée par une action photodisruptive. Le principal bénéfice est de procurer un volet lisse, homogène [38].

## 2. Le laser femtoseconde en chirurgie réfractive :

### 2.1. Généralités :

L'utilisation d'un laser femtoseconde en chirurgie ophtalmologique et en particulier en chirurgie réfractive va sans doute permettre une augmentation de la sécurité des techniques et une amélioration des résultats post-opératoires [39].

Le laser femtoseconde est un nouvel outil chirurgical destinée aux coupes et découpes de la cornée. Ce laser ne produit pratiquement aucun effet délétère persistant connu une fois les réglages effectués. Il apporte une simplicité d'utilisation alliée à une grande précision et sécurité. Il offre de nouvelles perspectives pour nombre de chirurgies réfractives cornéennes ainsi que pour certaines actions thérapeutiques. Le système est éprouvé aux USA (120.000 procédures déjà réalisées en 2005) et est arrivé dans notre pays.

Son seul inconvénient est son prix (400.000 euros). Il ne s'oppose pas aux microkératomes mécaniques qui conservent des indications limitées à la constitution du volet cornéen et dont, pour les plus modernes, le maniement est connu et encore susceptible d'amélioration.

Le principal bénéfice est de procurer un volet lisse, homogène, régulier et très prédictible. C'est un instrument privilégié au moment où la tendance se profile nettement en faveur de volet mince.

Il semble que d'autres domaines de l'ophtalmologie puissent bénéficier de l'apport de ce laser, dans les années à venir, que ce soit les greffes de cornée ou la chirurgie des glaucomes.

Le laser femtoseconde travaille avec des impulsions extrêmement brèves, de l'ordre de la femtoseconde. Cette faible durée d'impulsion permet d'éviter les effets thermiques. En effet le rayon laser est tellement bref qu'il ne peut pas faire bouger les atomes, il a en revanche comme effet d'arracher les électrons des atomes (ionisation) et donc de former des ions qui vont créer un plasma froid (mélange gazeux d'ions et d'électrons). L'énergie transférée aux électrons ne leur permet pas d'aller très loin, et on assiste à une recombinaison des ions dans un espace proche de l'ionisation. Cela va aboutir à la création de plus de 600.000 petites bulles de gaz contiguës.

Ce femto laser est un laser solide qui fonctionne dans l'infrarouge (1053nm), et qui permet une découpe améliorée du capot cornéen pratiquée dans la technique du lasik. Il offre même la possibilité d'une chirurgie sans instrument. On arrive en effet à créer une cavité intrastromale sans utilisation de microkératome.

Ce laser agit dans un milieu d'amplification solide et créant en unité femtoseconde des mini spots espacés de 5 à 12  $\mu\text{m}$  se rejoignant avec cavitation au sein du stroma cornéen (création de microcavitations contiguës). Les différents points de photodissection sont contrôlés par le repositionnement répété du foyer du laser. L'impulsion est courte: moins de 500 femtosecondes pour une puissance de  $10^9$  W [40].

La progression du tir s'effectue à partir de la charnière et va vers la profondeur avec une précision telle que la déviation standard théorique n'est que de  $\pm 4\mu\text{m}$  pour une déviation clinique de  $12\mu\text{m}$  (actuellement le système le plus précis). Une fois focalisé au plan choisi, il se produit une rupture à basse énergie sans effet thermique ni de souffle dans le plan lamellaire prédéterminé. Il n'y a pas d'ablation de tissu mais micro dissection intra lamellaire par création de bulles mixant de l'eau et du dioxyde de carbone. L'obtention de cet effet nécessite une grande vitesse photonique et des impulsions très denses pour permettre un claquage optique (caractérisé par la formation de micro bulles) par activation du champ électro-magnétique en conservant des volumes plasmatiques et ioniques voisins. A partir du point focalisé de l'impulsion, il se produit une onde provoquant la libération d'un gaz qui écarte les tissus, diffuse et se dilue en laissant à la fin de sa disparition une zone de mini ablation tissulaire. Le retentissement sur les couches tissulaires supérieures et inférieures est nul [41, 42].

Il y a une forte puissance de crête au niveau de l'impact (grâce à la faible durée de l'impulsion) qui génère une absorption multiphotonique importante dans le matériau: le milieu transparent devient localement absorbant. Le Laser crée ainsi des microcavitations contiguës modifiant ainsi la structure de la cornée. Ainsi sculptée elle permet à l'œil de retrouver une grande partie de ses capacités.

Pour avoir une idée de la puissance locale, on peut dire que l'impact est d'une puissance de 1MW, avec un taux de répétition de 10 kHz, une surface irradiée de  $1\mu\text{m}^2$ , une durée d'impulsion de 500 fs. On observe une énergie par impulsion de  $0,1\mu\text{J}$ , un fluence de  $10\text{J}/\text{cm}^2$ , et une puissance de crête de  $2.10^{13}\text{ W}/\text{cm}^2$ , soit 20 terawatts/ $\text{cm}^2$  ( $10^{12}$ ).

On a déjà travaillé sur des lasers qui délivrent des impulsions de durée encore plus brève, de l'ordre de l'attoseconde, soit  $10^{-18}$  seconde. En dehors des difficultés importantes pour mettre au point ce type d'attolaser, les électrons, recevant une très grande énergie, vont être très accélérés et traverser des distances importantes. Ils seraient responsables de lésions organiques majeures (altérations de l'ADN, création d'ions oxydants), donc on peut penser qu'on ne s'en servira pas encore en médecine.

## **2.2. Utilisation en ophtalmologie :**

### **2.2.1. Les lasers femtosecondes commerciaux :**

C'est la société IntraLase Corp., Irvine, CA. qui a mis au point le laser ophtalmologique, d'une longueur d'onde de  $1\mu\text{m}$ , délivrant des impulsions d'une durée de 500 fs, après avoir mis une lentille contre la cornée pour aplanir celle-ci.

#### **✓ L'appareil IntraLase FS2 :**

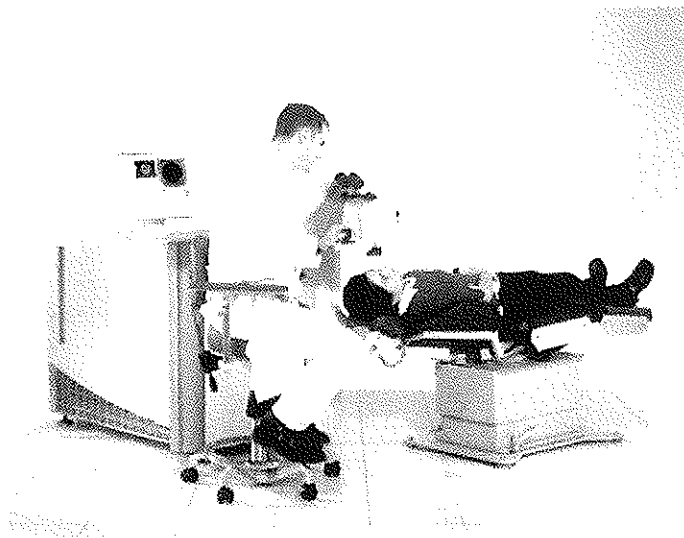
En 2004, il n'existe qu'une seule machine laser femtoseconde commercialisée marquée CE [43]. La firme IntraLase le construit aux Etats Unis et a déjà vendu près de 150 lasers FS 1.6 essentiellement et FS 2 depuis mai 2004 dont la majorité la première année aux USA. L'expérience est donc fondée sur les données américaines cliniques. Les premières machines sont arrivées en France en juillet 2004. Le FS 2 offre 3 modes de balayage pour la création de volets lamellaires. Le plus utilisé est en trame par déplacement à partir de la charnière. L'option poche est seulement utilisable avec ce mode et permet d'éliminer les bulles de cavitation en réalisant une résection au niveau de la charnière mais en dehors du périmètre de coupe.

Le coût de la machine est élevé: 400 000 € catalogue en France (Smart Optic). Chaque kit d'interface patient est à usage unique et offre un anneau comportant une lentille plane et est vendu à 150 € catalogue. C'est dire que la procédure est chère et demande une utilisation significative pour simplement couvrir le retour sur investissement. Seuls des établissements privilégiés ou des chirurgiens économisant sur leurs derniers deniers seront en mesure de s'équiper, rappelant un peu ce qui s'est déroulé avec les premiers lasers excimers. L'économie entraînée par l'absence de lames, de stérilisation de temps infirmier...ne couvre que partiellement la dépense.

La société 20/10 Perfect Vision propose aussi un laser femtoseconde qui ne demande pas d'aplanation, car une lentille courbe focalise le rayonnement dans la cornée, c'est le laser Femtek.

✓ **Le Laser Femtek :**

Ce dispositif est construit en Allemagne mais n'est pas distribué en France. Il n'est pas encore vendu et son homologation en marquage CE date de fin 2006. Son principe et ses mécanismes sont proches de L'intraLase. La fréquence de tir du Femtek est très inférieure à celle de L'intraLase FS2. Il en diffère surtout par l'anneau d'immobilisation qui ne demande pas d'aplanation puisque le tir assure son propre alignement par perpendicularité.



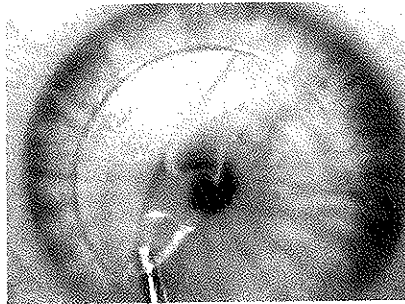
*20/10 Perfect Vision©  
All rights reserved*

Des études sont en cours dans tous les pays pour construire des machines. En France, Bordeaux possède un pôle de spécialisation technologique s'intéressant industriellement à cette question.

### 2.2.2. Buts de la technique :

La première utilisation a été la création d'un volet cornéen par lasik, sans utiliser de microkératome. Ces appareils mécaniques sont en effet délicats à manipuler et ils peuvent entraîner des problèmes per-opératoires (blocage en cours de coupe, mauvais contrôle de l'épaisseur du capot, débris métallique dans l'interface...) [44].

Le laser va permettre une découpe très régulière du capot cornéen, en créant une ligne nette de coupe à la profondeur désirée dans le stroma. C'est la vaporisation qui va être à l'origine des minuscules bulles. L'ophtalmologiste hongroise Imola Ratkay fut la première à utiliser ce laser sur des yeux humains. Elle a nommé la procédure femto-lasik.



*Soulèvement du capot  
Photo emedicine.com*

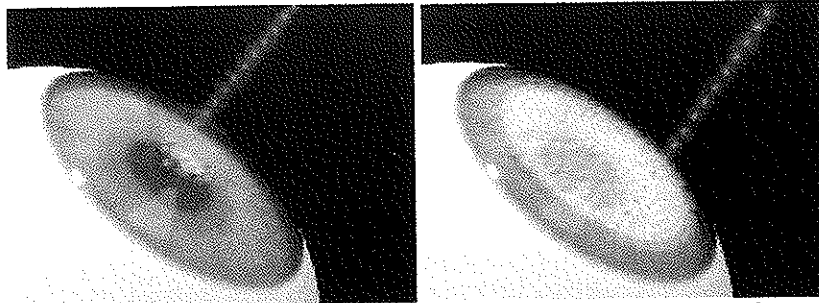
Le laser fut développé par le physicien hongrois Tibor Juhasz, qui est professeur à l'Université du Michigan et cofondateur de la société IntraLase. Dès 1999 la FDA américaine permit l'utilisation de ce laser en remplacement des microkératomes habituels.

Le laser est utilisé dans différents centres aux USA et en Europe, et doit être diffusé plus largement.

D'après le Dr Ratkay, cette technique permet une meilleure prédictibilité opératoire et un confort meilleur pour le patient. Comme il n'y a pas d'utilisation de lame coupante, il y a moins de risque de contamination et d'infection de l'interface, ou d'envahissement épithélial.

On obtient un meilleur contrôle de l'épaisseur du capot et de son diamètre. On peut aussi placer la charnière là où on le désire. Le dernier laser qu'elle utilise provoque la formation de bulles de 2 à 3 microns.

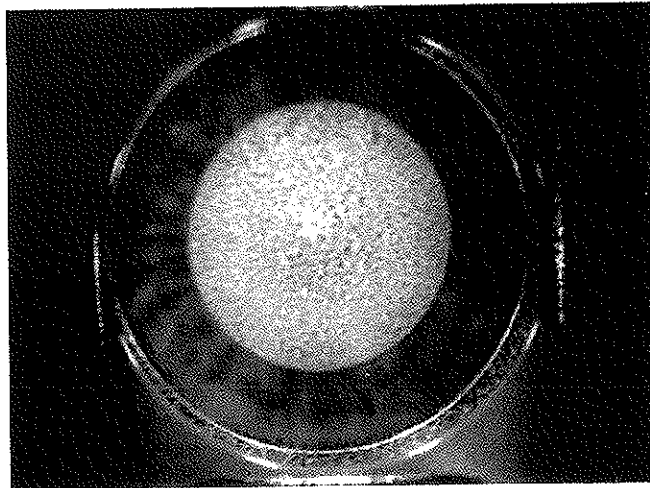
Pour la réalisation, l'ophtalmologiste place un anneau de succion pour maintenir l'oeil puis place un verre de contact spécial qui va aplatir la cornée. Le laser pourra alors agir, après vérification du centrage. A la différence du lasik habituel, la pression intra-oculaire ne monte que jusqu'à 30 mmHg durant le fonctionnement du laser. Le laser, jusqu'à présent était réalisé à partir du centre de la cornée, en colimaçon vers la périphérie, avec des impacts de 3 microns environ.



*Début du laser femtoseconde*

*Fin du laser femtoseconde*

*Images dues à l'obligeance de emedicine.com*



*Photographie en fin de laser*

*la zone (temporairement) blanchâtre correspond à la zone d'ablation*

Les récents lasers ont un fonctionnement différent, avec un balayage progressif frontal.



### 2.2.3. Réalisation :

L'immobilisation du globe est obtenue par la pose d'un anneau de succion et d'aplanation simple ne demandant aucun contrôle et dont le vide est créé par une simple seringue à usage unique. Ce n'est plus 65 mmHg comme avec les pompes conventionnelles mais simplement 30 à 40 mmHg, ce qui réduit les potentiels inconvénients maculaires.

Les avantages du femtolaser parlent d'eux mêmes: aucun risque infectieux n'existe en raison du caractère à usage unique du blépharostat et de l'anneau. L'absence de lames écarte tout risque industriel ou de manipulation. Aucune humidification n'est demandée. Surtout l'appareil, comme en informatique avancée, procure un WYSIWIG ( what you see is what you get). C'est à dire que les paramètres affichés sont ceux qui sont réalisés et ceci est quelque chose d'inconnu en dispositif mécanique où existe toujours un danger de décalage, d'altération ou de dimension inadéquate.

Mais il existe un revers: les bulles de gaz procédant d'ionisation ne peuvent s'évacuer rapidement que si la cornée est soulevée sinon elles persistent plusieurs dizaines de minutes. C'est la raison pour laquelle le tempo de l'opération demande une réflexion d'organisation. La gestion des flux de patients va être modifiée selon le modèle de l'allocation préalable de plages avec processus d'ajustement. Si le traitement laser excimer est immédiat, ce qui est possible, le patient doit être opéré sur le lit de ce laser avec pivotement vers le laser femtoseconde pour le premier temps. Il peut aussi être opéré dans une autre salle et être guidé durant quelques mètres vers la seconde salle. Sinon le patient attend la dissolution gazeuse et peut être opéré 20 minutes à deux heures plus tard. Heureusement, cet inconvénient est largement contre balancé par d'autres avantages.

Le laser Femtoseconde est précis: il arrive, dans les séries publiées, à la déviation standard la plus faible et une nette diminution des valeurs extrêmes. Cette propriété autorise donc à effectuer des volets de valeur définie et tout particulièrement des volets fins. Ces derniers sont recommandés en cas de cornée mince ou d'ablation importante et cherchant à conserver une grande zone optique. En effet, comme la zone de découpe périphérique est très peu large la zone d'ablation n'empiète plus sur elle et peut être grande.

L'association traitement aberrométrique et découpe IntraLaser n'a jamais fait l'objet d'une publication mais on ne discerne pas pour quelle raison elle ne pourrait pas se faire compte tenu de la qualité des résultats visuels et anatomiques connus.

La qualité du volet est surprenante: les plis et stries importantes sont exceptionnels. Le volet n'est pas toujours aussi translucide à 24 heures qu'avec une découpe mécanique mais elle se rétablit le jour suivant. Les ennuis épithéliaux ne sont plus décrits

Une contrainte existe: chaque appareil justifie une courbe d'apprentissage de la machine par le chirurgien car la sophistication optique est si grande que les réglages d'énergie ne sont pas les mêmes pour chaque machine. Le chirurgien se repose, au départ, sur des préconisations fabricants mais il doit adapter les facteurs selon les résultats obtenus. D'une manière générale les opérateurs réduisent l'énergie avec leur expérience ( en moyenne autour de 1,6 à 3,5 mJ ) afin d'écartier les réactions inflammatoires observées avec les tous premiers cas trop surexposés. La console permet de faire varier l'espacement entre les spots et donc de jouer sur le temps de découpe pour faciliter ou non le soulèvement.

La découpe est planar c'est-à-dire que la périphérie n'est plus ménisquée mais ici parallèle avec un bord droit ou angulé au mieux à 70°. La position de la charnière est au choix du chirurgien (souvent 45°). Le volet se remet donc en place non seulement très facilement mais avec une importante cohérence car les bords abrupts ne laissent plus de place à des variations de positionnement où à des plis. En cas de perte de succion il n'y a aucun risque de lacération, de trous...l'épithélium demeure intact. La reprise peut être immédiate en prenant soin d'alors ôter 0,1 à 0,2 mm au diamètre affiché et de désamorcer la poche.

Les lames de collagène du stroma cornéen se prêtent bien à un clivage gazeux dilacérant les appositions. La découpe d'un volet épais de 110  $\mu$  pour un diamètre de 9,3 mm demande environ 35 à 45 secondes y compris le temps de fente frontale. Le guidage sagittal s'effectue par scannérisation, le trajet de la berge est lui hélicoïdale. Cette dernière n'est jamais totale ouverte car il persiste des ponts peu résistants mais suffisamment encore adhésifs pour qu'il soit toujours nécessaire de recourir à une petite spatule pour soulever le volet.

En ce sens le volet laser est un peu plus long à réaliser (30 à 45 secondes de plus) et moins facile à lever qu'avec un microkératome. Mais une fois décollé sur une partie le reste vient à la manière d'un resoulèvement traditionnel.

#### 2.2.4. Avantages de la technologie femtolaser :

- ❖ Indépendance des découpes vis-à-vis des contraintes bio-mécaniques de la cornée :

La nature de l'interaction entre le laser et la cornée est théoriquement invariable en tout point du capot. Cette propriété assure une grande homogénéité des découpes et, grâce à l'aplanation, une indifférence totale vis-à-vis du rayon de courbure ou du diamètre cornéen. Il n'en est pas de même pour le microkératome mécanique dont la qualité de la découpe est reliée à des forces de frottement, de cisaillement, de compression qui sont mises en jeux de façon plus ou moins marquée aux différentes latitudes et longitudes des découpes.

- ❖ La prédictibilité de la profondeur et du diamètre des découpes est améliorée :

C'est là un des avantages principaux de la femto chirurgie et c'est aussi le point noir des microkératomes mécaniques actuels. L'incertitude dans l'épaisseur du capot est directement liée à la multiplicité des facteurs déjà cités et influençant la prédictibilité de la découpe par le microkératome mécanique. Dans ces conditions, la marge d'erreur moyenne se situe entre 20 et 80  $\mu\text{m}$ . Avec le laser femtoseconde, l'épaisseur du capot est calibrée à 10  $\mu\text{m}$  près à partir du plan antérieur d'aplanation, soit au moins de manière deux fois plus précise qu'avec les meilleurs lames. La profondeur de découpe n'est influencée que par la qualité de focalisation du point de claquage optique. La limite de précision théorique du positionnement des découpes du laser est de l'ordre de 10 à 20  $\mu\text{m}$ .

- ❖ Liberté géométrique du profil des découpes :

D'un point de vue mécanique, la congruence des interfaces lors du repositionnement des découpes est un élément décisif pour le succès de la chirurgie cornéenne. Celle-ci dépend intimement de la netteté et de la géométrie du profil de la découpe. Les résultats des études pour le Lasik montrent qu'au niveau des berges du capot et de son lit stromal, le tranchant de la découpe par le laser femtoseconde est au moins aussi bon qu'avec les microkératomes mécaniques. De plus, avec le laser femtoseconde l'interface de découpe

est constamment parallèle à la surface. Cette liberté permet de diminuer le risque d'instabilité du capot. Le diamètre du capot, la localisation et la largeur de la charnière deviennent des paramètres beaucoup plus prévisibles. Le risque d'invasion cellulaire anormale par les berges est spontanément diminué du simple fait de la diminution du risque d'érosions épithéliales pendant la découpe et de la géométrie des berges qui est nette et angulée.

#### ❖ Le confort du patient et du chirurgien :

Avec l'outil laser, le besoin d'induration du globe est faible pour la découpe. Il n'y a aucun mouvement mécanique au dessus du globe, pas de douleur induite. La programmation informatique est simple. La visualisation de la découpe est instantanée par la fenêtre d'aplanation. L'incidence des complications per opératoire du LASIK liées au microkératome mécanique peut varier entre 0.4 et 19.8% selon les études. Avec le laser, le risque d'anxiété du chirurgien est limitée par le faible risque de complications (0.5%) [45].

#### ❖ Les dépôts dans les interfaces :

Le passage d'une lame favorise la présence des dépôts dans l'interface. Avec, le laser femtoseconde aucun élément exogène n'est apporté durant la découpe dite « sèche ».

#### ❖ Des cas plus difficiles peuvent être traités :

Avec le laser femtoseconde, il est possible d'opérer avec plus de sécurité des sujets difficiles à traiter par le Lasik conventionnel porteurs d'un astigmatisme, d'une hypermétropie, d'une presbytie, d'une cornée trop fine, trop petite, trop cambrée ou trop plate. La possibilité de créer un volet fin (90 au lieu de 160 microns avec le microkératome) d'une épaisseur prévisible (variations de 15 au lieu de 50 microns) et de qualité (épaisseur constante, régularité) permet de traiter les sujets qui ont une cornée trop fine pour pouvoir bénéficier du Lasik traditionnel. Il est indispensable dans ces cas de faire suivre la découpe d'un volet fin avec le laser femtoseconde d'un traitement de la cornée par un programme d'économie tissulaire Zyoptix "tissue saving" qui permet de

creuser la cornée de 25% plus. Les fortes myopies, en particulier, qui ne pouvaient être opérées jusqu'à présent par le Lasik qui affaiblissait trop la cornée, peuvent maintenant l'être en toute sécurité. En effet, le volet soulevé avec le laser femtoseconde peut être beaucoup plus fin (90 microns au lieu de 160 microns), permettant ensuite de traiter une plus grande épaisseur de cornée avec le laser excimer donc une myopie plus forte. Là aussi, le programme d'économie tissulaire Zyoptix "tissue saving" est indispensable pour moins affaiblir la cornée.

Donc on peut résumer les avantages de cette technique dans les réalisations de capots :

- diminution des incidents liés à l'utilisation des microkératomes,
- absence d'hyperpression intraoculaire dans le maintien de l'oeil,
- découpe de grande qualité,
- interruption possible de la procédure sans dégât,
- amélioration de la géométrie du capot,
- diminution des risques d'invasion épithéliale et de sécheresse oculaire,
- diminution du risque infectieux,
- possibilités d'opérer de nouveaux cas plus complexes.

### 2.2.5. Inconvénients de la technologie femtolaser :

#### ❖ La transparence cornéenne :

Les variations locales de l'hydratation et de la densité du stroma sont d'un ordre de grandeur insuffisant pour modifier le seuil CO. La diminution de la transparence cornéenne peut en revanche entraîner une dispersion de l'intensité du rayonnement en amont du point de focalisation et par là inhiber la formation du plasma au point de focalisation.

#### ❖ Le stress acoustique :

Ce stress acoustique lié à l'onde de choc est bien moindre que celui imposé par le laser excimer. Cependant vis-à-vis des cellules du stroma (kératocytes), il vient s'ajouter à ce dernier.

#### ❖ Les effets thermiques :

Théoriquement minimales du fait de la brièveté des impulsions.

#### ❖ La production intrastromale de gaz :

Heisterkamp a analysé en chromatographie gazeuse et spectrométrie de masse le contenu gazeux des cavités cornéennes photodisrompues avec des impulsions femtosecondes. Il retrouve d'une part un mélange de H<sub>2</sub> et de O<sub>2</sub> attribué à la dissociation moléculaire de l'eau et d'autre part un mélange de CO, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub> attribué à la dissociation des macromolécules du stroma. Le transfert de gaz perméables dans le stroma entraîne un retard de réhabilitation visuelle. Il induit une perte de transparence liée à un œdème transitoire.

#### ❖ Les effets collatéraux de l'absorption non linéaire :

De rares apparitions de stries tissulaires au niveau des interfaces découpées ont été décrites. Ces stries sont dues à un effet optique non linéaire du rayonnement femtoseconde appelé « autofocalisation ». Cependant en optimisant les paramètres des lasers, ce phénomène a disparu.

❖ Un prix élevé de l'appareillage, et donc de la procédure :

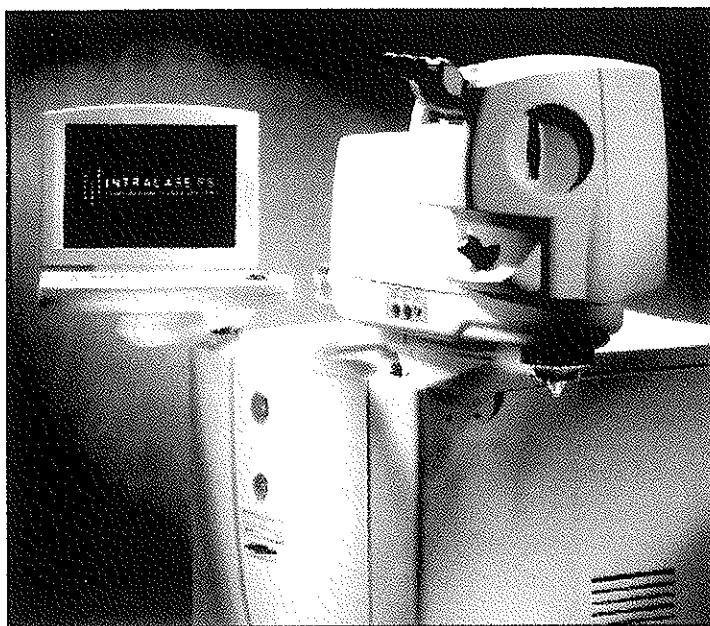
L'appareil type intralase Fs2 coûte environ 400000 euros.

❖ Un nouveau syndrome :

Spécifique de l'utilisation du laser femtoseconde, il s'agit du GAPP (good acuity plus photophobia) encore appelé TRISC (track-related iridocyclitis and scleritis) ou encore TLS (transient light sensitivity). Cette nouvelle entité se manifeste par une sensibilité transitoire à la lumière, le plus souvent modérée mais parfois plus sévère, qui survient deux à six semaines après un laser femtoseconde. Ce syndrome n'affecte pas l'acuité visuelle et son incidence est très faible (inférieure à 1/1000) avec les lasers de dernière génération (15 kHz). À l'examen, l'oeil n'est pas rouge et il n'existe aucun signe d'inflammation tant dans l'interface que dans la chambre antérieure. Son étiopathogénie reste mystérieuse. Elle est probablement liée à l'utilisation d'un niveau d'énergie trop élevé et à la diffusion de bulles de cavitation jusqu'à la racine de l'iris provoquant la libération locale de cytokines expliquant la photophobie. Il est très sensible à l'action des corticostéroïdes locaux et régresse toujours après quelques jours ou quelques semaines dans les formes les plus intenses. Sa prévention passe par un bon réglage du niveau d'énergie et un traitement corticostéroïde post opératoire systématique à raison de quatre instillations quotidiennes pendant deux semaines.

## 2.2.6. Nouveautés 2006 :

*La technologie Intralase® FS 60 (pour femtoseconde)*



Le FS60 en est le plus remarquable de ses représentant, améliorant très nettement les performances de son prédécesseur, le FS30.

Plus efficace, plus précis et plus sûr, il représente l'avenir du Lasik. Le laser femtoseconde se pratique sous anesthésie topique et ne dure rarement plus de 19 secondes. Les avancés du laser femtoseconde intralase associent 3 progrès : rapidité, baisse de l'énergie délivrée, fiabilité.

On peut schématiser l'action des modèles intralase (marquage CE) :

Modèle	Consommation (en mJ)	Rapidité d'action
Intralase FS 2 (2004)	Supérieure à 2 mJ	55 secondes
Intralase FS 3 (2005)	Supérieure à 1.7 mJ	35 secondes
Intralase FS 60 (Octobre 2006)	Inférieure à 0.7 mJ	19 secondes



Le laser FS 60 est beaucoup plus rapide que le FS2 et demande moitié moins d'énergie pour le même résultat. Ainsi les risques inflammatoires sont encore plus réduits. Le laser FS 60 offre une sécurité supplémentaire car son système comporte un cône unique par œil.

Le contact avec l'œil n'est pas supprimé car pour éviter tout mouvement intempestif un anneau de succion bloque le globe oculaire tout en permettant un aplanissement de la cornée offrant un plan parfait à la découpe laser. L'anneau est à usage unique. La découpe est planar ainsi la périphérie n'est plus ménisquée mais parallèle avec un bord droit ou angulé au mieux à 25°.

En cas de perte de succion, il n'y a aucun risque de lacérations, l'épithélium demeure intact et la reprise peut être immédiate.

Aussi l'ablation laser excimer peut maintenant suivre la découpe au laser femtoseconde.

Pour résumer, ce système permet un LASIK tout laser, il inclue 2 lasers (excimer et femtoseconde) et raccourci le temps de l'opération.

Cependant avec ce nouveau système, le coût de l'opération augmente (pièces stériles) (+15% soit environ 1500 euros par œil).

C'est donc une belle évolution en terme de sécurité et en gain de temps.

## 2.2.7. Le futur :

### ✓ **Les tunnels cornéens**

La pose des implants cornéens pour le traitement des petites myopies ou des kératocônes frustes va bénéficier largement de ce laser Femtoseconde. En effet le tunnel demande une durée de 15 secondes pour être réalisé sans aucun risque de fausse route et en conservant la situation et profondeur adéquate. Cette facilitation ouvre la porte au procédé additif qui était jusqu'ici contraint par la difficulté de réalisation mécanique.

### ✓ **Les lentilles intracornéens**

Le traitement actuel des hypermétropies repose dans certains cas sur la pose d'un inlay\* c'est à dire d'une petite lentille correctrice glissée dans le stroma cornéen. Au delà des considérations sur la tolérance et le bien fondé de la technique, la création de la poche par laser femtoseconde rend l'opération très simple et facilement réversible.

Les premiers résultats sont très prometteurs. La lentille bi ménisquée est épaisse de 25 à 60  $\mu$  en son centre et de 10  $\mu$  en périphérie. C'est un matériel acrylique hydrophile Nutrapore\* de PermaVision\* à 78 % dont l'optique mesure 5 mm et possède un indice de réfraction de 1,375 avec micropores > 1000 MW. La méthode ne s'adresse qu'aux hypermétropes < 6 dioptries. Marquage CE effectif et début des cas cliniques débuté en France en mai 2004.

#### ✓ **Un laser réfractif direct ?**

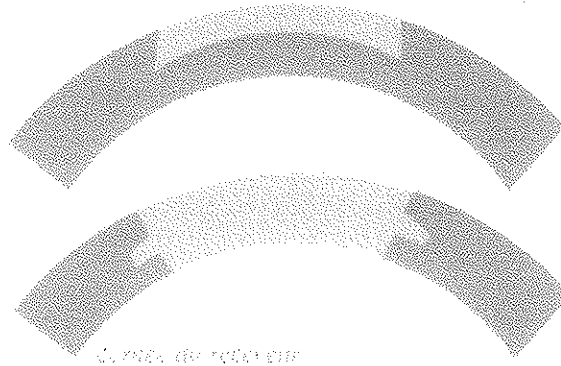
Ce n'est pas impossible et l'une des pistes est, par exemple, de réaliser un tunnel large, circulaire, en milieu de périphérie cornéenne, pour traiter par simple effet de photodisruption-ablation une compensation hypermétropique. Les réglages de l'appareil sont cruciaux car il y a des relations étroites entre l'énergie et les effets créés et il est possible de jouer entre eux. Pour les petites myopies il sera peut-être possible de procéder ainsi en cas de retouche pour sous correction.

#### ✓ **Greffes de cornée**

##### **La kératoplastie lamellaire profonde**

Elle constitue une bonne indication car il n'y a pas de limite à la profondeur de la découpe. Les premiers cas commencent à être décrits. La congruence sera si bonne que la question de l'astigmatisme sera résolue de façon très significative. La durée de l'intervention est aussi très raccourcie. La greffe endothéliale cornéenne est aussi l'une des voies d'approche.

On peut imaginer une utilisation nouvelle de ce laser, par la création d'un tenon et d'une mortaise au niveau du donneur et du receveur. Il serait ainsi peut-être possible de ne pas mettre de fils, à l'origine de l'astigmatisme parfois important qui altère la vision du patient.



*Cornée de receveur*  
*Profil de greffe lamellaire*  
*& profil de greffe pleine épaisseur*  
*en tenon-mortaise*

### ✓ Glaucome

Des essais ont déjà été réalisés pour utiliser le femto-laser dans la création de trappes ou de tunnels intra-scléreaux.

## 3. Conclusion :

Au terme de cette mise au point, il apparaît que les principaux avantages du femto laser sont sa précision, sa sécurité et sa flexibilité. Le lasik au laser femtoseconde est particulièrement intéressant dans les cas difficiles, pour la correction de l'hypermétropie-presbytie, de la forte myopie et de l'astigmatisme.

Son seul inconvénient est la possibilité rare d'apparition d'une sensibilité à la lumière 3 à 6 semaines après la chirurgie, transitoire, disparaissant après quelques jours de traitement par collyre. Cet effet devient encore plus rare avec l'apparition récente d'un nouveau laser femtoseconde Intralase FS 4 ou FS 60 qui remplace le laser femtoseconde FS2 (15 Hz) et FS 3 (30 Hz). Il permet, grâce à une fréquence accrue (60Hz), une découpe du volet plus rapide (20 secondes au lieu de 55 avec le FS 2 et 35 secondes avec le FS 3). Le FS 4 ou FS 60 permet un meilleur confort pour le patient, une dissection du volet plus facile et plus rapide, moins de délivrance d'énergie à la cornée donc moins d'inflammation, des suites opératoires encore plus simples et plus de précision et de sécurité.

# C. Applications à la physique de l'atmosphère

La propagation des impulsions laser femtosecondes intenses, dans un milieu non linéaire (l'air), tend à s'autoguider sur de longues distances. Ces impulsions génèrent un large spectre et ionise l'air traversé. Ces propriétés sont à la base d'applications pour la télédétection de polluants et le contrôle de la foudre.

## 1. Contexte :

La caractérisation à distance de l'atmosphère est nécessaire pour déterminer sa composition chimique et pour étudier les processus dynamiques comme le réchauffement global, le trou d'ozone, la pollution urbaine. Une première approche consiste à effectuer des mesures locales, par exemple avec un spectromètre de masse embarqué dans un ballon sonde ou un avion. Ce type de méthode peut fournir des données très variées mais il est trop coûteux pour des mesures régulières.

La deuxième approche consiste à utiliser la spectroscopie optique pour sonder l'atmosphère sur un long trajet optique. La spectroscopie infrarouge de Fourier (FTIR) ou la spectroscopie optique d'absorption différentielle (DOAS) fournissent des données précises sur l'abondance de vastes groupes de constituants atmosphériques, en utilisant l'absorption à la lumière du Soleil ou de la Lune sur son chemin à travers l'atmosphère. Mais ce chemin est fixé par la position de la source lumineuse utilisée. Au contraire, le Lidar (light detection and ranging) utilise la rétrodiffusion par l'air de la lumière émise par un laser impulsif. Le rayon laser pouvant être orienté, il n'a pas un chemin prédéterminé, ce qui lui permet de fournir des cartes tridimensionnelles de concentrations de gaz traces atmosphériques (NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, benzène.....) ou d'aérosols (suies issues de combustion, nuages stratosphériques polaires).

Cependant le Lidar est généralement limité à la mesure d'une espèce à la fois.

**Exemple :** le lidar à absorption différentielle (DIAL) utilise deux lasers pour détecter un polluant gazeux. L'un émet une longueur d'onde absorbée par l'espèce à mesurer, tandis que l'autre est réglé sur une longueur d'onde voisine non absorbée par l'espèce à mesurer. La différence dans la décroissance du signal à ces deux longueurs d'onde est directement liée à la concentration du polluant recherché.

La technique de mesure idéale combinerait le large spectre du DOAS et du FTIR, avec la résolution spatiale du lidar. Elle permettrait par ailleurs une mesure à distance des aérosols, naturels ou artificiels, sans l'apport d'informations extérieures.

Afin de mettre au point ce système idéal, L. Wöste et R. Sauerbrey ont eu l'idée de produire à distance une « lampe blanche » en générant un plasma, grâce à un laser femtoseconde focalisé dans l'atmosphère. Les lasers ultrabrefs couplés à une impulsion laser de forte puissance peuvent créer des régions de très forte intensité sur de très grandes distances.

Afin d'atteindre la puissance nécessaire à la distance voulue, ils ont émis des impulsions laser de 100 fs, avec une puissance de 3 TW, légèrement focalisées dans l'atmosphère et avec un chirp négatif, c'est-à-dire que les longueurs d'onde les plus courtes précèdent les plus longues à l'intérieur de l'impulsion. Au lieu d'un plasma focalisé au foyer, ils ont observé un long filament de lumière blanche (figure 8), similaire à des observations à plus courte échelle au laboratoire. Le faisceau était clairement visible à l'œil nu bien que le laser émette dans l'infrarouge, autour de 800 nm. Ce filament de lumière blanche était visible même lorsque le laser n'était pas focalisé. Son spectre s'étend de l'ultraviolet à l'infrarouge et son signal a pu être détecté depuis des altitudes dépassant 10 km.

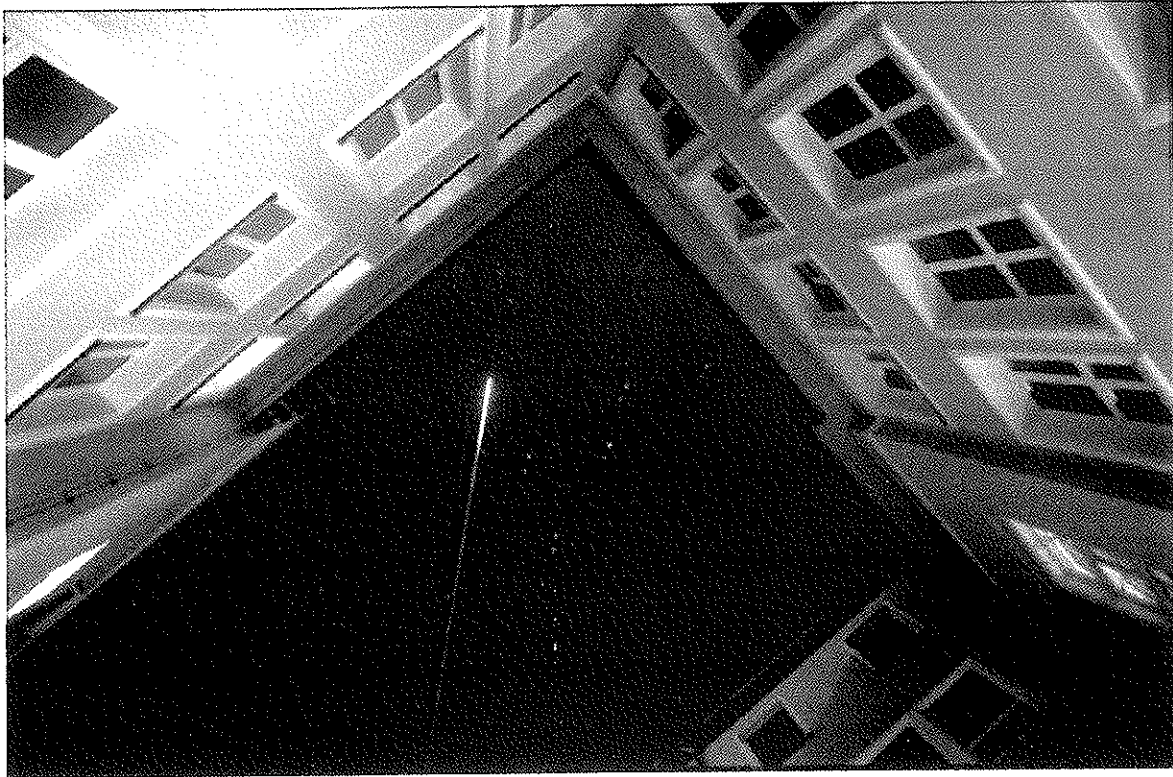


Figure 8 : *filament de lumière blanche générée par dans l'atmosphère par un laser femtoseconde térawatt émis à 800 nm (Photo K. Wedekind)*

Ce nouveau mode de propagation non linéaire (due à l'autoguidage de l'impulsion) et ses perspectives d'applications à la télédétection ont amené au projet TéraMobile. TéraMobile est un projet international de grande envergure initié par une collaboration franco-allemande entre le CNRS et la DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft). Aujourd'hui soutenu par l'ANR, il implique cinq laboratoires :

- LASIM (CNRS/Université Lyon 1, J. P. Wolf)
- Université libre de Berlin (L. Wöste)
- Université de Jena (R. Sauerbrey)
- LOA (CNRS/X/ENSTA, A. Mysyrowicz)
- GAP (Université de Genève (J. P. Wolf)

Ce projet débuté à la fin des années 90, vise à démontrer la faisabilité d'un Lidar multicomposant basé sur des impulsions laser ultrabrèves, pour la mesure de polluants gazeux ou d'aérosols atmosphériques.

## 2. Le TéraMobile :

### 2.1. Généralités :

Le laser TéraMobile a été le premier, et est aujourd'hui encore le seul laser femtoseconde-térawatt mobile au monde [47, 48]. Cette mobilité a imposé une conception particulièrement compacte du laser. De plus, les contraintes d'environnement imposées par un tel laser sont draconiennes, et ont présidé à la conception du TéraMobile. Il est conçu comme un système autonome contenant toutes les optiques d'émission et de réception nécessaires pour émettre le faisceau dans l'atmosphère et caractériser sa propagation horizontale ou verticale, ou détecter le signal Lidar dans diverses configurations. Cet outil est très polyvalent afin de permettre son utilisation dans les diverses conditions expérimentales nécessaires aux expériences de physique appliquée à l'atmosphère. On dispose ainsi d'un système ouvert pour des évolutions futures ou des applications non prévues lors de la conception.

### 2.2. Le système :

Le laser TéraMobile repose sur la technique désormais classique de l'amplification à dérive de fréquences, (CPA, chirped pulse amplification, Figure 9). Cette technique permet de produire des impulsions laser dont l'intensité est plus élevée que le seuil de dommage des matériaux amplificateurs. Pour cela, la puissance crête des impulsions est artificiellement réduite en étirant temporellement l'impulsion laser pendant son amplification, en lui imprimant un glissement de fréquence ou chirp dans un élément dispersif, l'étireur. En fin de chaîne, les impulsions sont recomprimées dans un élément dispersif symétrique de l'étireur, le compresseur, et retrouvent leur durée initiale.

Si la technique CPA en elle-même est classique, son intégration dans l'espace réduit du conteneur, où le laser dispose de seulement  $7 \text{ m}^2$ , a nécessité un agencement particulièrement compact des composants et une réduction de la taille du compresseur. Le système TéraMobile est constitué d'une chaîne laser femtoseconde térawatt logée dans un conteneur de dimension standard. Il peut ainsi être transporté facilement afin de réaliser des campagnes expérimentales.

Le TéraMobile est constitué de deux pièces isolées : une salle de contrôle qui sert de sas et le laboratoire qui contient tous les instruments optiques. Le rôle du sas est très important

puisque'il assure le contrôle thermique et garantit une grande propreté au laboratoire et donc aux optiques.

Le laboratoire contient en plus du système laser les alimentations électriques puisque'il faut rappeler que la mobilité du Téra-mobile implique que les scientifiques aient tout leur matériel avec eux.

Un système de sécurité contrôle le fonctionnement du laser et peut à tout moment bloquer le faisceau sur ordre de détecteurs adaptés pour les expériences. Il est donc possible de repérer un mouvement et même le passage d'un avion.

On résumera ces caractéristiques dans le tableau suivant :

Longueur d'onde centrale	793 nm
Largeur de bande	16 nm
Énergie par impulsion	350 mJ
Durée d'impulsion	70 fs sech <sup>2</sup>
Puissance crête	5 TW
Fréquence de répétition	10 Hz
Diamètre du faisceau en sortie	30 à 50 mm
Réglage du <i>chirp</i>	70 fs à 2 ps, (positif ou négatif)
Stabilité de l'énergie	2,5 % RMS sur 400 tirs
Dimensions	3,5 x 2,2 m

*Caractéristiques du téra-mobile*

#### ❖ Le principe du CPA :

Le principe du laser CPA et son agencement dans le laboratoire mobile sont résumés sur la Figure 9. Les impulsions ultrabrèves sont produites dans un oscillateur Ti:saphir (Compact Pro, Femtosource), puis allongées temporellement dans un étireur et amplifiées dans une chaîne composée successivement d'un amplificateur régénératif et de deux amplificateurs multipassages. L'impulsion est ensuite recomprimée temporellement dans un compresseur avant d'être émise dans l'atmosphère. À ce stade, tous les composants optiques sont réfléchifs pour éviter les dommages dus à la très forte intensité des impulsions. Les diagnostics sont installés au-dessus de la table, où de l'espace est réservé pour des instruments supplémentaires nécessaires ponctuellement pour des expériences spécifiques.



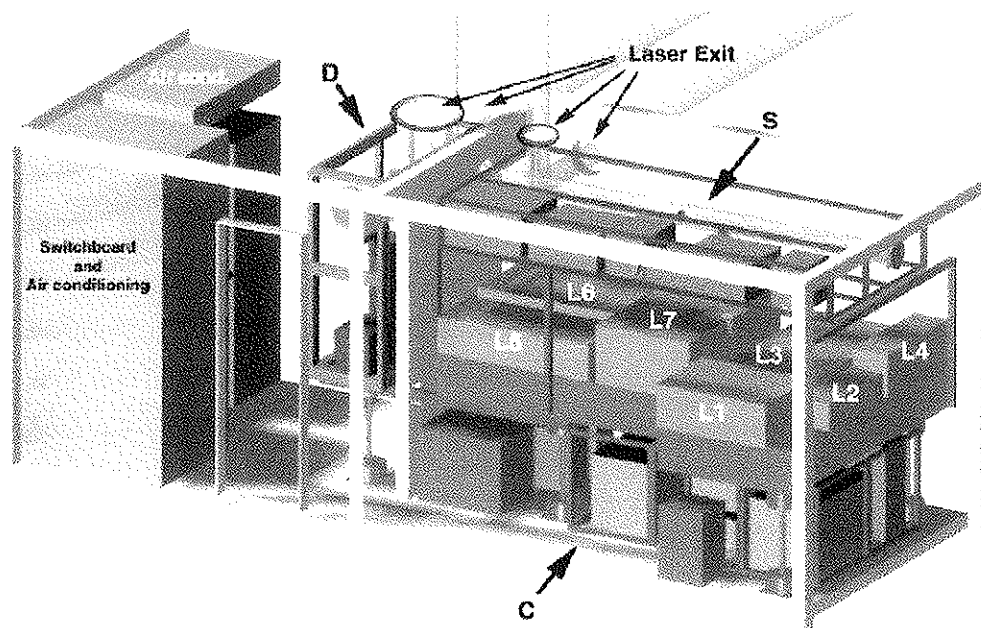


Figure 9 : Schéma d'implantation du TéraMobile. Le système laser est composé d'un oscillateur (Femtosource Compact Pro) pompé par un laser YAG (Verdi, Coherent) (L1), un étireur (L2), un amplificateur régénératif et un préamplificateur multipassages (L3) pompés par un YAG (Compact, Thales) (L4), un second amplificateur multipassages (L5) pompé par deux lasers YAG (SAGA, Thales) (L6), et un compresseur (L7). Les alimentations électriques des lasers et leurs échangeurs de chaleur sont installés sous la table dans un compartiment isolant (C). L'optique d'émission (S) et l'électronique de contrôle sont placées au-dessus de la table. Le système de détection (D).

#### ❖ Compensation de la dispersion de la vitesse de groupe :

S'il sert, comme dans toute chaîne CPA, à recomprimer les impulsions laser une fois amplifiées, le compresseur du TéraMobile a également un rôle spécifique lié aux expériences à longue distance. En effet, les applications atmosphériques des impulsions laser ultrabrèves impliquent de longues distances de propagation, parfois de l'ordre de plusieurs kilomètres. À cette échelle, la dispersion de la vitesse de groupe (DVG) dans l'air ne peut pas être négligée. Sur 1 km de propagation, la DVG dans l'air étire les impulsions émises par le TéraMobile. D'une durée initiale de 70 fs et d'une largeur de bande intrinsèque de 16 nm, on obtient des

impulsions fortement *chirpées*, d'une durée de 1 ps. Ce *chirp* réduit d'un facteur 10 la puissance de l'impulsion.

Cependant, ce handicap peut être tourné à notre avantage. En effet, il est possible de dérégler le compresseur de manière à émettre des impulsions dont le *chirp*, dit *néglatif*, sera compensé au premier ordre par la DVG de l'air sur une distance prédéterminée (Figure 10). Dans ce but, l'un des réseaux du compresseur du Téra-mobile est monté sur une platine motorisée, dont la course de 50 mm permet, à raison d'un *chirp* nominal de 43 fs/mm, de précompenser la DVG sur des distances allant jusqu'à 1,5 km [49, 50]. Il est ainsi possible de contrôler la distance à laquelle la filamentation pourra se produire.

En effet, lorsqu'une impulsion laser intense d'une centaine de femtosecondes se propage dans l'air, on observe expérimentalement la formation d'un filament. Le faisceau s'autofocalise et forme une structure très étroite d'une centaine de  $\mu\text{m}$  de diamètre. L'impulsion est alors capable de se propager par auto-guidage sur plusieurs dizaines de mètres en ionisant l'air sur son passage, avec une intensité atteignant  $10^{14} \text{ W/cm}^2$ .

Cependant, un autre paramètre doit être pris en compte lorsque l'on souhaite contrôler la position du début de la filamentation : malgré le *chirp* qui réduit sa puissance, il se peut que l'impulsion atteigne la puissance critique et commence à s'autofocaliser [51]. Dans ce cas, la filamentation se produira avant que l'impulsion ne soit refocalisée temporellement, mais à une distance plus grande que celle nécessaire à filamenter une impulsion non *chirpée*.

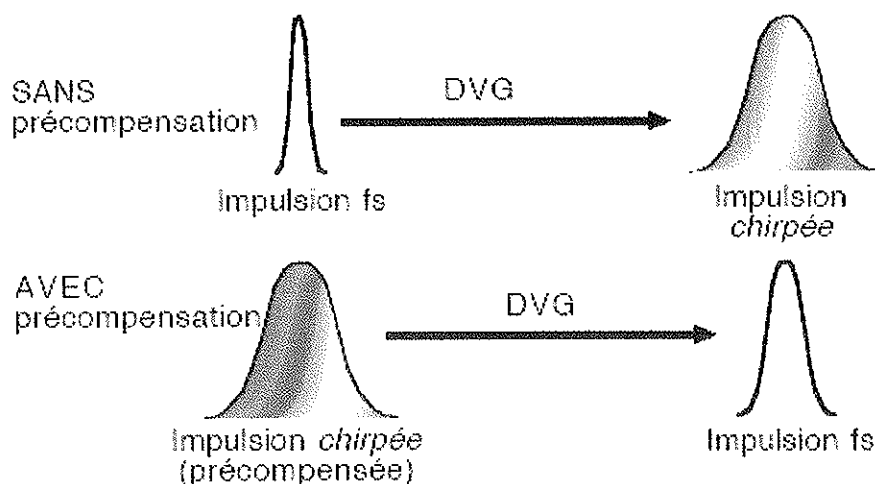


Figure 10 : Principe de la précompensation de la dispersion de la vitesse de groupe.

❖ L'optique d'émission :

Les impulsions laser sont transportées de la sortie du compresseur aux hublots d'émission du laboratoire mobile par un système optique entièrement réfléchitif, de manière à éviter toute dégradation du faisceau à la traversée de milieux transparents. Ce système d'émission permet également de régler le diamètre initial du faisceau et sa focalisation. En effet, ces paramètres ont une grande influence sur la distance à laquelle la filamentation se produit. Ainsi, étendre le faisceau réduit son intensité, et permet d'éviter que le faisceau ne s'auto-focalise à courte distance, voire endommage la fenêtre de sortie du laboratoire mobile [52, 53]. De même, la focalisation et le diamètre initial du faisceau sont essentiels pour contrôler la distance de filamentation (via la formule de Marburger). Ainsi les scientifiques ont créé un télescope (Figure 11) aux caractéristiques résumées dans ce tableau :

Distance focale	10 m à légèrement divergent
Grandissement	2,7
Diamètre maximum du faisceau	15 cm
Stabilité de pointé	0,1 mrad sur tout l'intervalle de focales accessibles
Angle hors-axe	6°
Longueur	2,5 m
Précision du mouvement de translation	12,5 $\mu\text{m}$

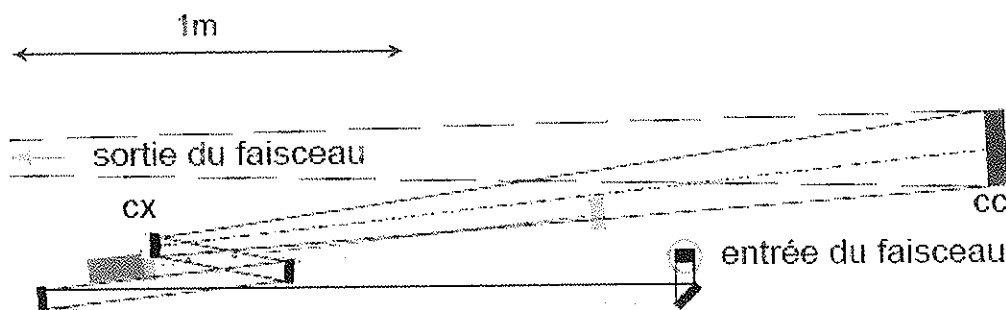


Figure 11 : Télescope d'émission.

Ce télescope est basé uniquement sur des optiques réfléchives équipées de traitements diélectriques, de manière à éviter tant les dommages aux optiques que la distorsion du front d'onde. Pour minimiser les aberrations, le télescope s'étend sur toute la longueur de la salle

laser. Il est installé au-dessus de la table du laser, à laquelle il est rigidement lié. Sa géométrie en Z permet de régler la focalisation grâce à un unique mouvement de translation. Le télescope peut également être court-circuité pour émettre directement un faisceau d'environ 3 cm de diamètre. Le faisceau peut être émis soit verticalement pour des mesures dans l'atmosphère, soit horizontalement afin de le suivre continûment tout au long de sa propagation. Il peut également être émis au travers du système de détection Lidar de manière à réaliser des mesures coaxiales [54]. Le faisceau peut être balayé sur  $\pm 10^\circ$  à chacune de ces fenêtres d'émission puis couplé à un système externe de balayage tridimensionnel qui permet d'émettre le faisceau laser dans une direction arbitraire.

### 3. Le laboratoire mobile «Téramobile» :



*Le Téramobile (Tautenburg)*

Le laser Téramobile et son équipement sont installés dans un conteneur maritime standard. Les lasers fs-TW étant particulièrement sensibles aux vibrations mécaniques et aux chocs, l'ensemble du système optique, y compris les télescopes d'émission et de réception, comme une seule unité rigide, liée à la structure extérieure du conteneur par des systèmes d'amortisseurs en caoutchouc [55, 56]. Cette suspension permet de transporter le Téramobile partout dans le monde et de l'utiliser dans pratiquement n'importe quelles conditions météorologiques. Depuis 2001, le Téramobile a été utilisé dans des conditions d'altitude, de température, d'humidité et de précipitations très diverses, de la neige de Tautenburg aux sommets du Nouveau Mexique à 3200 m d'altitude.

Le laboratoire mobile a été conçu avec Impres GmbH (Bremen, Allemagne) et sa construction a été assurée par TSU (Bremerhaven, Allemagne).

Le laboratoire est divisé en deux pièces, le mur de séparation assurant l'isolation thermique et électromagnétique. La première pièce est réservée au laser, ainsi que l'alimentation électrique des lasers de pompe, les électroniques de contrôle, les diagnostics et le télescope d'émission. La seconde pièce accueille la détection Lidar ainsi que les fonctions d'infrastructure telles que la distribution électrique, le conditionnement d'air, la distribution

d'eau de refroidissement et un espace de stockage. Cette pièce sert également de salle de contrôle pendant les expériences.

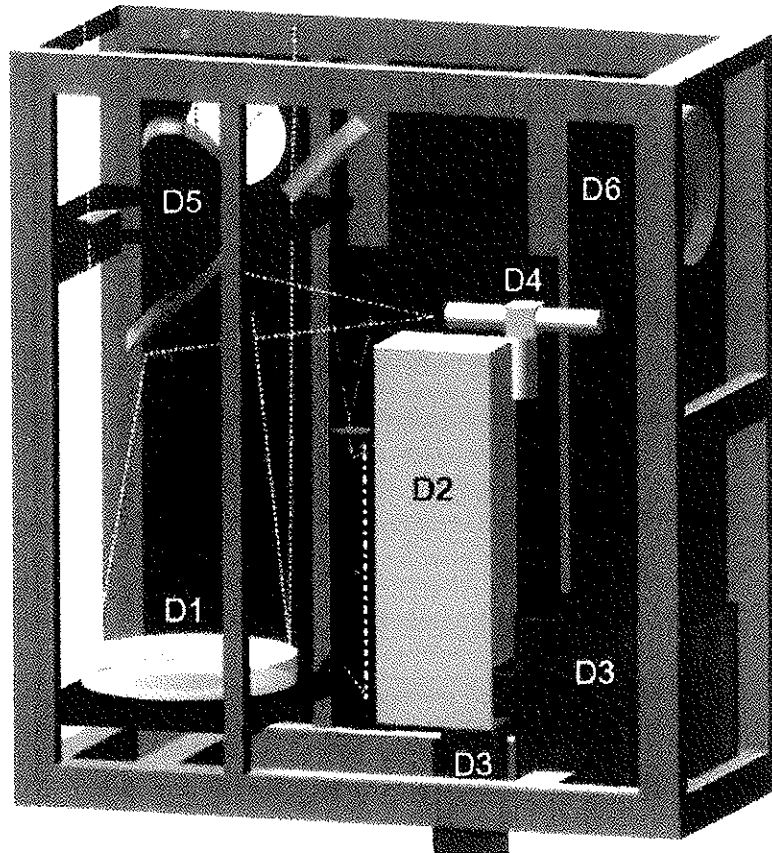
Pour assurer un fonctionnement stable du laser femtoseconde, le contrôle de la température est séparé en trois volumes découplés :

- la salle de contrôle, qui joue un rôle de sas
- la salle laser, où la stabilité de la température est la plus critique
- un caisson étanche et isolé sous la table laser, refroidi par un échangeur de chaleur air-eau dédié, et qui regroupe l'ensemble des alimentations des lasers de pompe, gros producteurs de chaleur.

Grâce à son dimensionnement généreux, le conditionnement d'air permet par tous les temps d'ouvrir complètement les hublots d'émission du laser, de manière à éviter les effets non-linéaires dans la vitre elle-même [58].

La sécurité oculaire est toujours une question essentielle dans les applications des lasers. Un laser térawatt dans le proche infrarouge, comme le TéraMobile, ne peut par définition pas respecter les normes en la matière. Un Lidar auxiliaire est donc nécessaire pour détecter les aéronefs qui pourraient passer dans le faisceau, et arrêter le laser afin d'éviter tout accident.

## 4. Systèmes de détection :



*Figure 12 : Détection Lidar du système TéraMobile. Miroir primaire (40 cm, D1) ; spectromètre (Chromex 500ism,  $f = 500$  mm) monté verticalement (D2) et équipé de deux détecteurs : ICCD (Princeton) et photomultiplicateur (Hamamatsu) / photodiode à avalanche (Licel) (D3) ; canal de dépolarisation (D4) ; miroirs d'émission coaxiale (D5) ; télescope horizontal pour les mesures de propagation (D6).*

Le système interne de détection (Figure 12) est principalement conçu pour des mesures Lidar. Il peut fonctionner dans une configuration coaxiale ou bistatique. Le télescope de réception, de type Newton, est monté verticalement. Son miroir primaire a un diamètre de 40 cm. La détection est assurée par un spectrographe équipé au choix d'un CCD intensifié permettant des mesures résolues temporellement (donc spatialement) et spectralement, ou d'un photomultiplicateur ou d'une photodiode à avalanche fournissant une haute résolution spatiale. Un canal de dépolarisation est également disponible [59].

Un second télescope, horizontal, est également disponible pour des mesures de rétrodiffusion de la lumière blanche produite dans le faisceau laser, en lien avec des mesures

in-situ visant à caractériser le faisceau au cours de sa propagation. Chaque télescope peut être relié à chaque canal de détection par fibre optique. Les détecteurs disponibles (ICCD entre 190 et 950 nm, photomultiplicateur Hamamatsu de 350 à 1700 nm, photodiode à avalanche au silicium de 700 à 1100 nm et InSb de 1,5 à 2,5  $\mu\text{m}$ ), et les réseaux installés dans le spectrographe assurent une sensibilité de 190 nm à 2,5  $\mu\text{m}$ . Le canal de dépolariation permet pour sa part des mesures jusqu'à 5  $\mu\text{m}$ .

Intégrer un laser femtoseconde-térawatt dans un conteneur était un pari risqué, compte tenu des contraintes d'espace et des précautions nécessaires quant à l'environnement tant mécanique que thermique d'un tel laser, sans parler des conditions de propreté lors de campagnes sur le terrain [60]. L'équipe du TéraMobile a relevé ce défi, et a ainsi ouvert la porte à des applications des lasers de cette classe hors du laboratoire, y compris dans des conditions difficiles. Ce système est unique au monde par sa mobilité. On développera dans la partie suivante la capacité de ce système à contrôler la foudre.



## 5. Application : vers un paratonnerre laser ?

La foudre a toujours fasciné l'homme par sa puissance et son caractère incontrôlable et destructeur. Pour l'étudier, il est nécessaire de la faire tomber à la demande au point voulu (et instrumenté) et à un instant choisi. Dans ce but, la technique de déclenchement par fusée-fil a été mise au point par EDF et le CEA à St Privat d'Allier (Haute-Loire) dans les années 1970 puis développée par plusieurs groupes dans le monde, en particulier en Floride et au Nouveau Mexique.

Il s'agit d'envoyer vers un nuage d'orage une fusée paragrêle, qui déroule derrière elle un filin métallique relié ou non à la terre (Photo A et B). Ce conducteur va intercepter des précurseurs de décharges de foudre, ou traceurs, et ainsi guider la décharge vers le sol. Mais le nombre de fusées disponibles pour un orage est forcément limité, ce qui nécessite de choisir judicieusement l'instant du tir de la fusée. Par ailleurs, la retombée du fil peut représenter une pollution pour l'environnement comme pour la mesure elle-même [61].

Pour sa part, l'idée de déclencher et de guider la foudre au moyen de lasers est presque aussi ancienne que le laser lui-même. Elle a été proposée il y a plus de 30 ans. Le laser peut être tiré en continu, et le tir ne produit pas de déchets. Le principe consiste à utiliser la forte intensité du laser pour ioniser l'air le long du faisceau, et former ainsi un «fil» conducteur qui remplacerait celui déployé par une fusée. Les premiers essais, dans les années 1970 et 1980, avec des lasers à impulsions nanosecondes, ont été infructueux, car les lasers utilisés ne peuvent pas produire de canaux ionisés continus. Au contraire, le plasma dense qu'ils forment au foyer est opaque et stoppe le processus d'ionisation à plus grande distance [62, 63].

Plus récemment, l'avènement des lasers ultrabrefs et de forte intensité grâce à la technique CPA, a permis d'atteindre les fortes intensités nécessaires à l'ionisation de l'air pour des énergies par impulsion relativement modestes. Cette possibilité a renouvelé la problématique du contrôle de décharges électriques par laser.

## 5.1. L'effet chirp :

Il peut pour certaines applications de ce type de laser, notamment pour le contrôle de la foudre, s'avérer très utile d'utiliser le compresseur de manière à ce qu'en sortie du Téra-mobile les grandes longueurs d'onde aient du retard sur les petites. Ce retard sera ensuite compensé par les propriétés de la propagation de la lumière selon lesquelles la célérité des ondes de hautes fréquences est plus élevée que celle des ondes de fréquences moindres. En effet, selon la loi de Cauchy on a :  $n = A + \frac{B}{\lambda^2}$  avec A et B deux constantes positives, et  $v=c/n$  donc lorsque  $\lambda$  croît, n diminue donc v augmente. On peut ainsi contrôler la distance à laquelle la puissance crête du laser est maximale afin de limiter les risques lors de la capture de la foudre, comme nous le verrons plus tard [64].

Le schéma (figure 13) ci-dessous décrit l'évolution de la distance à laquelle s'initialise le filament en fonction de la longueur de la compression et donne en même temps la durée de l'impulsion. On remarque donc que dans le cas du Téra-mobile, pour avoir un effet Chirp négatif, la distance entre les réseaux doit être supérieure à 13 mm.

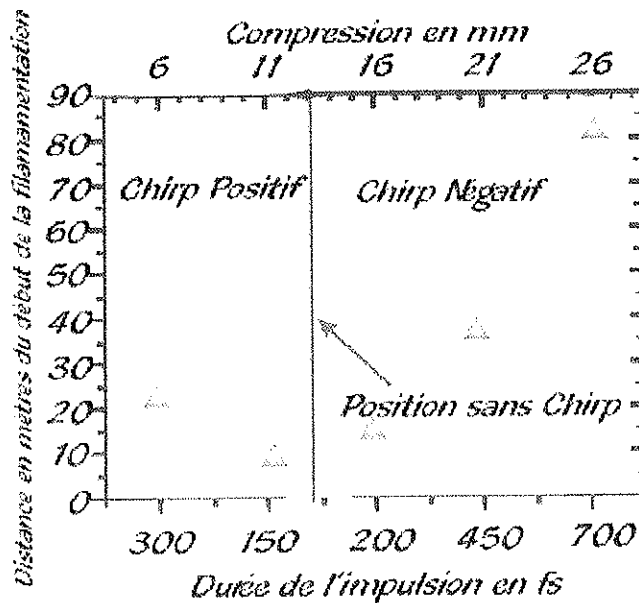


Figure 13 : évolution de la distance de formation du filament

## 5.2. L'énergie d'ionisation :

La forte intensité créée par auto-focalisation permet d'ioniser les molécules de O<sub>2</sub> et de N<sub>2</sub>, constituants majoritaires de l'atmosphère. On peut trouver les valeurs de leur potentiel d'ionisation soit respectivement 12.063 eV et 15.576 eV.

D'après la formule  $E=h\nu$ , où  $h$  est la constante de Planck et  $\nu$  la fréquence de l'onde, on peut calculer le nombre de photons nécessaires pour ioniser chacune de ces molécules : La longueur d'onde du laser étant 800 nm, et comme  $\nu=\frac{c}{\lambda}$ , l'énergie apportée par un photon est

$$E = \frac{h.c}{\lambda} \text{ soit : } E=2.48459.10^{-19} \text{ J}$$

Donc  $E=1.55287$  eV.

Ainsi on peut calculer :  $12.063/1.55287=7.7682$ , donc il faudra 8 photons pour ioniser O<sub>2</sub>, et ainsi 11 photons pour ioniser N<sub>2</sub>. Si on considère un atome, les électrons en orbite autour du noyau sont arrachés par des photons apportés par le laser. On obtient alors des cations qui forment le plasma.

## 5.3. Comparaison : nature – Téra-mobile :

### ❖ Déclenchement classique de la foudre :

Durant les instants précédant le coup de foudre, l'ionisation due au bombardement photonique étudié ci-dessus est négligeable devant un autre phénomène d'ionisation appelé effet d'avalanche [65].

Figure 14 : Considérons un électron libre (1) placé dans un champ électrique important tel que celui régnant entre les nuages et le sol lors d'un orage (de l'ordre de la dizaine de kV/cm). Il acquiert alors une énergie cinétique qui permettra lors de la collision (2) avec un atome neutre de l'air l'arrachement à ce dernier d'un électron. Celui-ci ionisera à son tour un autre atome (3), c'est l'effet boule de neige... Le canal ionisé ainsi créé porte le nom de traceur. La foudre suit le traceur formé au niveau des nuages et se propage jusqu'à un traceur qui prend naissance au niveau de la Terre. C'est ce canal que l'on essaie de reproduire artificiellement à l'aide du Téra-mobile.

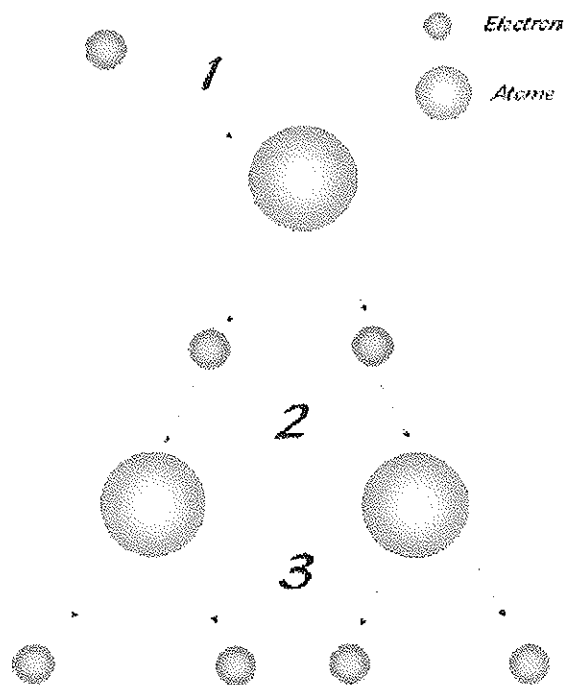


Figure 14 : effet d'avalanche.

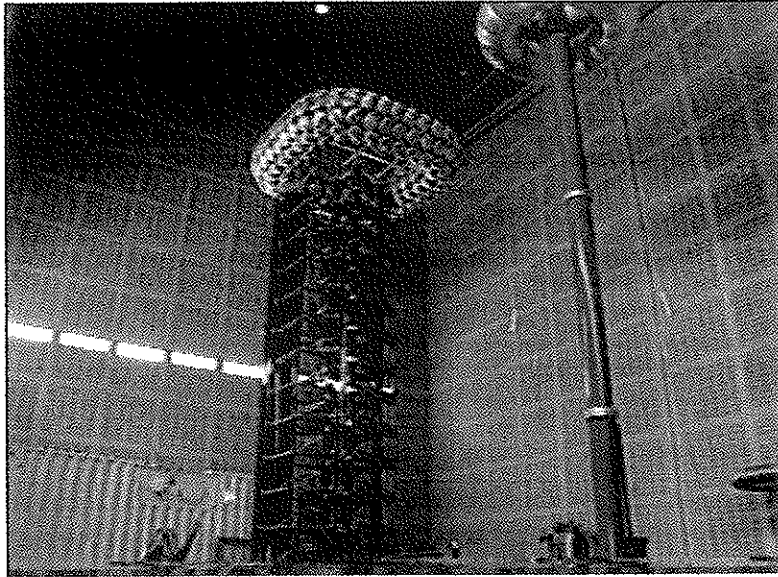
#### ❖ Déclenchement artificiel de la foudre par le TéraMobile :

Des expériences, réalisées en laboratoire, mettant en jeu des électrodes chargées séparées d'une distance suffisante pour qu'il n'y ait pas de décharges entre elles, montrent l'intérêt d'un guidage par laser de la foudre [66].

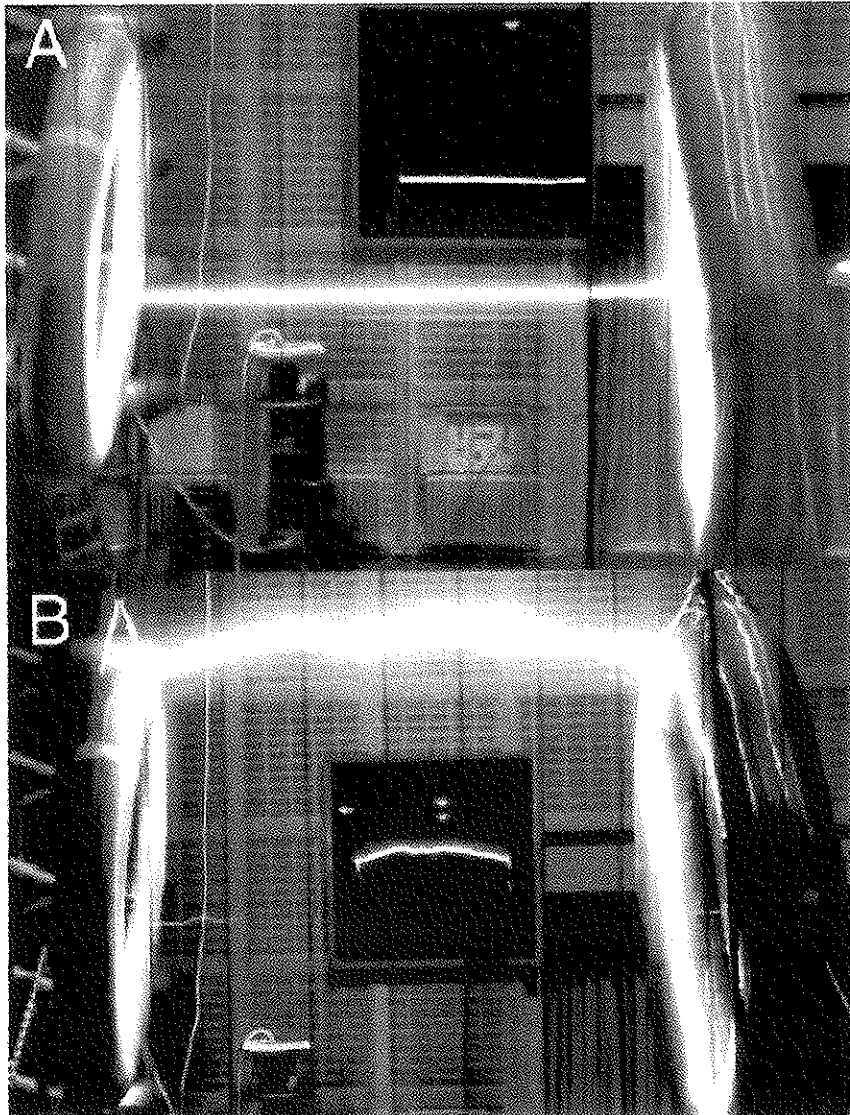
Pour réaliser cette expérience il est nécessaire de reproduire un nuage extrêmement chargé en électricité. Pour cela, on utilise un générateur très haute tension (*figure 15*) qui délivre une tension de 2 millions de volts. Ce dernier charge une électrode qui représente le nuage, l'autre électrode représentant la terre munie en son centre d'un paratonnerre.

La photo B (*figure 16*) présente une décharge entre les électrodes, sans laser. On remarque alors que le trajet n'est pas rectiligne. La foudre se propage ici, comme à l'état naturel, empruntant un chemin ionisé aléatoire : elle peut partir de n'importe quel endroit du nuage et peut toucher n'importe quel point de la Terre.

La photo A présente la même expérience avec un guidage laser. Celui-ci traverse la première électrode en son centre et est dirigé vers le paratonnerre. Le trajet est ici parfaitement rectiligne, guidé par le laser, l'expérience est donc concluante.



*Figure 15: générateur haute tension*



*Figure 16 : Influence du laser sur la trajectoire.*

## 5.4. Enjeux et limites :

- En pratique :

Nous pouvons imaginer un système grandeur nature permettant de déclencher la foudre. Il faudrait pour cela un laser tel que le TéraMobile et un radar météorologique [67]. Ce dernier permettrait de détecter le nuage chargé afin d'orienter grâce à un miroir de guidage le faisceau laser sur le nuage. On peut noter la nécessité de l'effet chirp qui permet d'initier la filamentation au niveau du paratonnerre. Actuellement la distance maximale entre le laser et le paratonnerre est de 80 mètres.

L'enjeu de ce projet est multiple : protéger les sites sensibles susceptibles d'être détruit par la foudre (comme les lignes hautes tensions, centrales électriques...), mais également limiter les smogs électromagnétiques. Il faut en effet noter que lorsque la foudre s'abat, elle provoque une perturbation magnétique capable de détruire les circuits électroniques et donc par exemple tout un réseau informatique en hôpital...

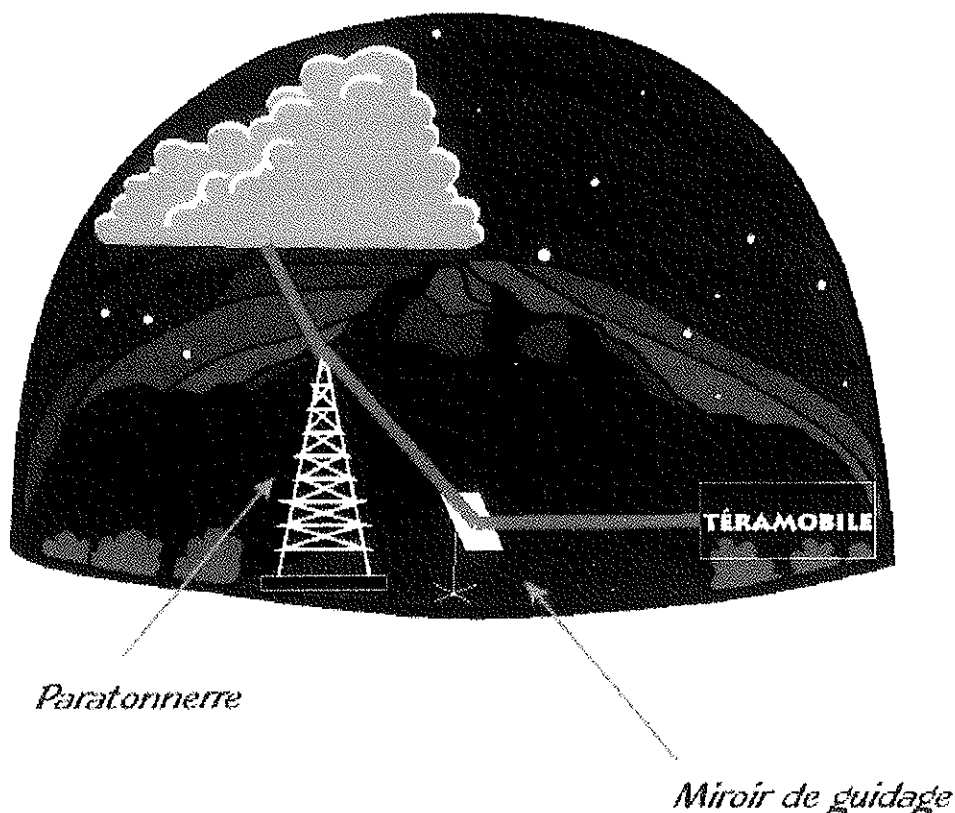


Figure 17 : Situation du paratonnerre grandeur nature

- Les limites du projet :

- La filamentation, le plasma n'a pas atteint expérimentalement une distance supérieure à quelques centaines de mètres.
- La propagation du laser dans les nuages est en cours d'étude mais n'est pas encore maîtrisée [68].
- Le coût d'une campagne expérimentale implique que les résultats soient assurés, c'est pourquoi l'étude n'a été faite pour l'instant qu'à l'échelle du laboratoire [69].

## 6. Conclusion :

Les résultats présentés ci-dessus montrent qu'il est possible de déclencher et de guider des décharges électriques de haute tension à l'échelle du mètre, même en présence de pluie. Les filaments pouvant être générés à grande distance (quelques kilomètres) et sur des longueurs de quelques centaines de mètres, ces résultats sont encourageants en vue d'une exploitation de cette technique pour le contrôle de foudre. À cet égard, le fait que la pluie ne perturbe que faiblement l'effet du laser est très positif.

Cependant, aux échelles considérées, soit quelques centaines de mètres, la durée d'établissement de la décharge ne peut pas être négligée devant la durée de vie du plasma. Une modélisation statique de ce plasma, en l'absence de champ électrique, suggère que la longueur utile du filament serait limitée à quelques mètres. Même si le champ électrique prolonge la durée de vie du plasma en accélérant les électrons libres, cet effet ne semble pas à lui seul suffisant pour assurer un guidage sur quelques centaines de mètres. Une modélisation rigoureuse des processus en jeu reste nécessaire pour dimensionner un paratonnerre laser utilisant des filaments générés par des impulsions ultrabréves.

Néanmoins, des résultats récents montrent qu'il est possible non seulement de comprendre ces processus, mais aussi de les maîtriser au moins en partie. En ajoutant une seconde impulsion laser, colinéaire avec le faisceau ultrabref, on réduit d'environ 50 kV, soit environ 5 %, le seuil de tension nécessaire pour déclencher des décharges. Le mécanisme de cet effet met en oeuvre l'ionisation par avalanche et le photodétachement d'électrons des ions  $O^2$  par le second laser, les électrons libres ainsi libérés amplifiant le chauffage par effet Joule du canal ionisé. L'élévation de température qui en résulte favorise en retour le photodétachement et l'ionisation par avalanche, et peut assurer la transition d'un régime sous-critique où le

plasma décroît, à un régime surcritique où la densité d'électrons et la température divergent jusqu'à ce que la décharge soit déclenchée.

Ainsi, les travaux en laboratoire à l'échelle de quelques mètres permettent de se rapprocher progressivement de conditions expérimentales proches de celles qui prévaudraient dans une expérience en grandeur réelle de déclenchement de la foudre. Si elle reste lointaine, cette perspective vieille de 30 ans s'est toutefois nettement rapprochée au cours des dernières années.



# CONCLUSION

L'évolution des lasers depuis leur découverte dans les années cinquante a été rapide. La génération d'impulsions ultra-courtes a permis de repousser les limites de l'infiniment petit en créant des sources dont l'intensité délivrée est extrêmement importante face à la durée. A la recherche de puissances toujours plus élevées, on peut soit augmenter la taille des instruments (comme dans le cas de la fusion par laser), soit générer des impulsions ultracourtes. L'avantage de cette dernière méthode réside dans le fait que les éléments mis en jeu n'occupent pas une place importante.

Le développement des applications décrites dans cette thèse sera facilité par les progrès attendus dans la technologie des lasers ultrabrefs : systèmes plus fiables et plus compacts, lasers pompés par diodes ou encore mise en forme spatiale et temporelle des impulsions laser.

# Bibliographies

[1] SHANCK C.V. and IPPEN E.P., "Subpicosecond kilowatt pulses from a mode-locked c.w. dye laser", *Appl. PhysLett.*, 24, 373-375, (1974).

[2] RUDDOCK I.S. and BRADLEY D.J., "Bandwidth-limited subpicosecond pulse generation in modelocked c.w. dye lasers", *Appl. PhysLett.*, 29, 296-297, (1976).

[3] FORK R.L. et Al., "Generation of optical pulses shorter than 0.1 psec by colliding pulse modelocking", *Appl. PhysLett.*, 38, 671-672, (1981).

[4] FORK R.L. et Al., "Negative dispersion using pairs of prisms", *Opt. Lett.*, 9, ISO-152, (1984).

[5] VALDMANIS J.A. and FORK R.L., "Design considerations for a femtosecond pulse laser balancing self phase modulation, group velocity dispersion, saturable absorption and saturable gain", *IEEEJ. Quant. Electr.* QE-22, 112-118, (1986).

[6] MARTIN J.L. et Al., eds. "Ultrafast Phenomena VIII" Springer Series in Chemical Physics, 55, Springer-Verlag, Berlin, (1993).

[7] SALIN F., GRANGIER P., ROGER G. and BRUN A., "Experimental observation of high order solitons directly produced by a femtosecond ring laser", *Phys. Rev. Lett.* 56, 1132, (1986).

[8] SALIN F., "Etude et réalisation d'une chaîne laser femtoseconde. Rôle des phénomènes solitons dans les lasers femtosecondes à dispersion contrôlé", Thèse Orsay, mai (1987).

[9] DUJARDIN D. et FLAMANT P., "Conversion d'énergie dans les amplificateurs à colorants en présence de super fluorescence", *OpticaActa* 25, 273, (1978).

- [10] GEORGES P., "Etude et réalisation d'un laser a colorant femtoseconde fonctionnant a différentes longueurs d'onde. Compression et amplification d'impulsions ultrabrèves", Thèse Orsay, (1989).
- [11] MOULTON P.F., "Spectroscopic and laser characteristics of Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>", *J. Opt. Soc. Am.* B3, 125-133, (1986).
- [12] MOULTON P.P., "Tunable solid state lasers", *Proc. IEEE* 80, 348-364, (1992).
- [13] GOODBERLET J. et Al., "Femtosecond passively mode-locked Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> laser with a non linear external cavity", *Opt. Lett.* 14, 1125-1127, (1989).
- [14] ISHIDA Y. et Al., "Generation of 50-femtoseconde pulses from a pulse compressed, cw passively modelocked Ti:sapphire laser", *Opt. Lett.* 16, 153-155, (1991).
- [15] SPENCE D.E., KEAN P.N. and SIBBET W., "60-fsec pulse generation from a selfmodelocked Ti: sapphire laser", *Opt. Lett.* 16, 42-4, (1991).
- [16] ESTABLE F., SALIN F., ALLAIN M., GEORGES P. and Brun A., "Direct measurement of saturation fluence in Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>", *Opt. Comm.* 72, 235-238, (1989).
- [17] NEGUS D.K. et Al., "Sub-100 femtosecond pulse generation by Kerr lens modelocking in Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>", *Advanced Solid State Lasers PdP4 Washington, D.C.*, (1991).
- [18] DE BANOS M.R.X. et Al., "Third-order group velocity dispersion in a colliding-pulsemodelocked dye laser", *Opt. Lett.* 15, 127-129, (1990).
- [19] SALIN F., GRANGIER P., GEORGES P. and BRUN A., "Pulse propagation near zero group velocity dispersion in a femtosecond dye laser", *Opt. Lett.* 15, 1374-1376, (1990).
- [20] ASAKI M.T. et Al., "Generation of 11 fs pulses from a modelocked Ti : sapphire laser", *Opt. Lett.* 18, 977-979, (1993).

- [21] CURLEY P. et Al., "Operation of a femtosecond Ti-sapphire solitary laser in the vicinity of zero group-delay dispersion", *Opt. Lett.* 18, 54, (1993).
- [22] FORK R.L. et Al., "Compression of optical pulses to six femtoseconds using cubic phase compensation", *Opt. Lett.* 12, 483-48, (1987)5.
- [23] GEORGES P., ESTABLE F., SALIN F., POIZAT J.P., GRANGIER P. and BRUN A., "High-efficiency multipass Titane sapphire amplifiers for a continuous wave single mode laser", *Opt. Lett.* 16, 144-146, (1991).
- [24] STRICKLAND D. and MOUROU G., "Compression of amplified chirped optical pulses", *Opt. Comm.* 56, 219-221, (1985).
- [25] ETCHEPARE J., GRILLON G. and ORZAG A., "Third order autocorrelation study of amplified subpicosecond laser pulses" *IEEEJ. Of quantum electron.* 19, 5, 775-777, (1983).
- [26] JANSKY J., CORRADI G. and GYUZALIAN R.N., *Opt. Comm.* 23, 293, (1977).
- [27] BRUN A., GEORGES P., LE SAUX G. and SALIN F., "Single shot characterization of ultrashort light pulses", *J. Phys. D : Appl. Phys.* 24, 1225-1233, (1991).
- [28] BINDER P., Flap dimensions created with the IntraLase FS laser *J Cataract Refract Surg*; 30: 26-32, (2004).
- [29] BRAYNT M. R., and MARCHI V., JUHASZ T., Mathematical Model to Predict the Results of the Nd:YLF Laser Keratomileusis, *Journal of Refractive Surgery* 16, 234-239, (2000).
- [30] CAIN C.P., DiCarlo C.D., ROCWELL B.A, KENNEDY P.K., NOOJIN G.D., STOLARSKI D.J., HAMMER D.X., TOTH C.A., ROACH W.P. Retinal damage and laser-induced breakdown produced by ultrashort-pulse lasers. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol.* Aug; 234 Suppl 1:S28-37, (1996).
- [31] COCHENER B., SAVARY G., MALET F. Correcting keratoconus with intracorneal rings *J Cataract Refract Surg*; 26:1117-1122, (2000).

- [32] COLIN J., ALIO L., ARTOLA A., RUIZ-MORENO J., HASSANEIM A., AWADALLA M. Change in keratoconic corneas after intracorneal ring segment explantation and reimplantation *Ophthalmol*; 111 : 747-751, (2004).
- [33] JONAS J., VOSSMERBAEUMER U. Femtoseconde laser lasik flap preparation with conical incision and positional spikes *J Cataract Refract Surg*; 30: 1107-1108, (2004).
- [34] JUHASZ T., KASTIS G.A., SUAREZ C., BOR Z., BRON W.E. Time-resolved observations of shock waves and cavitation bubbles generated by femtosecond laser pulses in corneal tissue and water. *Lasers Surg Med.*;19(1):23-31, (1996).
- [35] JUHASZ T. Lamellar refractive surgery with scanned intrastromal picosecond and femtosecond laser pulses in animal eyes. *J Refract Surg* ;14:541-8, (1998).
- [36] JUHASZ T., LOESEL F., KURTZ R. M., HORVATH C., and MOUROU G. Femtosecond Laser Refractive Corneal Surgery, (Invited Paper), *IEEE Journal of Special Topics in Quantum Electronics*, 5, 902-910, (1999).
- [37] JUHASZ T., DJOTYAN G., LOESEL F.H., KURTZ R. M., HORVATH C. , BILLE J. F., MOUROU G. Applications of Femtosecond Lasers in Corneal Surgery. *Laser Physics* 10, 1-6, (2000).
- [38] KEZIRIAN G., STONECIPHER K. Comparison of the Intralase femtosecond laser and mechanical keratomes for laser in situ keratomileusis *J Cataract Refract Surg*; 30: 804-811, (2004).
- [39] KURTZ R. M., HORVATH C., LIU H. H., KRUEGER R., and JUHASZ T. Lamellar Refractive Surgery with Scanned Picosecond and Femtosecond Laser Pulses, *Journal of Refractive Surgery* 14, 541-548, (1998).
- [40] LUBATSCHOWSKI H., MAATZ G., HEISTERKAMP A., HETZEL U., DROMMER W., WELLING H., ERTMER W. Application of ultrashort laser pulses for intrastromal refractive surgery. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol. Jan*; 238(1): 33-9, (2000).
- [41] NORDAN L.T., SLADE S.G., BAKER R.N., SUAREZ T., KURTZ R.M., KRUEGER R.R. Femtosecond laser flap creation for laser in situ keratomileusis : six months follow-up of initial US clinical studies *J Refract Surg* ;19:8-14, (2003).

[42] ROACH W.P., ROGERS M.E., ROCKWELL B.A., BOPPART S.A., STEIN C.D., BRAMLETTE C.M. Ultrashort laser pulse effects in ocular and related media. *Aviat Space Environ Med.* May; 65 (5 Suppl):A100-7, (1994).

[43] SACKS Z.S., KURTZ R.M., FENN R., LOESEL F., MOUROU G., JUHASZ T. Laser spot size as a function of tissue depth and laser wavelength in human sclera. *SPIE Proceedings*; 3255:67-76, (1998).

[44] SLETTEN K.R., YEN K. G., SAYEGH S., LOESEL F., ECHOKFF C., HORVATH C., Liu H-H, JUHASZ T., KURTZ R.M. An *in vivo* Model of Femtosecond Laser Intrastromal Refractive Surgery. *Ophthalmic Surgery and Lasers* 30, 742-749, (1999).

[45] Ecole des technologies des sources et des systèmes femtosecondes (2 ; 2004 ; Ile de Porquerolles, Var), Lasers et technologies femtosecondes [Texte imprimé] / ouvrage réalisé à la suite de la deuxième école des technologies, sources et systèmes femtosecondes, 21-24 septembre 2004, Ile de Porquerolles, Var ; Editeurs de la publication Marc SENTISs et Olivier UTEZA (2005).

[46] L'ASSOCIATION FRANCAISE DU LASIK. Le site de l'association française du LASIK. [en ligne]. Site disponible sur : <http://www.lasik.asso.fr> (Page consulté le 2 janvier 2007).

[47] D. STRICKLAND, G. MOUROU, *Opt. Commun.* 56, 219 (1985).

[48] P. MAINE, D. STRICKLAND, P. BADO, M. PESSOT, G. MOUROU. *IEEE J. Quantum Electron.* 24, 398 (1988).

[49] WILLE H., M. Rodriguez, J. Kasparian, D. Mondelain, J. Yu, A. Mysyrowicz, R. Sauerbrey, J.P. Wolf, L. Wöste, "*Teramobile: a mobile femtosecond-terawatt laser and detection system*", To appear in *Eur. Phys. J. AP* (2002).

[50] CHIRON A., LAMOUREUX R., LANGER R., RIPOCHE L., FRANCO B., PRADE B., BONNAUD G., RIAZUELO G., MYSYROWICZ A. *Eur. Phys. J. D*, 6, 383 (1999).

- [51] NIBBERING E. T. J., CURLEY P. F., GRILLON G., PRADE B.S., FRANCO M. A., SALIN F., MYSYROWICZ A., *Opt. Lett.* 21, 62 (1996).
- [52] LA FONTAINE B., VIDAL F., JIANG Z., CHIEN C.Y., COMTOIS D., DEPAROIS A., JOHNSTON T. W., KIEFFER J.-C., PEPIN H., MERCURE H.P. *Physics of Plasmas* 6, 1615 (1999).
- [53] MLEJNEK M., KOLESIK M, MOLONEY J.V., WRIGHT. M. *Opt. Lett.* 23, 2938 (1999).
- [54] KASPARIAN J., SAUERBREY R., CHIN S.L. *Appl. Phys. B* 71, 6, pp, 877-879, (2000).
- [55] CORKUM P.B., ROLLAND C., SRINIVASAN-RAO T. *Phys. Rev. Lett.* 57, 2268 (1986).
- [56] RAIROUX P., SCHILLINGER H., NIEDERMEIER S., RODRIGUEZ M., RONNEBERGER F., SAUERBREY R., STEIN A., WAITE D., WEDEKIND C., WILLE H., WOSTE L. *Appl. Phys. B* 71, 573 (2000).
- [58] KASPARIAN J., SAUERBREY R., MONDELAIN D., NIEDERMEIER S., YU J., WOLF J.-P, ANDRE Y.-B, FRANCO M., PRADE B., MYSYROWICZ A., TZORTZAKIS S., RODRIGUEZ M., WILLE H., WOSTE L. *Opt. Lett.* 25,1397-1399, (2000).
- [59] MORRIS J.R. *Opt. Soc. Am.* 11, 832 (1994).
- [60] CHIN S.L., MIYASAKI K., *Jap. J. Appl. Phys.* 38, 2011-2012 (1999).
- [61] LA FONTAINE B., COMPTOIS D., CHIEN C.Y., DESPAROIS F., GERIN F., JARRY G., JOHNSTON T. W., KIEFFER J. C., MARTIN F., MAWASI R., PEPIN H., RIZK F.A. M., VIDAL F., POTVIN C., COUTURE C., MERCURE H. P. *Appl. Phys.* 88, 610-615 (2000).

[62] RAMBO P., SCHWARTZ J., DIELS J.-C. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics* 3, 146-158 (2001).

[63] MEASURES R.M. *Laser Remote Sensing-Fundamental and Applications*, Wiley Interscience, New York, (1984).

[64] YU J., MONDELAIN D., ANGE G., VOLK R., NIEDERMEIER S., WOLF J.P., KASPARIAN J., SAUERBREY R. *Opt. Lett.* 26, 533 (2001).

[65] HILL S.C., BOUTOU V., YU J., RAMSTEIN S., WOLF J.-P., PLAN Y.-I., HOLLER S., CHANG R.K. *Phys. Rev. Lett.* 85, 54-57 (2000).

[66] KASPARIAN J., WOLF J.-P. *Opt. Commun.* 152, 355 (1998).

[67] RODRIGUEZ M., SAUERBREY R., WILLE H., WOSTE L., FUJII T., ANDRE Y.-B., MYSYROWICZ A., KLINGBEIL L., RETHMEIER K., KALKNER W., KASPARIAN J., SALMON E., YU J., WOLF J.-P. *Opt. Lett.* 27, 772 (2002)

[68] SPRANGLE J., PENANO J.R. and HAFIZI B. *Propagation of intense short laser pulses in the atmosphere*, *Physical Review E* 66, 046418 (2002).

[69] KASPARIAN J., RODRIGUEZ M., MEJEAN G., YU J., SALMON E., WILLE H., BOURAYOU R., FREY S., ANDRE Y.-B., MYSYROWICZ A., SAUERBREY R., WOLF J.-P., WOSTE L., *Whitelight filaments for atmospheric analysis*, *Science* 301, 61 (2003).



# ANNEXE 1

## LE LASER FEMTOSECONDE SOLIDE

Le matériau solide qui a véritablement émergé est le cristal de saphir dopé avec l'ion titane ( $\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ ) qui présente entre autres propriétés une très large bande d'émission entre 700 nm et 1100 nm et une densité d'énergie de saturation très élevée. C'est donc un excellent candidat pour engendrer des impulsions femtosecondes. Des chercheurs du MIT ont démontré la production d'impulsions de 200 fs en utilisant une nouvelle technique de blocage de modes dite "par addition d'impulsion" ou APM pour "additive pulse modelocking" [13]. Dans cette technique, le blocage de modes est réalisé en réinjectant dans le laser une partie de son émission qui a été modulée de façon non linéaire dans une cavité externe. Puis, un peu plus tard, un laser "hybride" utilisant un absorbant saturable lent a été développé [14]. Ce résultat était très surprenant car un absorbant saturable lent ne devait pas bloquer les modes correctement dans le laser.

Enfin, en 1991, un résultat encore plus extraordinaire a été rapporté par Spence, Kean et Sibbett de l'Université de Saint-Andrews : un "auto-blocage des modes" d'un laser saphir dopé au titane [15]. Dans ce laser, aucun absorbant saturable ou aucune contre réaction n'était utilisé, le laser fonctionnait de manière stable en régime impulsionnel alors qu'il aurait du opérer en continu, à la condition que la cavité soit réalisée de la bonne façon. Beaucoup de discussions prirent naissance à la suite de cette communication.

### 1. L'oscillateur femtoseconde à saphir dope au titane

La matrice d'alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , appelée également saphir, possède des propriétés remarquables. C'est un matériau réfractaire, très dur, d'excellente conductivité thermique et chimiquement stable. Dans la matrice de saphir, des ions  $\text{Ti}^{3+}$  remplacent certains ions  $\text{Al}^{3+}$  dans des sites à symétrie trigonale. Le saphir cristallise selon un système rhomboédrique et possède un axe de symétrie d'ordre 3 appelé c. Il est biréfringent uniaxe, le rayon ordinaire est polarisé perpendiculairement à l'axe c ( $\sigma$ ) et le rayon extraordinaire est polarisé parallèlement à l'axe c ( $\pi$ ). Ainsi les spectres d'absorption et d'émission sont différents selon que la

polarisation de la lumière d'excitation est parallèle ( $\pi$ ) ou perpendiculaire ( $\sigma$ ) à l'axe c du cristal (figure 18 d'après [11]). La valeur précise de la section efficace d'émission stimulée est très délicate à mesurer et dépend fortement de la technique de cristalllogénèse utilisée. Une mesure plus fine du spectre d'absorption du saphir dopé au titane révèle une faible absorption résiduelle autour de 800 nm (figure 18.b). Cette absorption dont la longueur d'onde correspond à celle du spectre de fluorescence est très gênante pour l'émission laser [16]. Elle constitue des pertes non négligeables qui limitent sérieusement le rendement des oscillations laser.

L'origine de ces pertes est mal connue et a fait l'objet de nombreux travaux. Des paires d'ions  $Ti^{3+}-Ti^{4+}$  dans la matrice peuvent être à l'origine de cette absorption parasite. La présence d'ions  $Ti^{3+}$  en position interstitielle est également envisagée pour expliquer ces pertes. La qualité d'un cristal de saphir dopé au titane est habituellement exprimée à partir d'un paramètre appelé "figure de mérite" (FOM : Figure Of Merit). Cette grandeur est définie comme le rapport entre les coefficients d'absorption  $\alpha(cm^{-1})$  mesurés à 490 et à 800 nm :

$$FOM = \frac{\alpha_{490}}{\alpha_{800}}$$

Aujourd'hui, la plupart des fabricants de saphir dopé au titane annoncent des figures de mérite supérieures à plusieurs centaines.

Les largeurs des bandes d'absorption et de fluorescence de  $Ti:Al_2O_3$  sont liées à la nature vibronique des transitions mises en jeu. Le saphir dopé au titane peut être assimilé à un matériau laser à quatre niveaux. Comme on peut le voir sur la figure 18.a, le laser de choix pour l'excitation de l'ion  $Ti^{3+}$  est le laser à argon dont les raies d'émission se situent au maximum de la bande d'absorption de  $Ti:Al_2O_3$ .

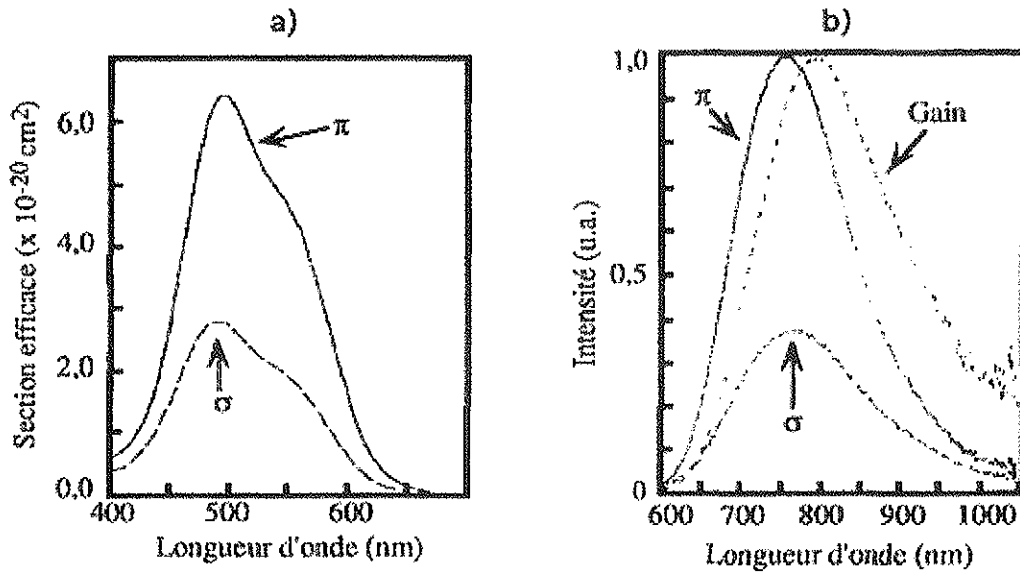


Figure 18 : spectre d'absorption (a) et d'émission (b) du saphir dopé au Titane suivant les deux polarisations.

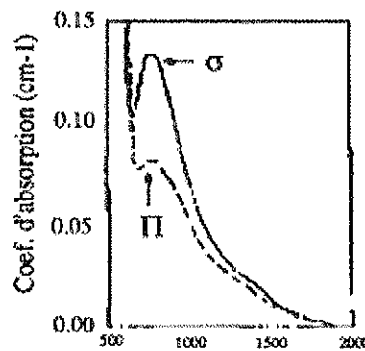


Figure 18 bis : absorption du saphir dopé au Titane dans l'infrarouge.

La figure 19 représente maintenant la cavité de l'oscillateur laser initialement appelée "à blocage de modes magique" et aujourd'hui à "verrouillage de mode par effet Kerr" (KLM : Kerr Lens Modelocking) [17]. La cavité est extrêmement simple, elle est constituée d'un cristal, d'une paire de prismes, de quatre miroirs et d'une fente de sélection spatiale du profil du faisceau intracavité. Il est clair aujourd'hui que le blocage de mode est dû à des non linéarités de type Kerr présentes dans le cristal laser. En effet, lorsque la densité de puissance augmente dans la cavité, et donc dans le cristal, il apparaît une variation non linéaire de son indice de réfraction :

$$n = n_0 + n_2 \cdot I$$

où  $n_0$  est l'indice linéaire du cristal,  $n_2$  son indice non linéaire et  $I$  l'intensité de l'impulsion lumineuse. Cet effet peut être assimilé à une lentille convergente qui "autofocalise" les rayons lumineux, qui modifie les paramètres de stabilité de la cavité et qui enfin modifie le profil

spatial du faisceau. Le diamètre du mode est donc plus petit en régime impulsionnel qu'en régime continu. Si l'on place dans la cavité une fente (qui va jouer le rôle d'un absorbant saturable ultra rapide) dont l'ouverture est plus petite que le diamètre du faisceau continu mais supérieure à celui du faisceau sortant, elle introduit beaucoup de pertes en continu et peu en régime impulsionnel. L'oscillateur fonctionne alors préférentiellement en régime impulsionnel. Comme décrit plus haut, on voit deux prismes dans la cavité, destinés à compenser les effets néfastes de l'automodulation de phase et la dispersion de vitesse de groupe.

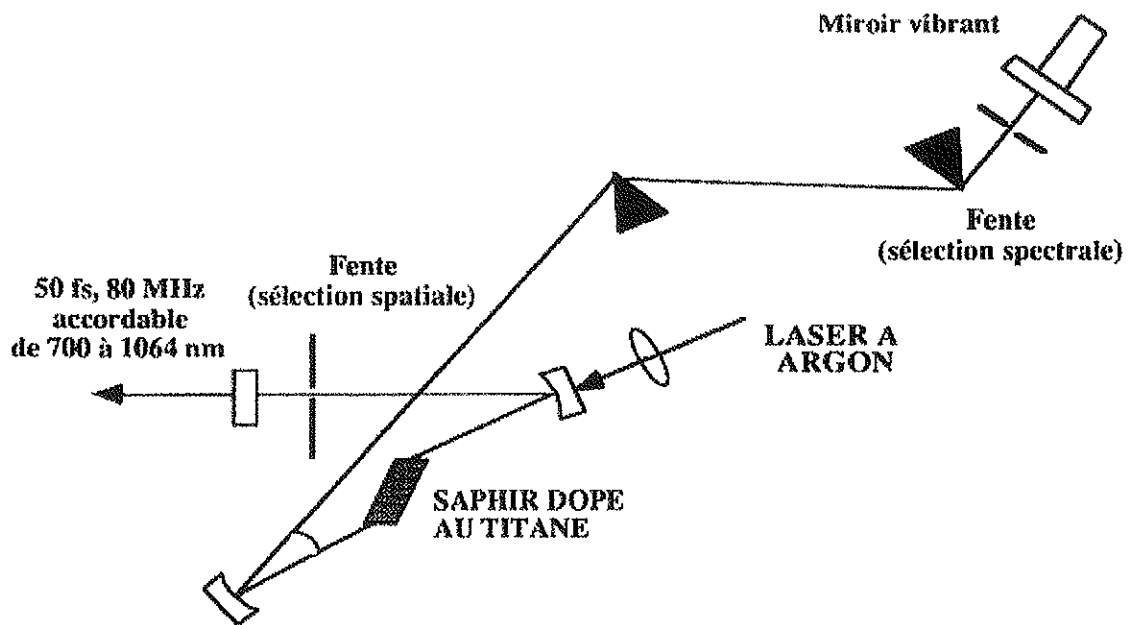


Figure 19 : schéma d'un laser femtoseconde solide dopé au Titane.

Il reste ensuite à initier le régime impulsionnel. Plusieurs systèmes ont été testés, mais généralement on fait vibrer le miroir de fond de cavité pour engendrer une modulation temporelle et initier les effets non linéaires.

Les performances de ce type d'oscillateur sont les suivantes : les impulsions produites à la cadence de 100 MHz environ ont des durées de l'ordre de 50 fs et d'énergie allant jusqu'à 10 nJ. Elles devront également être amplifiées pour réaliser des expériences de physique. Mais avant d'étudier les amplificateurs "solides", il est important de noter qu'aucun laser de cette classe n'a pu à cette époque délivrer des impulsions de durée inférieure à 50 fs alors que théoriquement la bande passante du cristal de saphir dopé au titane devrait convenir pour engendrer des impulsions de 3 fs !

Il a fallu seulement deux années pour résoudre le problème et vaincre une mauvaise compensation de la vitesse de groupe. En effet, à l'époque "préhistorique" des lasers à

colorants CPM, on avait déjà suspecté que la dispersion de vitesse de groupe d'ordre trois pouvait être un facteur limitatif et n'était pas bien corrigée par des paires de prismes.

Le problème est accentué dans le cas des lasers solides car les cristaux présentent une plus importante dispersion de vitesse de groupe que les jets de colorant (ils sont plus épais) et accentuent ainsi toute erreur de compensation [18, 19]. La solution a été trouvée grâce à une amélioration de la cristallogénèse des cristaux de saphir. Ils ont pu être plus fortement dopés, on a ainsi pu utiliser des cristaux moins longs donc présentant moins de dispersion. En 2001, des impulsions de 11 fs ont pu être produites directement dans un oscillateur.

Ces impulsions ne sont pas les plus courtes déjà obtenues, car le record est de 6 fs, mais le système laser nécessaire est environ dix fois plus coûteux, complexe, et difficile à utiliser que l'oscillateur laser au saphir dopé au titane [20, 21, 22].

Voici donc l'état de l'art relatif aux oscillateurs, il faut maintenant amplifier les impulsions produites. Comme le cristal de saphir dopé au titane a un long temps de fluorescence (3,2  $\mu$ s), il est également un excellent matériau destiné à amplifier des impulsions femtosecondes lorsqu'il est pompé avec des impulsions nanosecondes, délivrées par un laser Nd :Yag doublé en fréquence, dont la longueur d'onde d'émission est proche du maximum de sa bande d'absorption.

## **2. Les amplificateurs a base de saphir dope au titane**

Deux types d'amplificateurs sont développés : le premier est un amplificateur passif **multipassage géométrique** (figure 20). Un cristal de saphir dopé au titane est placé entre deux miroirs sphériques de rayons de courbure légèrement différents qui peuvent être remplacés par l'association d'une lentille et d'un miroir plan. Il est excité par des impulsions nanosecondes issues d'un laser Nd :Yag doublé en fréquence. Le temps de fluorescence étant bien supérieur à la durée d'une impulsion d'excitation, une impulsion femtoseconde a le temps d'effectuer plusieurs passages dans le cristal afin d'en extraire l'énergie stockée [23]. En général, six à huit passages sont suffisants pour obtenir une amplification supérieure à un million. Toutefois un tel dispositif est relativement délicat à aligner et son rendement est difficile à optimiser en raison du mauvais recouvrement spatial des faisceaux lors des différents passages. Aujourd'hui on préfère plutôt utiliser un amplificateur dit régénératif.

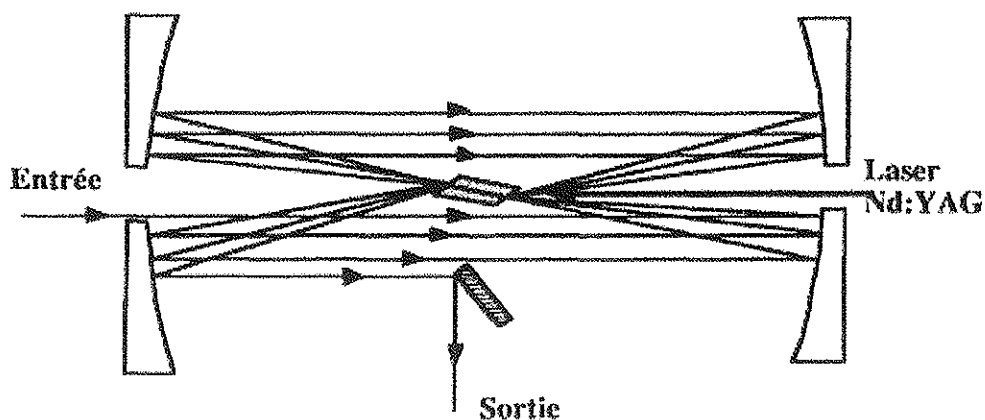


Figure 20 : schéma d'un amplificateur multipassage géométrique.

Rappelons le principe de l'**amplificateur régénératif** (figure 21). Une impulsion femtoseconde est piégée dans une cavité laser, effectue plusieurs passages dans le milieu amplificateur pompé par un laser Nd:Yag nanoseconde, puis est extraite de la cavité lorsqu'elle a atteint son énergie maximale. L'injection et l'ejection sont réalisées par l'intermédiaire d'un polariseur et d'une cellule de Pockels qui fait tourner de  $90^\circ$  la polarisation de l'impulsion à amplifier et de l'impulsion amplifiée. Il est possible d'obtenir des énergies de l'ordre d'une dizaine de mJ à la sortie de l'amplificateur.

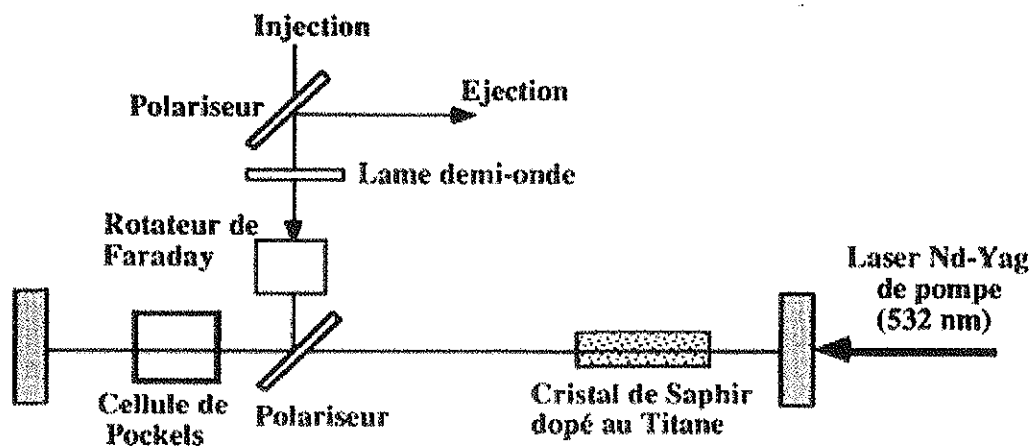


Figure 21 : schéma d'un amplificateur régénératif.

Toutefois, un des problèmes rencontrés lors de l'amplification d'impulsions courtes, est lié à la densité de puissance crête dans la cavité lors des derniers passages de l'impulsion dans les éléments de l'amplificateur. Il est impératif de diminuer le plus possible la densité de puissance crête afin d'éviter de détruire ces éléments. Ceci est obtenu en utilisant la technique, maintenant classique, de l'amplification dite à dérive de fréquence (CPA : Chirped Pulse Amplification) [24]. Le principe consiste à allonger temporellement l'impulsion de 100

fs jusqu'à quelques centaines de picosecondes avant son injection dans l'amplificateur. On amplifie l'impulsion grâce à l'amplificateur régénératif, on l'éjecte et on la recomprime pour retrouver sa durée initiale. L'étirement et la compression s'effectuent à l'aide de systèmes à réseaux (qui jouent le même rôle que les lignes de prismes décrites plus haut) présentant une dispersion de vitesse de groupe positive pour l'étirement et négative pour la recompression (figure 21). Il est absolument nécessaire de parfaitement compenser l'étirement lors de la recompression afin de pouvoir obtenir des impulsions comprimées les plus courtes possibles. C'est la raison pour laquelle on utilise souvent des réseaux sous incidence de Littrow qui garantissent une grande facilité de réglage et l'assurance de bien revenir à la valeur initiale de l'impulsion. Suivant la même technique d'amplificateur régénératif il est possible de produire des impulsions de très haute énergie et les nouveaux problèmes qui apparaissent seront décrits par ailleurs.

Ainsi, nous disposons d'oscillateurs et d'amplificateurs pratiquement "tout solide" à ceci près que les oscillateurs sont encore pompés avec des lasers à argon. Le récent développement des diodes laser de puissance va relancer de nouvelles technologies destinées à produire des impulsions femtosecondes. Le meilleur cristal qui émerge à ce jour est le LiSAF dopé avec l'ion  $\text{Cr}^{3+}$ . Avant de présenter quelques applications de ces lasers, il faut dire quelques mots relatifs à la caractérisation des impulsions produites.

### **3. L'amplification paramétrique optique :**

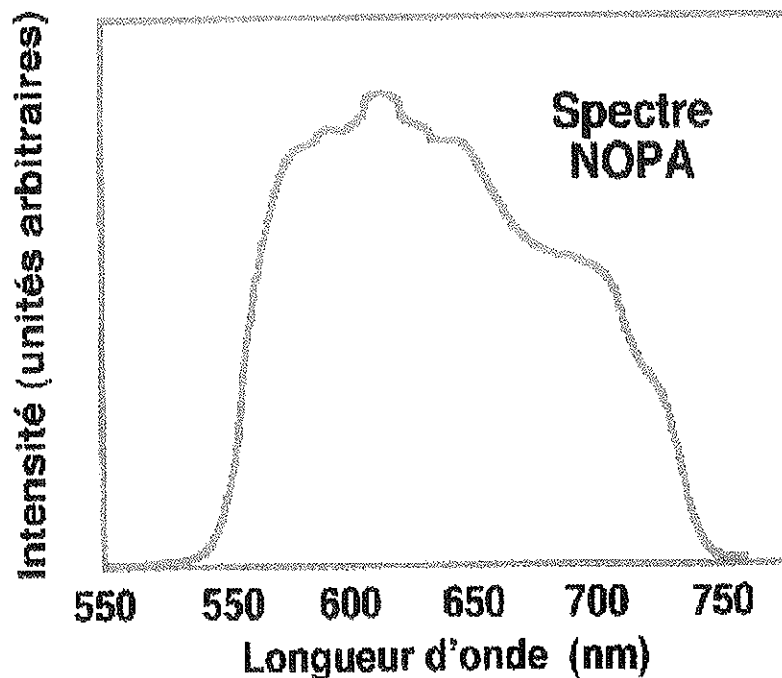
De longue date, une alternative à l'émission stimulée utilisée pour amplifier un signal optique a été trouvée au travers d'un mélange à trois ondes dans un cristal non linéaire. Cette technique consiste à utiliser le couplage non linéaire existant entre trois ondes se propageant dans un cristal non centrosymétrique pour transférer de l'énergie entre les ondes. Ce phénomène n'est pas résonnant et n'est donc pas assorti d'absorption. Par contre son efficacité est proportionnelle à la puissance crête des ondes et il est donc particulièrement adapté à des impulsions brèves.

Pour amplifier des impulsions lumineuses par éclatement paramétrique de fréquence, on illumine le cristal non linéaire à la fois avec une pompe intense et avec le signal faible à amplifier.

Seules les ondes dont la vitesse de phase est égale pourront se transférer de l'énergie. On calcule donc la coupe du cristal afin d'assurer cet « accord de phase » pour le couple de longueurs d'onde voulu. Si on recherche l'accordabilité par le processus d'amplification paramétrique, on choisira un mode d'accord de phase tel que la pompe et la sonde se propagent colinéairement, de ce fait, une simple rotation du cristal donne accès à l'accordabilité en fréquence sans changement de la direction d'émission de la lumière. Dans cette configuration, le cristal devient un filtre en fréquence accordable ce qui est défavorable à l'amplification d'impulsions lumineuses brèves à spectre large.

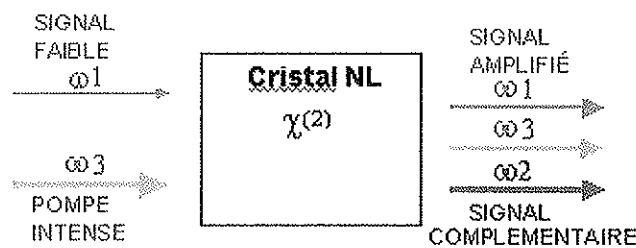
Cette particularité a mené à la recherche de conditions géométriques qui permettent l'accord des vitesses de groupe entre le signal et l'idler et qui ne correspondent plus à la colinéarité de la pompe et du signal. C'est ainsi qu'on a introduit les NOPA (Non-linear Optical Parametric Amplifier). Leur particularité principale étant de permettre l'accord de phase sur une gamme extrêmement étroite d'angles d'incidence ; cette gamme de dispersion angulaire peut être entièrement contenue dans l'ouverture des optiques de focalisation et de collimation utilisées dans les dispositifs. Dans ce cas, le cristal paramétrique ne se comporte plus comme un filtre de fréquence et il devient possible d'amplifier les spectres très larges d'impulsions lumineuses ultra-courtes dont les intensités importantes sont favorables à l'utilisation de processus optique non linéaires. La figure ci-dessous montre un spectre extrêmement large amplifié par cette méthode [Kobayashi, 2000 ; Tan, 2001].





*Spectre d'impulsions amplifiées dans un NOPA.*

De plus, l'amplification paramétrique étant un processus électronique non-résonnant doit être considérée comme instantané, au moins jusqu'aux échelles de temps ne descendant pas au dessous de la femtoseconde, de sorte que le processus ne dure que ce que dure l'impulsion de pompe ce qui est favorable en termes de rendement global et surtout empêche toute amplification du bruit en dehors du support de la pompe. A l'aide de ce concept, il est aussi possible de transposer l'amplification paramétrique dans des architectures à dérive de fréquence : c'est l'approche OPCPA.



*Schéma du principe de l'OPCPA*

On peut ainsi allier une bande spectrale très large et un fond amplifié limité à la durée de la pompe elle-même, qui peut être égale à celle de l'impulsion étirée. Cependant les grands facteurs d'amplification ramènent aux problèmes rencontrés avec les amplificateurs à

colorants et nécessite encore de nombreux travaux. C'est une technique très prometteuse qui ne remplace pas le saphir dopé au titane.

#### **4. L'amplification par fibres optiques dopées :**

Les lasers paramétriques ont l'inconvénient de nécessiter des lasers à pompes complexes incompatibles avec l'application à l'Industrie.

Afin de simplifier les amplificateurs, on se penche sur les fibres optiques dopées par l'ion Ytterbium. Les fibres permettent d'étaler l'absorption de la pompe sur de grandes longueurs et donc d'éviter tout souci thermique.

De plus l'ion Ytterbium présente dans une matrice vitreuse un spectre très large compatible avec des impulsions de moins de 100 fs. Une impulsion sera alors amplifiée par des facteurs supérieurs à  $10^5$  à des puissances moyennes à 100 W ce qui permet d'envisager des applications industrielles.

Quasiment plus de 25 ans après les premières impulsions femtosecondes, les technologies ne cessent de grandir. Le saphir dopé au titane a permis d'approcher les limites. Il reste un facteur deux sur la durée des impulsions avant d'atteindre la limite imposée par la durée d'un cycle optique et la taille des systèmes amplificateurs. La technologie des sources femtosecondes est très fiable et simple ce qui permettra un développement croissant de cette technologie.

#### **5. CONTROLE DES IMPULSIONS FEMTOSECONDES**

Les premiers lasers femtosecondes développés ont été bien évidemment des oscillateurs, qu'ils utilisent des colorants ou des cristaux. Ils ont tous la propriété de délivrer des impulsions à très haute cadence de répétition (entre 80 MHz et 100 MHz). Dès lors, des autocorrélateurs optiques ont été élaborés pour tenter de contrôler les performances des impulsions en terme de largeur temporelle. Ces systèmes, avec le recul des années, sont

appelés des autocorrélateurs en intensité du second ordre ou encore des autocorrélateurs "classiques".

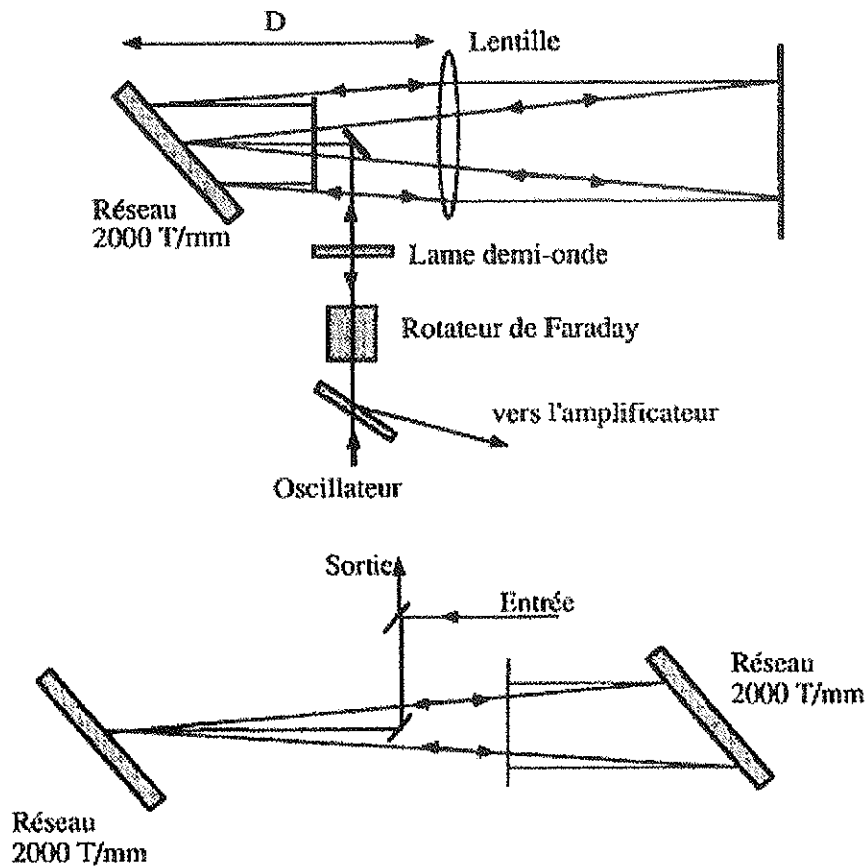


Figure 22 : schéma de l'étireur (haut) et du compresseur (bas) à réseaux pour l'amplification à dérive de fréquence.

Nous commencerons par leur description ; mais il faut dire qu'ils sont plus délicats à utiliser pour contrôler les impulsions délivrées par les amplificateurs, car ces derniers fonctionnent cette fois à très faible cadence : quelques dizaines de Hertz et au mieux quelques kiloHertz. Une alternative consistera alors à utiliser des autocorrélateurs dits "monocoups" que nous décrirons dans un second temps.

### 5.1. L'autocorrélateur classique "multicoup" du second ordre

Le principe d'un tel autocorrélateur consiste à transformer une information temporelle en une information spatiale plus aisée à enregistrer. L'arrangement expérimental est représenté sur la figure 23 et ce n'est autre qu'un interféromètre de Michelson légèrement modifié. Chaque impulsion femtoseconde incidente est divisée en deux parties égales à l'aide d'une

lame séparatrice. Le faisceau A est réfléchi par un coin de cube et le faisceau B par un second coin de cube régi de telle sorte que les deux faisceaux soient parfaitement parallèles.

Ces deux impulsions sont focalisées dans un cristal non linéaire de KDP taillé de manière à obtenir le maximum d'intensité à la fréquence double de celle des impulsions (c'est-à-dire à la longueur d'onde de 310 nm si celle des impulsions femtosecondes est de 620 nm). Un photomultiplicateur détecte l'ultraviolet en aval d'un filtre UV. L'intensité UV produite est proportionnelle au produit des intensités des impulsions lumineuses A et B qui traversent le cristal au même instant.

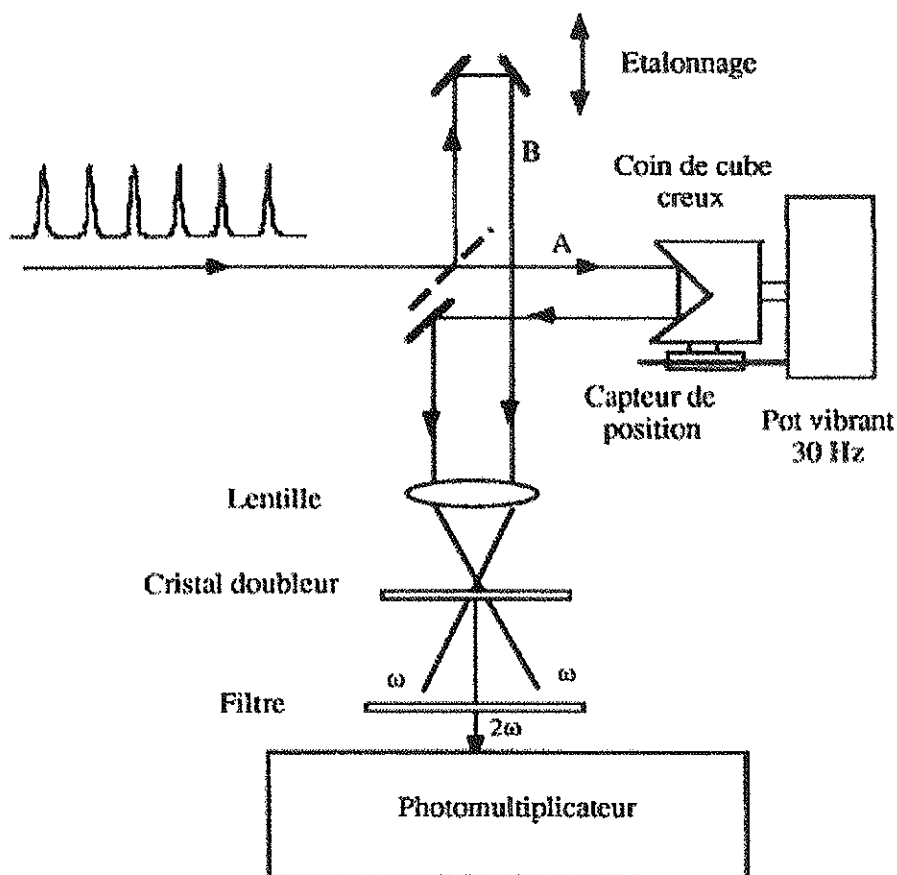


Figure 23 : schéma d'un autocorrélateur multicoup.

Il est nécessaire de faire ici plusieurs remarques. Premièrement, un très grand nombre d'impulsions (des millions !) est nécessaire pour visualiser une fonction d'autocorrélation (obligatoirement symétrique, même si l'impulsion à analyser n'a pas un profil temporel symétrique). De plus, la fonction d'autocorrélation obtenue est essentiellement une statistique.

Enfin, nous pouvons mesurer la largeur à mi-hauteur de la fonction d'autocorrélation, mais un problème se pose : quelle est la largeur à mi-hauteur de l'impulsion initiale ? Ce problème du "retour à l'original" est réglé de la façon suivante : dans tous les laboratoires du

monde on divise la largeur de la fonction d'autocorrélation par 1,55 si l'on décide que le profil temporel initial est en  $1/ch^2$ , et par 1,414 si le profil initial est suppose être gaussien. On comprend donc bien que cet autocorrélateur n'est qu'un outil de routine permettant de caractériser grossièrement les impulsions produites par les oscillateurs et surtout qui permet de régler l'oscillateur pour qu'il fournisse les impulsions les plus brèves possibles [25]. Si l'on souhaite obtenir plus d'informations, il faut au moins utiliser des autocorrélateurs d'ordre trois. Cependant, si un amplificateur d'impulsions femtosecondes travaille à très basse fréquence de répétition, cet autocorrélateur "classique" ne peut plus être utilisé pour régler l'amplificateur car il est nécessaire d'attendre plus d'une minute pour obtenir une autocorrélation. L'autocorrélateur monocoup répond à ce problème.

## 5.2. L'autocorrélateur monocoup

L'idée de base de la méthode repose sur une transformation du profil temporel d'une impulsion en un profil spatial qui peut être analysé par une barrette de photodiodes. Comme précédemment, une lame séparatrice produit deux répliques de l'impulsion incidente qui se croisent dans un cristal non linéaire. L'image du cristal à la longueur d'onde moitié est enregistrée sur une barrette CCD. Si les deux impulsions incidentes ne sont pas colinéaires, le signal à la fréquence double ne sera produit que si les impulsions coïncident à la fois spatialement et temporellement. Le calcul exact de l'allure spatiale du profil doublé en fréquence a été réalisé par Jansky et Al. [26]. On exposera ici le principe de l'autocorrélateur. La figure 24 est utilisée pour montrer comment est obtenue l'intensité du signal doublé en fréquence produit à une distance  $x_0$  du centre du faisceau doublé en fréquence. Il faudra tout d'abord que les deux répliques de l'impulsion initiale puissent être considérées comme spatialement uniformes. On appellera  $I_1(t)$  et  $I_2(t)$  leurs allures temporelles. Au point d'abscisse  $x_0$  (et quelle que soit sa position le long de la direction  $y$ ) le signal doublé en fréquence instantané est proportionnel à  $I_1(t-\tau) \cdot I_2(t+\tau)$  ou le retard  $\tau$  est relié à la position par :

$$\tau = \frac{nx_0 \sin \varphi / 2}{c}$$

où  $\varphi$  est l'angle entre les deux faisceaux incidents,  $n$  l'indice du cristal non linéaire et  $c$  la vitesse de la lumière. On supposera ici que  $I_1(t) = I_2(t) = I(t)$ . Comme le détecteur intègre le signal U.V. sur un temps relativement long, on obtient finalement une forme  $S(x)$  proportionnelle à la fonction d'autocorrélation  $G_2(\tau)$  de l'impulsion incidente :

$$S(x) \propto \int_{-\infty}^{+\infty} I(t+\tau) \cdot I(t-\tau) \cdot dt = G_2(2\tau)$$

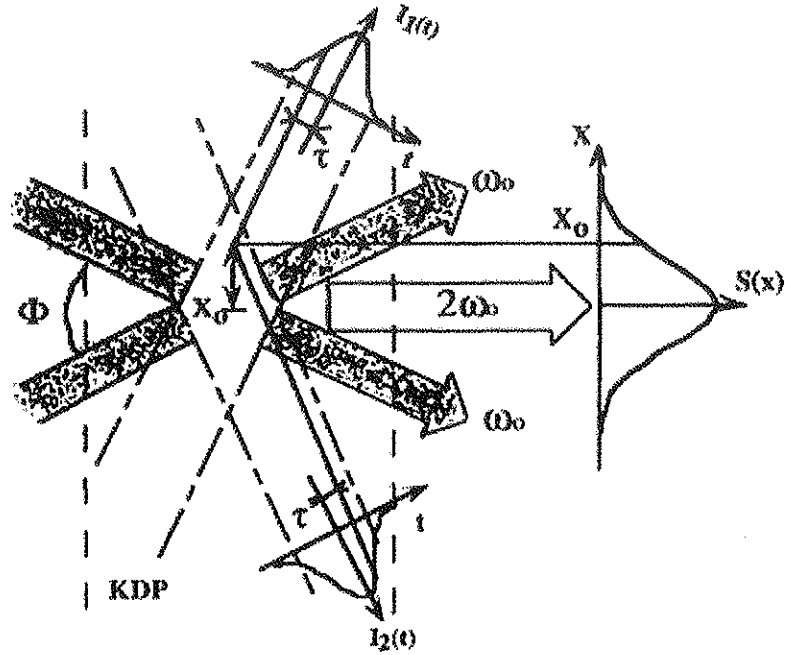


Figure 24 : principe de l'autocorrélateur monocoup.

En enregistrant l'allure spatiale du signal U.V., on peut obtenir la même information que celle mesurée avec un autocorrélateur classique, mais obtenu cette fois avec une seule impulsion.

Il existe d'autres méthodes "monocoup" : l'autocorrélateur monocoup interférométrique, l'utilisation de l'effet Kerr optique, la mesure de décalage de phase [27].

## SERMENT DE GALIEN

-----

" Je jure en présence des Maîtres de la Faculté, des Conseillers de l'Ordre des Pharmaciens et mes condisciples.

D'honorer ceux qui m'ont instruit dans les préceptes de mon art et de leur témoigner ma reconnaissance en restant fidèle à leur enseignement.

D'exercer, dans l'intérêt de la santé publique, ma profession avec conscience et de respecter non seulement la législation en vigueur, mais aussi les règles de l'honneur, de la probité et du désintéressement.

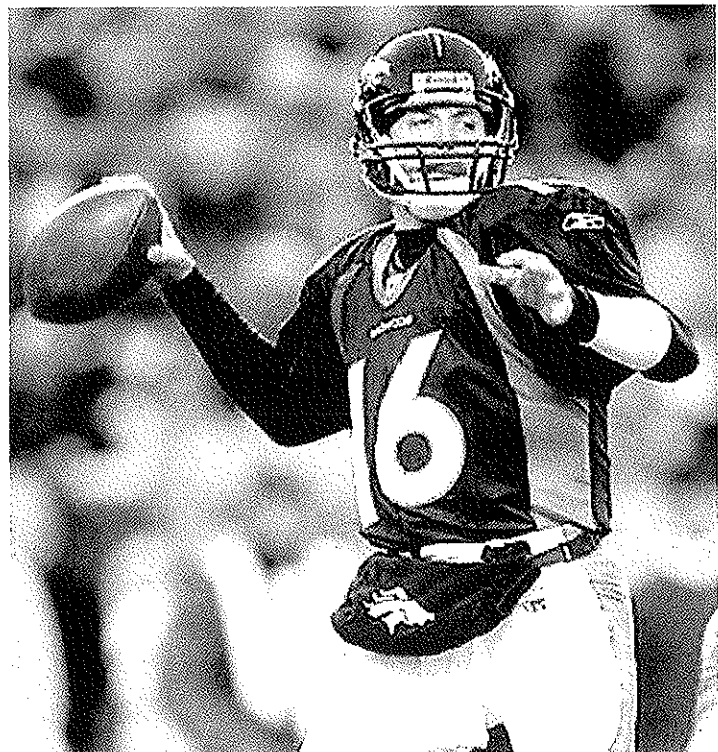
De ne jamais oublier ma responsabilité et mes devoirs envers le malade et sa dignité humaine ; en aucun cas, je ne consentirai à utiliser mes connaissances et mon état pour corrompre les mœurs et favoriser des actes criminels.

Que les hommes m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses.

Que je sois couvert d'opprobre et méprisé de mes confrères si j'y manque. "

## A JAKE PLUMMER

*LE MEILLEUR QUATERBACK QUE LES BRONCOS AIENT CONNU DEPUIS JOHN ELWAY*





BON A IMPRIMER N° 37A

LE PRÉSIDENT DE LA THÈSE

Vu, le Doyen de la Faculté

VU et PERMIS D'IMPRIMER

LE PRÉSIDENT DE L'UNIVERSITÉ

---

**Résumé :**

Le laser femtoseconde est un laser à impulsions ultra courtes. La recherche combinée du milieu industriel et scientifique a permis un développement rapide de ces lasers. De nos jours, ses applications sont diverses et variées, allant de l'écologie à la médecine. En effet, ce type de laser à impulsions courtes est utilisé dans la chirurgie de l'œil. Il permet de remplacer la lame du microkératome lors de la découpe du volet cornéen ce qui accroît la sécurité des patients.

Une autre application constitue le système Téramobile, le premier système laser multi-terawatt mobile. Il est conçu autour d'un laser à amplification à dérive de fréquence. Ce système mobile ouvre la voie vers de nouvelles applications pour les impulsions de forte puissance dans l'atmosphère telles que le contrôle de foudre.

---

**Title:** Femtosecond laser: applications in eye surgery and atmospher physics.

---

**Abstract:**

The femtosecond laser is a laser with ultrashort impulses. The combined research of industrial and scientific circle allowed a fast development of these lasers. Today, applications are varied in ecology or medicine. Indeed, this type of laser with short impulses is used in eye surgery. It will replace the blade of the microkeratome use to cut a hinged flap in the cornea. So patient safety increase.

Other application is the Teramobile system, a new mobile femtosecond multi-terawatt laser and detection system. The unique mobility feature of the whole system opens the way to previously unreachable applications for high-power laser pulses in the field of atmospheric research (laser-triggered lightning).

---

**PHARMACIE**

---

**Mots clés :** femtoseconde – oeil – téramobile - foudre

---

**FACULTE DE PHARMACIE DE LIMOGES**