

Les applications du laser femtoseconde

Dan Alexandre Lebuissou

Le laser femtoseconde est un outil de coupe et de découpe des tissus oculaires. Nous éclairons les principales applications actuellement utilisables. Les débats sur le prix de l'appareil étaient, sont et seront un carrefour de préoccupations mais qui manifestement ne freinent pas les dispositifs innovants et/ou aidés.

En 2004, le laser femtoseconde a fait une entrée fracassante en ophtalmologie chirurgicale. L'application première était la création d'un volet cornéen dans des conditions techniques considérablement plus fiables et plus sûres qu'avec les procédés mécaniques. Depuis, les applications se multiplient simultanément à l'augmentation constante du parc de dispositifs. Le laser femtoseconde est le bistouri cornéen idéal, prémisses des futures robotisations.

Le principe d'action du laser femtoseconde

Le mécanisme consiste à faire passer très rapidement par ionisation la matière de l'état basal à l'état plasma

Il s'agit d'un laser à haute densité agissant en infrarouge avec une longueur d'onde variant entre 1 030 nm et 1 060 nm. Une impulsion femtoseconde ou ultrabrève est une oscillation sinusoïdale propagative du champ électromagnétique (de fréquence éventuellement variable dans le temps), modulée en amplitude par une enveloppe dont la durée caractéristique est petite. Ce laser crée une photodisruption par cavitation avec une fréquence de pulse ultracourte (unité femtoseconde : 10^{-15} seconde). Les mini-spots, d'espacement variable, se rejoignent au sein du stroma cornéen et créent une incision linéaire sans effet thermique ni onde de choc. Les lasers femtoseconde présentent donc une combinaison unique d'impulsions très courtes, de spectre large et de puissance crête élevée.

Il n'y a aucune ablation de tissu mais des microdissections intralamellaires par la création et l'expansion de bulles de cavitation mixant l'eau et le dioxyde de carbone qui séparent les lamelles de stroma cornéen. Des ponts tissulaires persistent entre les différentes bulles de cavitation. Il existe donc un certain degré de rugosité dépendant principalement de l'énergie des spots.

Plus celle-ci sera faible, plus la bulle d'expansion et par conséquent les ponts tissulaires résiduels seront petits.

Délivrance d'énergie et taille des spots (figure 1)

La propriété d'expansion des bulles de cavitation permet d'espacer les spots. Plus les spots sont petits, plus la découpe est précise et la surface stromale régulière, mais la contrepartie est la nécessité d'augmenter le nombre de spots pour couvrir une surface équivalente, d'où une augmentation de l'énergie délivrée et du temps de traitement. Plus l'énergie délivrée est faible, moins il y a de bulles de cavitation. La réduction du volume des spots se fait par l'élargissement de l'ouverture numérique des optiques de focalisation à la sortie du laser et la réduction de la distance focale.

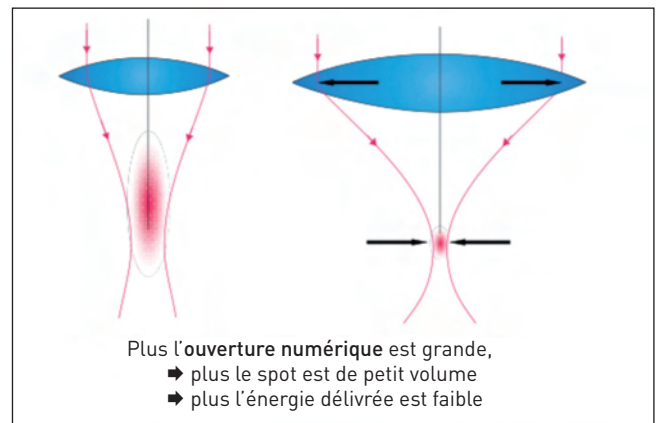


Figure 1. Seuil d'énergie et taille du spot en fonction du diamètre de délivrance.

Le laser femtoseconde, outil de découpe de la cornée

L'application historique est le volet superficiel cornéen du lasik

Le laser femtoseconde découpe la cornée sans aucune action mécanique et permet le concept « tout laser » pour le lasik :

- le centrage est sans erreur, car il s'effectue avant de découper et sous contrôle visuel,
- la découpe est paramétrée et donc fiable,
- la découpe est homogène et congruente,
- la berge avec un laser moderne peut avoir une obliquité ajustable,
- le système est indépendant des dimensions du globe oculaire,
- la précision obtenue est bien plus importante,
- les aléas liés à la lame ou au geste sont éliminés,
- les complications sont extrêmement rares,
- les aberrations induites par la découpe sont plus faibles,
- le risque biologique (infection) est abaissé,
- la coupe est fine et ajustable,
- le risque de déplacement et de plis est considérablement réduit,
- la stabilité du résultat est renforcée,
- la prédictibilité est excellente,
- le taux de retouche est diminué,
- les indications sont élargies,
- même en cas de pseudo-succion, la reprise immédiate est possible et sans danger en conservant le même cône d'aplanation,
- les inconvénients du femtoseconde sont d'une part le coût et, d'autre part, un soulèvement du volet plus délicat qu'avec un microkératome.

À l'heure actuelle, plusieurs dispositifs médicaux sont proposés, mais l'IFS d'Abbott représente 95 % du parc.

Le volet Intralase (AMO-Abbott) (figure 2)

Il est actuellement le plus diffusé avec plus de 1 200 lasers installés dans le monde et plus de 3 millions de procédures réalisées.

Le dernier modèle (cinquième génération) possède une fréquence de 150 kHz, ce qui permet une découpe d'un volet de 9 mm en moins de 12 secondes. Ce gain de temps a surtout l'intérêt de réduire le risque de lâchage de la succion. La réaction inflammatoire est moindre, le plan



Figure 2.
Intralase
(AMO-Abbott).

de découpe est très lisse et le confort patient est, bien entendu, majoré. Il s'agit du pionnier en matière de capot femtoseconde. Il n'y a plus de microscope, tout se fait sur écran de visualisation. Chaque chirurgien affiche les paramètres désirés. Par exemple, il est de plus en plus fréquent de créer un biseau inverse de façon à limiter le risque de déplacement. Le volet peut être ovale, la charnière est déplaçable.

Son fonctionnement repose sur l'utilisation d'un cône d'aplanation (à usage unique) calibré qui permet de créer une surface de contact parfaitement plane (définissant le point zéro) et assurant une parfaite régularité et uniformité de découpe. La pression n'est pas importante (environ 30-40 mmHg). Le laser propose l'option « poche d'évacuation des gaz », mais si elle n'est pas employée, le diamètre peut être plus élevé.

Le laser découpe en partant de midi et en ligne puis fend la berge. La découpe est sous contrôle de la vue et se déroule à une profondeur affichable au micron. Comme le cône s'appuie sur la sclère, il peut exister de petites ecchymoses sous-conjonctivales anodines mais visibles.

Le volet LDV Da Vinci (Zimmer)

C'est un laser proposé comme mobile à son lancement. Effectivement, il n'est pas encombrant. Ce laser n'est pas amplifié et travaille avec une forte ouverture numérique (taille des spots de 1 μ m) et une fréquence de tir de 1 MHz. Son inconvénient principal est l'absence de contrôle de la vue de la découpe. Il autorise des volets de 140 à 90 μ m selon le pack. L'énergie délivrée est peu importante, les spots se superposent en partie, ce qui explique une certaine lenteur.

Le volet Wavelight FS 200 (Alcon) (figure 3)

Son système d'aplanation est proche de celui du laser femtoseconde d'Abbott. Il fonctionne à une fréquence de 200 kHz permettant la réalisation d'un volet en 10 secondes. Le centrage est réglable après application de la succion. Il autorise aussi des coupes proches de celles de l'épilasik.

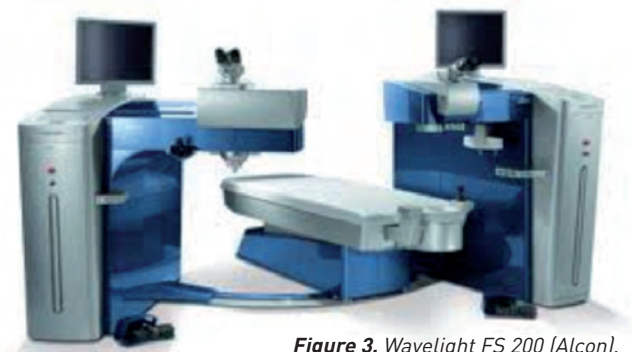


Figure 3. Wavelight FS 200 (Alcon).

Dossier

Le volet Visumax (Zeiss) (figure 4)

Le Visumax est une très grande machine au beau design. Ce laser se dispense d'anneau. L'interface de contact est sphérique et en verre. La fixation s'effectue sur la cornée et non sur la sclère avec un dispositif disponible en trois tailles afin de s'adapter sur la cornée en exerçant une faible pression par une aplanation minimale. Dès lors, et contrairement à l'IFS, la vue persiste et le patient peut fixer la mire, alors que la succion est contrôlée en peropératoire par le laser. En revanche, la durée de découpe est un peu plus lente et dépend de l'énergie.

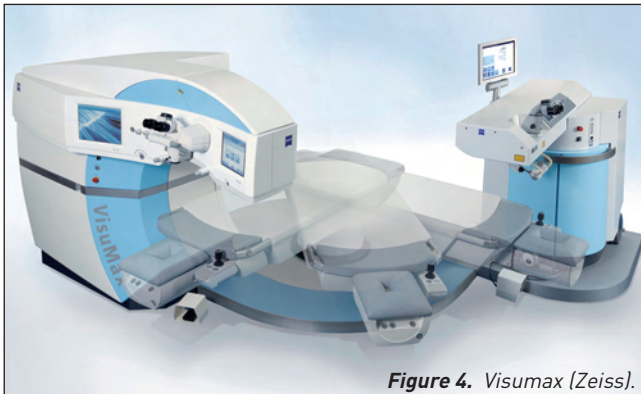


Figure 4. Visumax (Zeiss).

Le volet Technolas (figure 5)

Le FS520 est un laser apparu simultanément au modèle IntraLase, mais il a été freiné par des options moins étendues et une plus grande lenteur. La génération actuelle a gommé ces inconvénients et le futur modèle sera probablement encore plus performant. Sa technologie de découpes en spirale à travers un verre concave conservant la forme sphérique de la cornée, sans compression ni aplanation, est séduisante, mais moins celle à mettre en place que celles des autres lasers. Les spots ont un diamètre de 5 μm . La fréquence étant de 80 kHz, la durée de découpe est plus longue.



Figure 5. Technolas.

Les applications réfractives directes

Myopie

Le Visumax est en tête avec des procédés nommés Relax et Smile, le Flex (*femtosecond lenticular extraction*) pouvant corriger jusqu'à -7 D de myopie et des astigmatismes jusqu'à 4 D. Le traitement comporte alors quatre incisions successives : la découpe de la face postérieure du lenticule réfractif, le bord du lenticule, la face antérieure du lenticule, et enfin la découpe centripète du volet puis de son bord (figure 6). Le volet est ensuite soulevé et le lenticule retiré. Les résultats sont très prometteurs avec 40 % de patients à $\pm 0,5$ D de l'emmétropie et 90 % à ± 1 D.

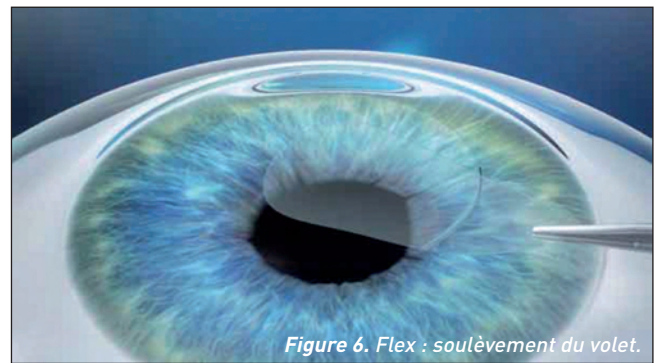


Figure 6. Flex : soulèvement du volet.

Presbytie

Le FS520 dispose d'un module Intracor (*intra corneal stromal correction*) qui est un traitement incisionnel concentrique de cinq anneaux autour d'une petite zone optique centrale (figure 7). Ce traitement ultrarapide compense la presbytie de patients peu hypermétropes.

L'analyse *wavefront* témoigne de l'aspect multifocal de la cornée, de la diminution du défocus sur le versant myopique et confirme l'augmentation de la profondeur de champ liée à l'élévation de l'aberration sphérique.

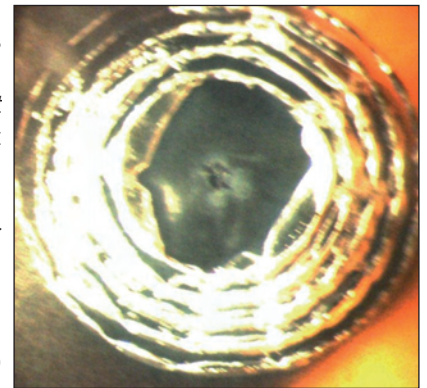


Figure 7. Incisions concentriques de l'Intracor.

Habituellement, le seul œil opéré est le dominé. Le taux de retraitements est d'environ 10-15 %.

Une seconde option purement expérimentale conduit à la réalisation de découpes laser intracristalliniennes dont l'objectif est l'« assouplissement » du cristallin par « phaco-photomodulation » sans effet cataractogène.

D'après D. Touboul, il existe un concept du contrôle de la pseudoaccommodation : induire des aberrations optiques longitudinales (perte de contraste) sans trop induire d'aberrations optiques transverses (halos, étirements).

Les kératotomies cornéennes

L'utilisation d'un laser femtoseconde pour la réalisation d'incisions est une procédure, simple, sûre et efficace.

Ce qui caractérise les lasers femtoseconde à large programme, c'est qu'ils permettent de programmer tous les types d'incisions. Évidemment, les profondeurs cornéennes sont cartographiées préalablement en OCT ou Pentacam. La kératotomie radiaire est un procédé réfractif quasi abandonné, mais son principe d'action est replicable en femtoseconde. En revanche, les incisions transverses ou curvilignes sont largement utilisées pour traiter l'astigmatisme. Habituellement, il s'agit d'une conséquence d'une induction postopératoire (greffe, pseudophaque...). La précision, la rapidité et l'innocuité sont remarquables. L'efficacité est supérieure à celle du bistouri diamant. Il n'existe pas de nomogramme spécifique. Le laser femtoseconde offre la possibilité de faire des incisions arciformes sans ouverture de l'épithélium, ce qui évite alors tout risque d'infection et évite une gêne.

Les kératoplasties

Tous les lasers femtoseconde à l'exception du Da Vinci permettent des découpes transfixiantes et lamellaires. Le greffon doit avoir une large collerette et être stabilisé sur une chambre artificielle.

Kératoplasties transfixiantes

Le laser femtoseconde introduit dans la découpe une précision et une répétabilité extraordinaire. La berge peut être modulée et ne plus être uniquement tangentielle. Les configurations « Top Hat » et « Zigzag » semblent les plus stables (*figure 8*). Les sutures peuvent être un peu moins nombreuses et sont otables plus tôt. L'astigmatisme

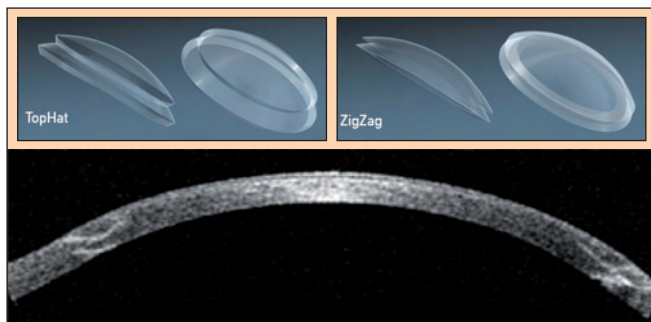


Figure 8. Greffe transfixiante au laser femtoseconde. a. En "Top Hat". b. En zigzag.

induit est moins important. Lors de la préparation du greffon, la précision et la rapidité du laser femtoseconde couplée à l'aplanation permettent de conserver les mêmes paramètres pour le donneur et le receveur. Le temps de préparation du greffon et du lit receveur est raccourci. Enfin, les distorsions peropératoires sont amoindries.

Les greffes cornéennes endothéliales

L'objectif est de greffer l'endothélium défaillant des patients atteints de dystrophie de Fuchs ou de décompensation du pseudophaque, tout en conservant le stroma présumé sain. L'opération est connue sous le nom de DSEAK (*Deep Streeping Endothelial Automated Keratoplasty*). L'emploi du laser femtoseconde montre une bonne prédictibilité de la géométrie des découpes et une qualité d'interface optiquement correcte.

Les greffes cornéennes lamellaires

Le laser femtoseconde permet de réaliser des greffes lamellaires. L'idée est de conserver l'endothélium et de quasiment supprimer le risque de rejet immunologique.

Deux types de procédés existent : la greffe antérieure et la greffe profonde ou, plus exactement, prédécemétique. La découpe au laser est possible avec tous les lasers mais bien plus précise et régulière en l'absence d'aplanation. D'une façon générale, la découpe au sein de la cornée est d'autant plus difficile que l'on s'éloigne de l'épithélium. En effet, un certain degré d'absorption du laser oblige à utiliser des niveaux énergies plus élevés. De surcroît, la précision de la focalisation diminue. Ceci est d'autant plus vrai que la transparence de la cornée diminue, ce qui se passe en cas d'œdème et ou de taie. Le laser permet l'exacte superposition entre donneur et receveur et accélère la préparation. Mais il n'épargne pas le temps manuel de dissection postérieure et ne supprime pas l'écueil principal de la greffe lamellaire profonde qui est la perforation.

Les tunnels stromaux cornéens pour anneaux

Les anneaux intracornéens régularisent la courbure de la cornée en aplatissant les zones les plus cambrées. On peut poser un ou deux anneaux, les formes en arcs sont variées (*figure 9*). Les nomogrammes proposent des modèles d'implantation selon le défaut à redresser ou stopper. L'indication quasi unique est le kératocône ou les états voisins ainsi que certains forts astigmatismes. La cornée centrale est indemne. Les anneaux peuvent s'enlever en cas de complications. De plus en plus, il est proposé de l'associer à un cross-linking. Le laser femtoseconde a été le starter du développement en permettant

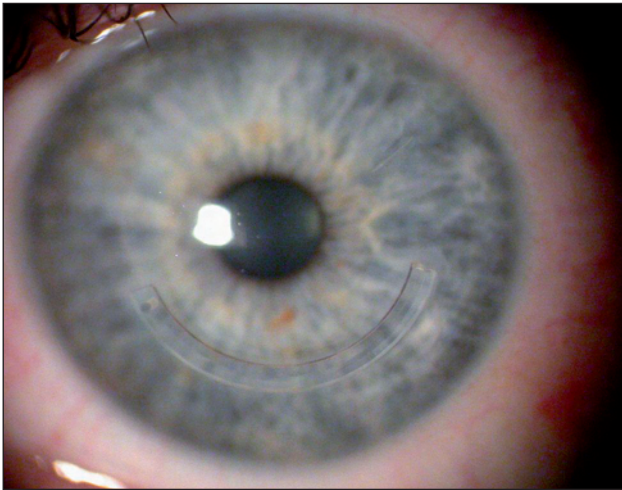


Figure 9. Anneaux intracornéens.

de se libérer des dangereux tunneliers mécaniques. Désormais, le tunnel est fait en 6 à 10 secondes sous simple analgésie topique avec une sécurité absolue pour peu que le centrage soit effectué avant l'aplanation.

Le femtolaser pour l'opération de la cataracte

L'intérêt du laser femtoseconde est toujours de faire mieux que le bistouri ou la lame : le faisceau remplace l'acier. Il existe quatre dispositifs proposés aux chirurgiens et déjà plusieurs centres français en disposent : le LensSc racheté par Alcon, le LensAR, le Catalys et le Victus. Ce dernier, proposé par Technolas, est marqué CE.

Les appareils se ressemblent en dépit de différences dans les détails et méthodes. Ils comportent tous un système OCT ou 3D et un système d'interface et/ou d'aplanation. La rapidité est de règle : 3 à 4 secondes sont nécessaires pour inciser la cornée, faire le capsulorhexis et ébranler la cataracte. Les incisions cornéennes sont faites à la demande et sous toutes formes. Le capsulorhexis est le triomphe le plus patent de la technique : il adopte la forme affichée, est régulier, centré et solide. Les entames dans le noyau cristallinien sont calculées par le dispositif de contrôle pour ne pas atteindre la capsule postérieure. La forme est diverse et les impacts commencent à fragmenter et solubiliser le contenu. Les lasers ne suppriment pas encore la nécessité de l'aspiration de la

cataracte et même de la phacoémulsification. L'injection de l'implant est inchangée.

Le point clef du laser femtoseconde est la parfaite cohérence et précision entre les imageries et les traitements. La qualité de l'OCT est primordiale et il est souhaitable que l'image ne soit pas figée mais permanente et dynamique pendant les tirs. Pour le moment, l'appareil est bien cher pour gagner une minute aussitôt perdue lors de la mobilisation du patient sous le microscope opératoire de la chirurgie conventionnelle. Certes, la sécurité est maximisée mais l'opération est déjà très sûre. C'est donc une double raison qui milite pour ce type de méthode : d'une part un effet marketing – le laser pour la chirurgie de la cataracte – et, d'autre part, un acte de foi dans le développement technologique rapide de ce soin. Les fabricants ne veulent à aucun prix manquer la réédition du passage à la phacoémulsification qui l'emporta avec le temps sur la double canule manuelle.

Conclusion

Le laser femtoseconde est l'outil qui s'imposera dans de nombreux champs chirurgicaux du segment antérieur. Les applications se cherchent encore en dehors des cornéoplasties réfractives mais elles s'imposeront petit à petit.

Références

Cet article procède de connaissances non référées que le lecteur pourra retrouver, entres autres, dans les ouvrages suivants :

- Azar DT, Gatineau D, Hoang-Xuan T. Refractive surgery. Elsevier Mosby, 2007.
- Buratto L, Slade S, Tavolato M. Lasik: the evolution of refractive surgery. Slack, 2011.
- Chang D. Mastering refractive IOLs: the art and science. Slack, 2008.
- Davis AE, Harden RD, Lindstrom, LR. Presbyopia lens surgery: a clinical guide to current technology. Slack, 2007
- Faktorovich EG. Femtodynamics. Slack, 2009.
- Krueger RR, Talamo JH, Lindstrom RL. Laser refractive cataract surgery. Springer, 2012.
- Pinelli R. Lasik and lasik complications. Jaypee Brothers Medical Publishers, 2008.
- Price FW Jr, Price MO. DSEK: what you need to know about endothelial keratoplasty. Slack, 2009.
- Saragoussi JJ, Arne JL. Chirurgies de la réfraction. Masson, 2006.
- Vinciguerra P, Camesasca FI. Refractive surface ablation. Slack, 2007.
- Wang M. Keratoconus and keratoectasia. Slack, 2009.