

Mise en contexte

LES lasers sont aujourd'hui présents dans de nombreux domaines industriels, militaires et scientifiques : télécommunications, métrologie, diagnostics et traitements médicaux, usinage de matériaux, etc. Les rayonnements laser utilisés par ces applications sont généralement suffisamment intenses pour causer des lésions irréversibles sur la rétine en cas d'observation directe ou indirecte. Certaines de ces applications nécessitent l'utilisation d'un faisceau laser se propageant dans l'atmosphère. Il faut donc concevoir des émetteurs dont le rayonnement est inoffensif. Un tel laser est dit à sécurité oculaire.

Ce chapitre montre l'intérêt des sources à sécurité oculaire, ainsi que les architectures possibles pour obtenir de tels émetteurs. Il présente le projet Minitélia, et traduit ses objectifs vers un cahier des charges techniques, finalement comparé avec l'état de l'art.

1.1 Intérêt des sources laser à sécurité oculaire

DE nombreuses applications civiles et militaires utilisent des sources laser lorsqu'elles requièrent une propagation dans l'atmosphère sur de longues distances, typiquement de l'ordre du kilomètre à la vingtaine de kilomètres. Parmi ces applications, on peut noter la télémétrie, la vélocimétrie, l'anémométrie, la détection et la mesure de polluants, et de manière générale toutes les applications LiDAR¹. La majorité de ces applications requiert des sources émettant des impulsions plutôt qu'un rayonnement continu, d'une part pour permettre les mesures du temps de vol (si besoin), et d'autre part pour bénéficier d'une puissance instantanée pendant l'impulsion (puissance crête) beaucoup plus importante que la puissance moyenne des sources continues.

La propagation libre de telles impulsions laser pose des problèmes de sécurité. En effet, un faisceau laser intense peut causer des dégâts temporaires ou irrémediables aux yeux en vision directe ou indirecte. Pour rendre l'émetteur inoffensif, il faut donc diminuer l'énergie des impulsions, ce qui diminue aussi la portée du système.

¹Acronyme de l'expression anglaise *Light Detection And Ranging*. En français : *Télédétection par laser*.

Cependant, il existe une gamme de longueur d'onde où un rayonnement laser peut être suffisamment intense pour atteindre des portées d'une dizaine de kilomètres, sans pour autant être dangereux. Cette gamme se situe entre 1,5 μm et 1,8 μm ; gamme où l'oeil humain présente un seuil de dommage élevé (fig. 1.1). Une source émettant un faisceau laser dans cette gamme est dite à *sécurité oculaire*.

Pour des impulsions d'une durée de 10 ns, le seuil de densité d'énergie sur la cornée est de $5 \cdot 10^{-6} \text{ J/cm}^2$ à 1 μm (fig. 1.2). Il est de 1 J/cm^2 dans la gamme de sécurité oculaire.

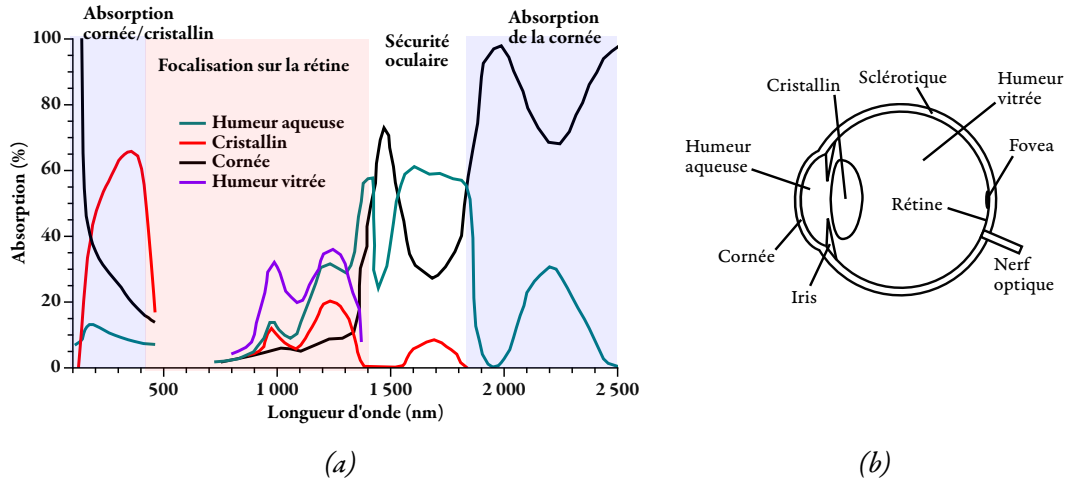


FIG. 1.1 : (a) Absorption des éléments de l'œil en fonction de la longueur d'onde. L'absorption des faisceaux laser à sécurité oculaire est répartie sur la cornée, le cristallin et l'humeur aqueuse. L'intensité du faisceau est alors suffisamment faible pour ne pas endommager la rétine après focalisation.

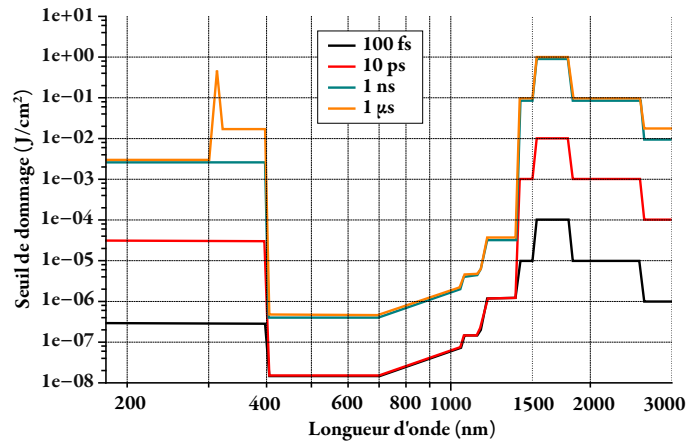


FIG. 1.2 : Seuils de dommage de l'œil en densité d'énergie sur la cornée en fonction de la longueur d'onde et pour différentes durées d'impulsion (IEC 60825).

1.2 Transmission de l'atmosphère dans la gamme de sécurité oculaire

L'ATMOSPHÈRE présente un minimum local d'absorption dans la gamme de longueurs d'onde à sécurité oculaire (fig. 1.3). Il est donc possible de concevoir une source laser ne présentant aucun risque de dommage oculaire, et proposant en même temps de longues portées, de l'ordre de la dizaine de kilomètre.

Ainsi, pour améliorer leur portée, la plupart des applications qui requièrent une propagation dans l'atmosphère utilisent alors des faisceaux laser dont la longueur d'onde est située autour de ce minimum d'absorption, typiquement entre 1550 nm et 1620 nm.

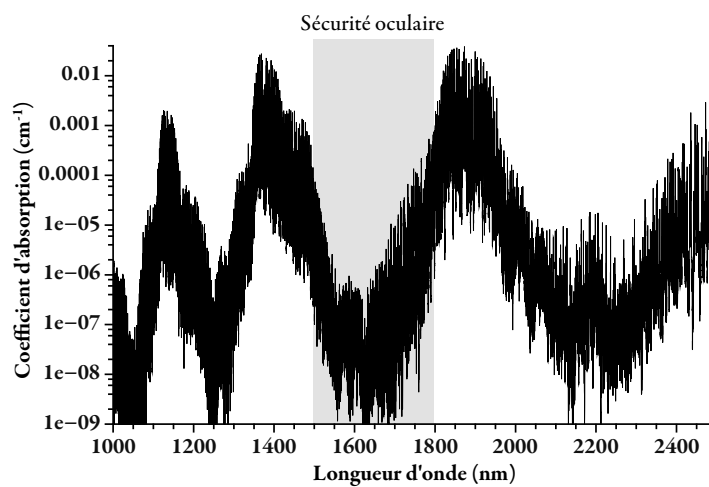


FIG. 1.3 : Coefficient d'absorption de l'atmosphère entre 1 μm et 2,5 μm d'après la base de données de transmission HITRAN (Acronyme pour *High resolution transmission*, base de données de la transmission spectroscopique des différents constituants de l'atmosphère). La gamme à sécurité oculaire coïncide avec un minimum local de l'absorption. Les nombreuses raies d'absorption très fines des différents constituants de l'atmosphère donnent à la courbe son aspect particulier.

1.3 Sources laser à sécurité oculaire

IL existe des systèmes matures et capables de produire de fortes puissances et énergies autour de 1 μm , comme par exemple les sources solides basées sur les cristaux de Nd:YAG. Ces sources peuvent servir d'injecteurs pour des oscillateurs paramétriques optiques [Foltynowicz2011, Liu2008, Marshall1993, Webb1998] ou de pompe pour les oscillateurs à effet Raman [Chen2004, Mayor2004, Takei2002]. Ces architectures réalisent une conversion non linéaire en longueur d'onde de 1 μm vers la gamme à sécurité oculaire.

Mais l'aspect multi-étages de ces architectures et leur relative complexité ne sont pas souhaitables pour la conception d'une source compacte de faible coût.

Il existe quelques ions capables d'émettre directement dans la gamme à sécurité oculaire dont le thulium. Ses sections efficaces d'absorption et d'émission [Agger2006] permettent techniquement une émission à $1,8 \mu\text{m}$ [Güell2004], mais au prix d'une efficacité faible due à sa section efficace d'absorption non nulle à cette longueur d'onde. De plus, les longueurs d'onde autour de $1,8 \mu\text{m}$ ne sont pas assez transparentes dans l'atmosphère (fig. 1.3). Cet ion est plus souvent utilisé pour émettre entre $1,9 \mu\text{m}$ et $2,1 \mu\text{m}$ [Dai2013]. Enfin, l'ion thulium se pompe autour de 790 nm . Ce défaut quantique important (56%) impose une importante gestion thermique du cristal.

Lorsqu'il est pompé directement par une diode laser InP à 1470 nm ou à 1532 nm , l'ion erbium permet aussi une émission directe à sécurité oculaire à $1,6 \mu\text{m}$, plus précisément à 1617 nm ou à 1645 nm (dans le YAG) (fig. 1.4). Ces longueurs d'onde coïncident avec un minimum d'absorption de l'atmosphère dans la gamme à sécurité oculaire (fig. 1.3). Cependant, ses section efficace d'absorption pour ces raies d'émission ne sont pas négligeables (fig. 1.5), ce qui nécessite de consacrer beaucoup d'effort de dimensionnement du cristal, en comparaison du néodyme par exemple. C'est un ion très polyvalent, utilisé pour de nombreuses autres applications, en particulier dans le monde des télécommunications et le monde médical (cf. annexe *Autres utilisation de l'ion erbium*).

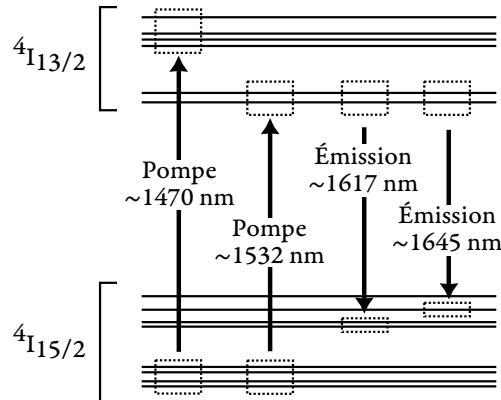


FIG. 1.4 : Représentation schématique des multiplets $^4I_{13/2}$ et $^4I_{15/2}$ qui interviennent dans l'émission à $1,6 \mu\text{m}$. Schéma inspiré de [Eichhorn2008].

L'ion erbium est le cœur du sujet de thèse. Il est relativement peu étudié en comparaison des ions néodyme et ytterbium, mais il possède un potentiel certain pour l'émission à sécurité oculaire, ce qui explique son attrait pour quelques groupes de recherche en laser.

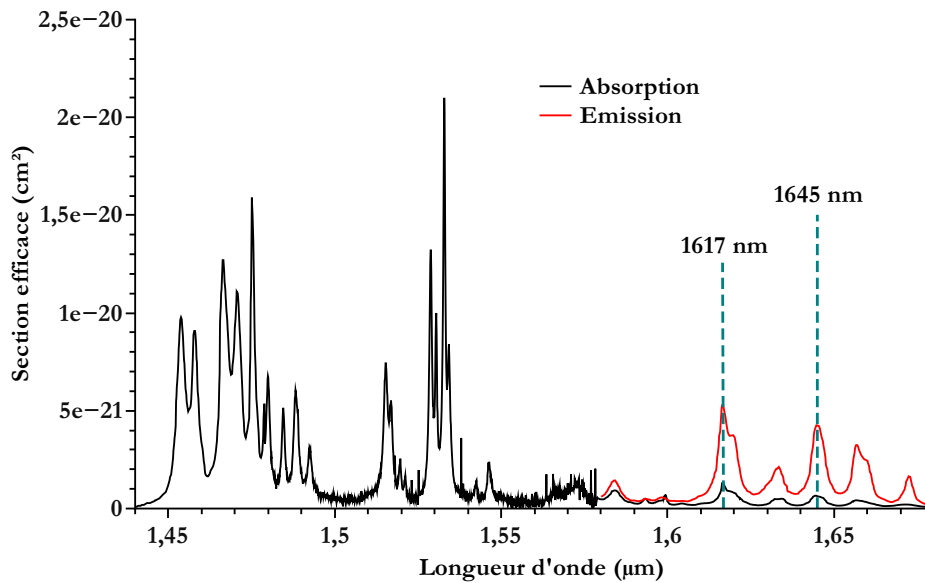


FIG. 1.5 : Spectres des sections efficaces d'absorption (en noir) et d'émission (en rouge) de l'Er:YAG à température ambiante (300 K), numérisés à partir de [Eichhorn2008]. L'émission laser a lieu à 1645 nm et à 1617 nm (en bleu) lorsque le cristal est pompé à 1470 nm ou à 1532 nm.

1.4 État de l'art des sources lasers solides impulsives dopées erbium pompées optiquement

TROIS architectures autour de l'ion erbium sont possibles. Tout d'abord, les lasers à fibre dopés erbium, dont la technologie est issue du monde des télécommunications² utilisent exclusivement des longueurs d'onde comprises entre 1,5 µm et 1,6 µm. Cette gamme correspond au minimum d'absorption de la silice, matière de base des fibres optiques. Cette architecture est très efficace grâce à l'excellent recouvrement entre la pompe et le signal laser à amplifier. Elle permet d'obtenir des faisceaux de très bonne qualité spatiale (limitée par la diffraction).

Cependant, cette approche se montre limitée en énergie et en durée d'impulsion. En effet, à cause du confinement du signal dans la fibre optique sur un diamètre de quelques micromètres, les seuils des effets non-linéaires (Brillouin, Raman, lentille Kerr, etc.) peuvent rapidement être atteints ; typiquement à partir de quelques dizaines de microjoules pour des impulsions d'une durée de 10 ns.

À l'inverse, les milieux à gain massifs en verres dopés erbium³ permettent d'émettre des énergies importantes (quelques millijoules), mais la faible conductivité thermique du verre empêche leur montée en puissance moyenne et limite l'efficacité totale de la source. Ainsi, concevoir un oscillateur dépassant 100 mW de puissance moyenne requiert des montages expéri-

²Windcube™ de Leosphere, www.leosphere.com

³Kigre, www.kigre.com

mentaux complexes [Bykov2008].

Les lasers solides à cristaux dopés erbium se situent entre ces deux solutions techniques. L'énergie en sortie est supérieure à celle des lasers à fibre puisque les sections des faisceaux traversant le cristal sont plus larges. La montée en puissance moyenne est plus facile qu'avec un milieu laser massif en verre grâce à leur meilleure conductivité thermique.

Un cristal dopé erbium peut être optiquement pompé par différentes méthodes : par lampe flash [Skorczakowski2011], par une diode laser [Wang1992] ou bien par une autre radiation laser [Kim2009]. La dissipation thermique des lampes flash est compliquée à mettre en œuvre, ce qui limite leur cadence de répétition, et donc la cadence de la source pompée. De plus, ces lampes émettent un spectre très large, ce qui rend ce type de pompe relativement peu efficace pour pomper des cristaux dont la largeur des raies d'absorption sont généralement fines. Cet état de l'art ne s'attarde donc pas sur les cavités pompées par lampe flash.

Pour pomper optiquement un cristal d'Er:YAG avec une diode laser, on peut utiliser une diode InP (phosphore d'indium) à 1470 nm ou à 1532 nm.

Puisque l'ion erbium présente des sections efficaces d'absorption et d'émission importantes (fig. 1.5) à 1532 nm, il est possible de pomper un cristal Er:YAG grâce à un laser à fibre dopée erbium. La qualité spatiale et à la finesse spectrale de ces faisceaux de pompe permet de concevoir des lasers solides dopés erbium avec de meilleures efficacités par rapport à un pompage direct par diode laser. Cependant, ces performances se font au prix d'une plus grande complexité, puisque trois étages optiques composent le laser final (diode laser → laser à fibre dopé erbium → laser solide erbium) au lieu de deux pour le pompage par diode laser (diode laser → laser solide erbium).

Il convient donc de séparer l'état de l'art entre les lasers pompés par laser à fibre et ceux pompés directement par diode laser. Comme indiqué précédemment (cf. 1.1), les sources continues ont un intérêt limité et ne sont pas représentées dans cet état de l'art.

1.4.1 Lasers à cristaux dopés erbium pompés par lasers à fibre

1.4.1.1 Déclenchement actif

UN des premiers résultats au delà du millijoule provient de D. Y. Shen et al. [Shen2006], où des impulsions de 4 mJ, 100 ns, 1 kHz à 1645 nm ont été obtenues grâce à un modulateur électro-optique avec un cristal Er:YAG. K. Spariosu et al. a obtenu la même année des résultats similaires à 1645 nm et a observé une chute de l'énergie d'un facteur deux lorsque l'émission de sa cavité était imposée à 1617 nm [Spariosu2006]. J. W. Kim et al. a établi le record en énergie pour une cavité pompée par laser à fibre et déclenchée activement avec des impulsions de 30.5 mJ, 20 ns, 20 Hz à 1645 nm [Kim2009] (fig. 1.6), avec un facteur de qualité M^2 (cf. annexe *Facteur de qualité d'un faisceau laser*) de 4,1.

Pour certaines applications spécifiques, comme la détection et le dosage de méthane dans l'atmosphère [Fritsche2013, White1972], il peut être nécessaire de générer ou d'amplifier des impulsions à spectre fin. R. C. Stoneman et al. a amplifié des impulsions issues d'une diode mo-

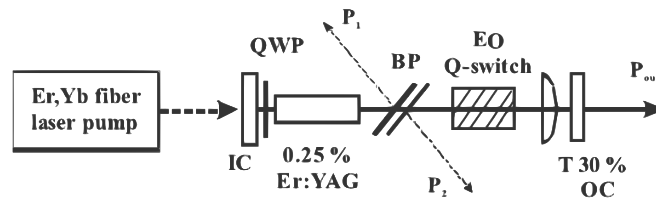


FIG. 1.6 : Source laser Er:YAG pompée par laser à fibre et déclenchement activement utilisée par J. W. Kim [Kim2009]

nomode longitudinale à rétroaction répartie⁴ avec deux étages d'amplification, chacun pompé par un laser à fibre dopé erbium à 1532 nm et utilisant un cristal Er:YAG comme milieu à gain [Stoneman2007]. Ainsi, des impulsions de 470 μ J, 1.1 ns, 10 kHz à 1617 nm ont été générées.

Des impulsions de 2.3 mJ, 90 ns, 100 Hz ont été obtenues six ans plus tard à l'aide d'un cristal Er:LuYAG pompé par deux lasers à fibre émettant 4 W chacun [Meissner2013]. L'émission monomode longitudinal à 1645 nm est assurée par l'injection dans la cavité d'un faisceau issu d'une diode laser DFB et le déclenchement actif est obtenu par un modulateur électro-optique (fig. 1.7).

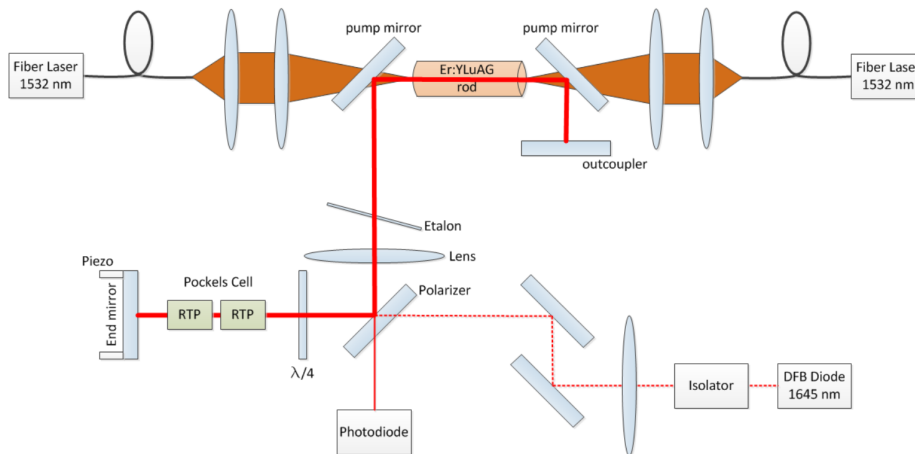


FIG. 1.7 : Schéma de la source laser Er:LuYAG utilisée par A. Meissner [Meissner2013]

1.4.1.2 Déclenchement passif

Lorsque des impulsions de 225 μ J, 7 ns, 4 kHz à 1617 nm ont été démontrées [Stultz2005] à l'aide d'un laser à fibre à 1534 nm de 16 W de puissance moyenne. Un cristal de sélénure de zinc dopé au chrome (Cr:ZnSe) assure le déclenchement passif (fig. 1.8). D'autres absorbants

⁴Distributed feedback laser (DFB) en anglais.

saturables, comme le sulfure de zinc dopé au chrome (Cr:ZnS) et le sélénure de zinc dopé au cobalt (Co:ZnSe) (cf. 3.2.1) ont permis de générer des impulsions de 150 μJ , 90 ns, 40 kHz à 1645 nm [Terekhov2014].

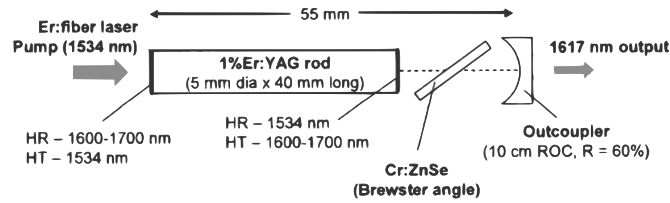


FIG. 1.8 : Schéma de la source laser Er:YAG déclenchée passivement par un cristal de Cr:ZnSe [Stultz2005]

Le graphène peut être utilisé comme absorbant saturable. Il possède un spectre d'absorption très large allant du visible jusqu'au delà de 3 μm , et peut donc être utilisé comme absorbant saturable, même au delà de 2 μm [Jin2014, Lu2013]. Malheureusement, le graphène est très fragile (son seuil de dommage optique est de 14 mJ/cm^2 [Currie2011]), et il n'est techniquement pas encore possible d'en superposer plus que quelques couches ; les transmissions initiales des absorbants saturables à base de graphène sont donc généralement hautes (au delà de $\sim 95\%$), et ne permettent pas de générer des impulsions à basse cadence avec beaucoup d'énergie.

La première démonstration d'un déclenchement passif en utilisant le graphène provient de C. Gao et al., où des impulsions de 7 μJ , 2,2 μs , 15 kHz à 1645 nm ont été obtenues en Er:YAG avec une monocouche de graphène sur un substrat SiC, et une puissance de pompe de 7 W issue d'un laser à fibre erbium [Gao2012]. Un cristal Er:LuYAG a permis de générer des impulsions de 6 μJ , d'une durée de 2 μs , à une cadence de 79 kHz [Yang2013].

1.4.2 Lasers à cristaux dopés erbium pompés directement par diode laser

1.4.2.1 Déclenchement actif

LES énergies en sortie de lasers Er:YAG pompés en continu par des diodes à 1532 nm ou 1470 nm n'ont pas cessé de croître durant ces dernières années grâce à l'augmentation des puissances des diodes proposées commercialement. Ainsi, de 2,2 mJ avec 24 W de pompe [Chang2010] puis 8 mJ avec 50 W de pompe [Bigotta2010] en 2010, des énergies de 24 mJ furent démontrées avec 180 W de pompe en 2013 [Galecki2013], pour finir à 120 mJ en 2014 avec 720 W de pompe et une cadence de 30 Hz [Larat2014].

Les cristaux Er:YAG ne présentent qu'un faible gain [Larat2014] et l'émission stimulée à la longueur d'onde de pompe limite l'énergie stockée [Aubourg2014a]. Ainsi, obtenir de telles énergies requiert la conception de systèmes complexes dont les rendements électro-optiques peuvent être inférieures au pourcent (fig. 1.9).

Une piste potentielle est l'utilisation de cristaux co-dopés erbium/ytterbium. L'idée est d'utiliser des diodes laser émettant autour 940 nm. Celles-ci sont en effet plus efficaces, plus

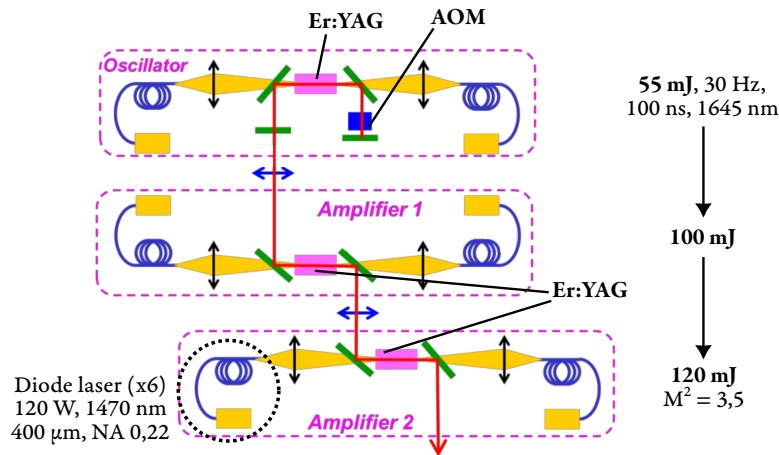


FIG. 1.9 : Configuration utilisée par [Larat2014]. Chaque étage est pompé par deux diodes de 120 W. Les amplificateurs optiques ont un gain autour de 1,4 chacun. Les cristaux Er:YAG sont dopés 0,5%. Leur longueur est de 60 mm et 75 mm pour l'oscillateur et les deux amplificateurs respectivement.

brillantes et moins chères que les diodes InP à 1,5 μm. Leur capacité à pomper les amplificateurs pour les réseaux de télécommunications ont fait d'elles l'objets de nombreuses recherches visant à les améliorer.

Ce sont alors les ions ytterbium qui sont excités optiquement, et qui transmettent leur énergies aux ions erbium (fig. 1.10). Cette approche est courante, entre autre dans le monde des télécommunications, pour un milieu amorphe comme le verre [Laporta1991, Levoshkin2001], où les conditions pour obtenir une inversion de population efficace du niveau $^4I_{13/2}$ de l'erbium sont remplies :

1. La différence d'énergie entre les niveaux $^2F_{5/2}$ de l'ytterbium et $^4I_{11/2}$ de l'erbium doit être la plus faible possible. En d'autres termes, les sections efficaces des deux ions autour de 1530 nm doivent se recouvrir le mieux possible. La structure amorphe du verre induit un élargissement spectral des sections efficaces par rapport à une structure cristalline, ce qui permet d'assurer un bon transfert d'énergie entre les ions.
2. La désexcitation du niveau $^4I_{11/2}$ vers $^4I_{13/2}$ doit être suffisamment rapide pour limiter le transfert d'énergie inverse, perturbant l'inversion de population des ions erbium. Dans le verre, ce temps de vie est de 3 μs, alors qu'il peut être de quelques centaines de microsecondes pour les milieux cristallins [Tsang2009].

Cependant, le coefficient de transfert thermique du verre étant faible ($\sim 0,8 \text{ W}/(\text{K.m})$), ce milieu n'est pas adapté pour concevoir des lasers dont les puissances moyennes dépassent la dizaine de watts, d'où les nombreuses tentatives de lui trouver un remplaçant cristallin, comme le YAG [Georgiou2005, Schweizer1995], le $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ [SimondiTeisseire1996], le YVO_4 [Tolstik2007], le $\text{GdCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$ [Denker2004], le $\text{YCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$ [Wang2002], le Y_2SiO_5

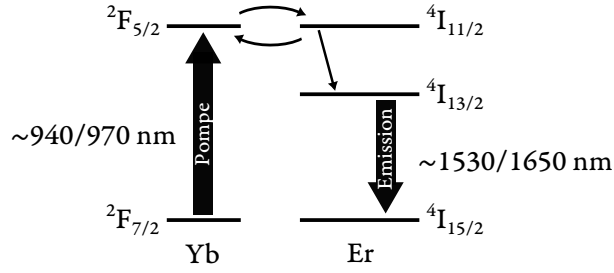


FIG. 1.10 : Schéma de principe du transfert d'énergie entre un ion ytterbium pompé à 940/980 nm et un ion erbium émettant vers 1530 nm.

[Li1994], ou encore le $KY(WO_4)_2$ [Kuleshov1997]. De toutes ces recherches se détache un résultat significatif où des impulsions de 320 μ J, 32 ns, 1 kHz et 520 μ J, 67 ns, 1 kHz ont été générées par un cristal de $LuAl_3(BO_3)_4$ pompé à 970 nm par une diode fibrée de 15 W [Chen2013].

1.4.2.2 Déclenchement passif

AVANT 2010, le déclenchement passif d'une cavité solide erbium n'a été démontrée qu'une seule fois, en pompant un cristal de YAG co-dopé ytterbium/erbium à l'aide de diodes laser à 960 nm en configuration transverse (fig. 1.11). Des impulsions de 1,7 mJ et d'une durée de 370 ns ont été générées grâce deux diodes laser émettant des énergie de 4,7 J en régime quasi-continu [Georgiou2005]. L'absorbant saturable utilisé est un cristal de $Co^{2+}:MgAl_2O_4$ (Co:MALO) (cf. 3.2.1). D'autres résultats utilisant des cristaux co-dopés pompés à 940 nm et déclenchés par un cristal de Co:MALO ont ensuite émergé ; un microchip Er:Yb:YAB émettant des impulsions de 5 μ J, 5 ns, 60 kHz à 1602 nm [Kisel2012] et un cristal Er:Yb:LuAB générant des impulsions de 29 μ J, 40 ns, 22 kHz à 1540 nm [Chen2012].

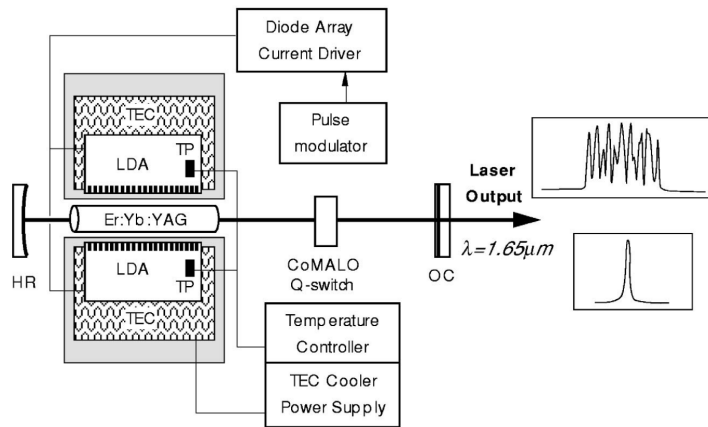


FIG. 1.11 : Schéma de la configuration utilisée par [Georgiou2005]

A l'exception de nos travaux [Aubourg2013], et des travaux de R. Zhou et al. [Zhou2014] qui utilise une mono-couche de graphène comme absorbant saturable pour obtenir des impulsions de 13 μJ à 35 kHz, aucun laser solide utilisant un cristal dopé erbium (uniquement) pompé par diodes lasers à 1470 nm ou 1532 nm et déclenchée passivement n'a été publiée.

1.4.3 État de l'art au Laboratoire Charles Fabry

DES premières explorations sur les fibres cristallines Er:YAG ont déjà été menées par Igor Martial lors de ses travaux de thèses [Martial2011]. Ces recherches sont à l'époque une des premières explorations autour du pompage par diodes de cristaux Er:YAG, en particulier pour une émission à 1617 nm. À l'aide d'une diode à 1532 nm délivrant une puissance de 60 W, d'un cristal d'Er:YAG dopé 0,5% d'une longueur de 60 mm, de diamètre 0,8 mm (fibre cristalline), et d'un modulateur acousto-optique (fig. 1.12), des énergies de 2 mJ par impulsion ont été obtenues à 1645 nm, d'une durée de 38 ns, et avec une cadence de répétition de 1 kHz.

À l'aide d'un étalon de 50 μm d'épaisseur introduit à l'intérieur de la cavité pour forcer l'émission à 1617 nm, des impulsions avec des énergies de 470 μJ et d'une durée de 28 ns furent générées à une cadence de 100 Hz. À 1 kHz, l'énergie des impulsions est de 350 μJ .

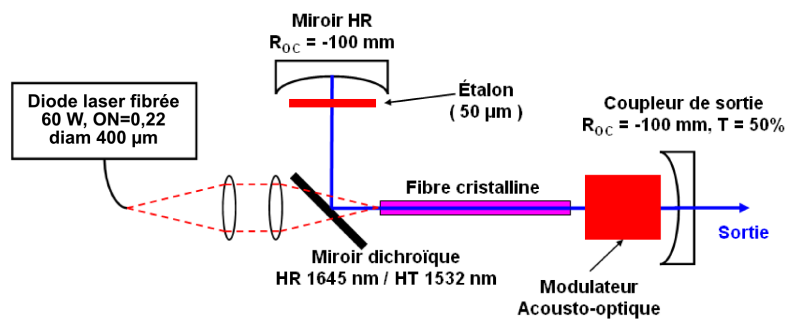


FIG. 1.12 : Schéma expérimental de la source laser déclenchée activement à 1645 nm et à 1617 nm développée au laboratoire Charles Fabry durant la thèse d'Igor Martial [Martial2011].

1.4.4 Conclusion sur l'état de l'art

UN résumé synthétique de l'état de l'art est proposé 1.1. Depuis le résultat de 30 mJ par impulsion établi par J. W. Kim [Kim2009] à l'aide d'un cristal Er:YAG pompé par un laser à fibre, les recherches se sont focalisées sur les lasers pompées par diode par soucis de simplification et de réduction des coûts. Celles-ci ont permis, grâce à l'augmentation de la puissance et de la brillance des diodes autour de 1,5 μm , d'obtenir des dizaines de millijoules par impulsion [Galecki2013, Larat2014].

Le projet Minitélia s'inscrit dans cette démarche de simplification et d'augmentation de performances des émetteurs à sécurité oculaire. Le déclenchement passif est une piste cruciale pour la compacité et l'efficacité globale. Cependant, cette méthode de génération d'impulsion

n'a encore jamais été utilisée pour démontrer des énergies par impulsion de l'ordre du millijoule (tab. 1.1).

L'émission à 1617 nm est relativement peu étudiée. En effet, celle-ci requiert l'utilisation de composants optiques supplémentaires (comme un étalon), et peut se révéler difficile à obtenir si le gain de la cavité n'est pas suffisant. De plus, comme les performances obtenues à cette longueur d'onde sont généralement plus faibles qu'à 1645 nm, cette longueur d'onde n'est pas utilisée par les applications en recherche d'impulsions très énergétiques.

La thèse vise à établir les premières performances d'une cavité émettant à sécurité oculaire, pompée directement par diode laser et déclenchée passivement.

Référence	[Kim2009]	[Stultz2005]	[Galecki2013]	[Zhou2014]	[Larat2014]	[Chen2012]
Pompe	Laser à fibre		Diode laser			
λ_{pompe}	1532 nm		1532 nm		1470 nm	970 nm
Déclenchement	Actif (EOM)	Passif (Cr:ZnSe)	Actif (AOM)	Passif (graphène)	Actif (AOM)	Passif (Co:MgAlO)
Cristal	Er:YAG	Er:YAG	Er:YAG	Er:YAG	Er:YAG	Er:Yb:LuAB
λ_{laser}	1617 nm	1617 nm	1645 nm	1645 nm	1645 nm	1540 nm
Performances	23 mJ	225 μ J	24 mJ	13 μ J	55 mJ	28,6 μ J
	20 ns	7 ns	91 ns	7,8 μ s	100 ns	40 ns
	30 Hz	4 kHz	100 Hz	35 kHz	30 Hz	22 kHz

TAB. 1.1 : Résumé de l'état de l'art

1.5 Le projet Minitélia

1.5.1 Le cahier des charges du projet Minitélia

LES applications en illumination laser (cf. 1.1) recherchent de nouvelles architectures de sources à sécurité oculaire alliant énergie, compacité, efficacité, et insensibilité thermique, pour remplacer les émetteurs actuellement utilisés dont les limites physiques et techniques empêchent leur montée en performance.

Le projet Minitélia, financé par la Direction Générale de l'Armement, réunit trois acteurs : Les sociétés Fibercryst et Cilas, et le laboratoire Charles Fabry. Il a pour ambition de proposer un prototype de source laser innovante, utilisant un cristal dopé erbium et répondant à ce besoin, dont les spécifications pour la télémétrie sont les suivantes :

- Inoffensif pour l'œil en vision directe en sortie d'émetteur
- Portée de 10 km

- Mise à jour de la mesure toutes les secondes
- Précision de mesure de l'ordre du mètre
- Compacité et consommation électrique inférieure à 50 W
- Insensibilité thermique sur la gamme $-40\text{ }^{\circ}\text{C}/+60\text{ }^{\circ}\text{C}$

La matrice cristalline retenue pour le projet Minitélia est le grenat d'yttrium et d'aluminium (YAG). C'est un cristal dont la synthèse est maîtrisée par de nombreuses entreprises, ce qui permet d'assurer des approvisionnements rapides et nombreux. De plus, son utilisation en tant que milieu à gain laser est bien documentée.

Les solutions techniques retenues pour chacune de ces spécifications, présentées au paragraphe suivant, permettent d'établir l'architecture globale du projet (cf. 1.5.3) et de comparer les performances désirées avec l'état de l'art (cf. 1.5.4).

1.5.2 Transcription du cahier des charges

UNE première analyse du cahier des charges permet de fixer les spécifications techniques de l'émetteur laser et d'établir une version préliminaire de l'architecture du système et de sa cavité. Ce travail sert de base pour les analyses théoriques et les développements expérimentaux (respectivement chapitres 2 et 3).

1.5.2.1 Énergie, cadence et longueur d'onde d'émission

LES cristaux Er:YAG possèdent deux longueurs d'onde d'émission dans la gamme à sécurité oculaire : 1617 nm et 1645 nm (fig. 1.5). Grâce à un étalon [Spariosu2006], un miroir résonnant (cf. annexe *Sélectivité spectrale par miroir résonnant intra-cavité*) ou à un absorbant saturable, il est possible de sélectionner l'une de ces longueurs d'onde. À énergie équivalente, la longueur d'onde la moins absorbée par l'atmosphère sera celle qui permettra la portée la plus importante ; il est alors intéressant de connaître le coefficient d'absorption de l'atmosphère pour chacune d'entre elle.

Les raies d'émission de l'Er:YAG sont précisément 1617,0 nm et 1645,2 nm. En supposant un spectre de profil gaussien et de largeur à mi-hauteur de 0,3 nm (ordre de grandeur généralement observée dans nos expériences), on peut évaluer les coefficients d'absorption de l'atmosphère à ces longueurs d'onde, via la base de données HITRAN : 1.10^{-7} cm^{-1} à 1617 nm et 5.10^{-7} cm^{-1} à 1645 nm (fig. 1.13). Concrètement, un faisceau à 1645 nm perd 50% de son intensité sur un aller-retour pour une cible à 7 km. Un faisceau à 1617 nm ne perd que 10% de son intensité pour une distance identique (fig. 1.14). Ainsi, à énergie égale, il est possible de multiplier par 5 la portée d'une source laser en choisissant une longueur d'onde d'émission de 1617 nm. C'est donc cette dernière longueur d'onde qui est retenue pour le projet Minitélia. Malheureusement, les cristaux Er:YAG montrent une efficacité plus faible à 1617 nm qu'à

1645 nm, car leur section efficace d'absorption à 1617 nm est plus importante qu'à 1645 nm (fig. 1.5).

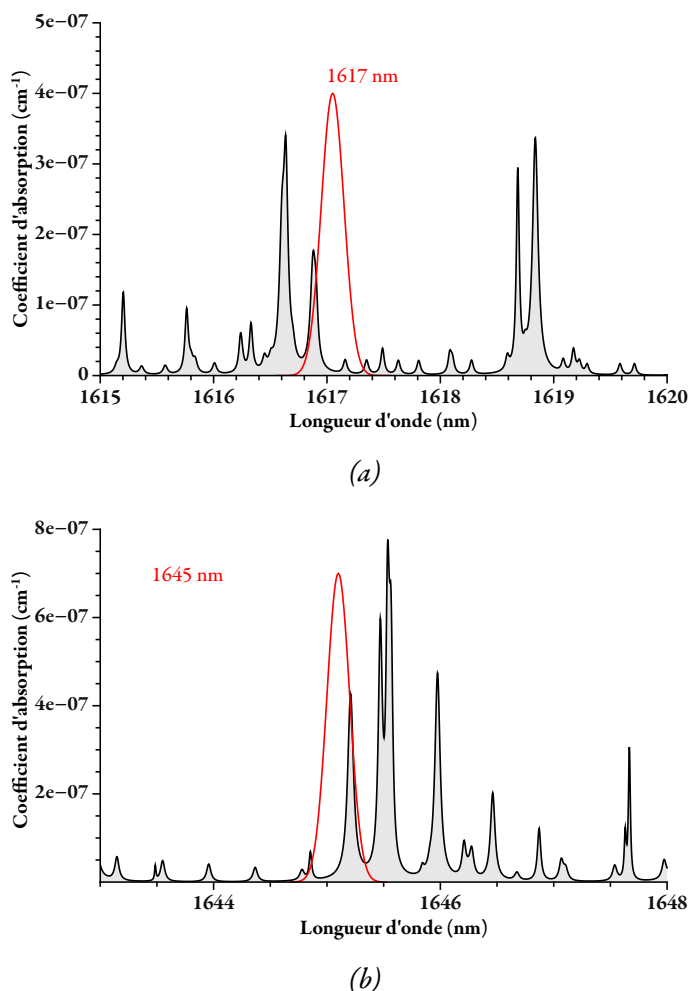


FIG. 1.13 : Coefficients d'absorption de l'atmosphère autour de 1617 nm et 1645 nm (en gris). Deux spectres gaussiens de largeur à mi-hauteur arbitraire de 0,3 nm et centrés sur les émissions de l'Er:YAG à 1,6 μ m sont représentés (en rouge).

La portée d'un télémètre dépend entre autre du diamètre de l'optique collectant le flux laser réfléchi par la surface visée. Plus ce diamètre est important, plus la portée augmente (ou plus l'énergie nécessaire en sortie d'émetteur diminue pour une portée équivalente). Pour une optique de collection avec un diamètre d'environ 65 mm, une portée de 10 km est atteinte avec des impulsions de 500 μ J à 1617 nm après accumulation d'environ 1000 mesures. Cette énergie reste compatible avec le seuil de dommage fixé à 1 J/cm² (cf. 1.1) tant que le diamètre du faisceau en sorti est supérieur à 8 mm. Pour obtenir une portée similaire dans les mêmes conditions

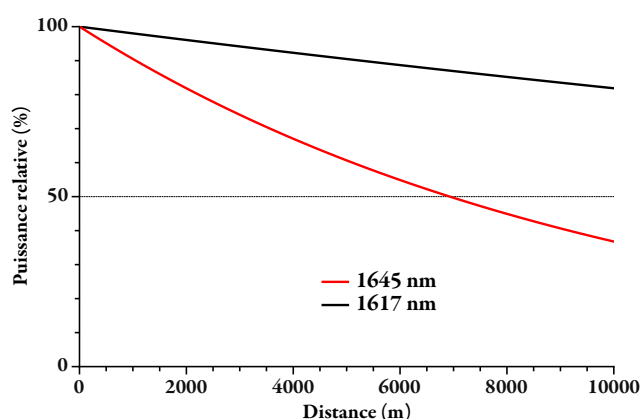


FIG. 1.14 : Intensité relative d'un faisceau laser à 1617 nm et 1645 nm se propageant dans l'atmosphère.

avec un faisceau à 1645 nm, il faudrait que l'énergie des impulsions soit d'environ 5 mJ.

Pour obtenir un rafraîchissement de la mesure de 1 Hz en accumulant 1000 mesures pour augmenter le rapport signal/bruit, il faut une cadence de répétition aux alentours de 1 kHz. La limite imposée par la sécurité oculaire concerne l'énergie, et non la puissance moyenne de l'émetteur. Ainsi, une augmentation de la cadence de répétition est possible et bénéfique pour le rapport signal/bruit.

Le facteur de qualité du faisceau laser M^2 (cf. annexe *Facteur de qualité d'un faisceau laser*) doit être inférieur à 5 pour assurer une visée précise et une collection photométrique optimale après une propagation du faisceau sur 10 km aller-retour.

1.5.2.2 Type de pompage

Le pompage par diode laser est une solution plus abordable, robuste et miniaturisable que le pompage par laser à fibre qui nécessite un étage optique supplémentaire. De plus, les progrès technologiques de ces dernières années autour des diodes adaptées pour le pompage optique de cristaux dopés erbium ont permis la naissance de diodes de pompe fibrées toujours plus brillantes, permettant d'obtenir des efficacités optiques-optiques intéressantes.

Pour un pompage par diode laser, deux longueurs d'onde sont possibles : 1532 nm ou 1470 nm, correspondant aux pics d'absorption de l'Er:YAG (fig. 1.5). Dans le cas où il est possible de contrôler la température de la diode de pompe, une source laser Er:YAG pompée à 1532 nm donnera de meilleurs résultats, dans la mesure où le pic d'absorption du cristal est plus important à cette longueur d'onde qu'à 1470 nm.

Cependant, ce contrôle n'est pas toujours possible (comme dans le cadre du projet Minitélia) puisque faisant appel à des éléments forts consommateurs en énergie électrique (plaques Peltier, pompe à eau, etc.). Dans ce cas, les fluctuations thermiques de la diode laser ont pour conséquence le décalage de la longueur d'onde émise, pouvant faire chuter les performances de la cavité. Dans ce cas, il devient intéressant de pomper le cristal à 1470 nm puisque la sec-

tion efficace d'absorption de l'Er:YAG y est plus large, environ 15 nm contre 2 nm à 1532 nm (fig. 1.5).

Les diodes à 1470 nm ou à 1532 nm à base d'InP présentent un décalage spectral avec la température de 0,7 nm/K. On peut alors espérer de bonnes performances sur un intervalle de température de 21° C en pompant à 1470 nm, au lieu de 3° C à 1532 nm. Puisque le projet Minitélia ne prévoit pas de contrôler la température de la diode, et requiert un fonctionnement sur un large intervalle de température entre -40 °C et +60 °C, la longueur d'onde de la pompe du prototype a été choisie à 1470 nm.

Pour une consommation électrique totale maximale de 50 W, et étant donnés des rendements de ces diodes laser autour de 25%, la puissance optique de pompe est limitée à 15 W.

1.5.2.3 Type de déclenchement

BIEN qu'il existe des modulateurs acousto-optiques (AOM) et électro-optiques (EOM) relativement compacts et refroidis passivement, ils restent toujours accompagnés d'un bloc d'alimentation électrique lourd et encombrant (fig. 1.15). De plus, l'ajout d'un modulateur représente une source de consommation électrique supplémentaire. Le déclenchement passif de la cavité est donc nécessaire (cf. annexe *Déclenchements actif et passif*).



FIG. 1.15 : (a) Modulateur acousto-optique pour déclenchement actif proposé commercialement par AA Opto-Electronic (encombrement proche d'un cube de 3 cm de côté). (b) Pilote du modulateur et son alimentation électrique (600 g, environs 12x14x2,5 cm³)

1.5.2.4 Durée des impulsions

LA mesure de distances s'effectue par la mesure du temps de vol de l'impulsion entre l'émetteur et la cible visée. Cette mesure du temps de vol est d'autant plus précise que l'impulsion est courte. En effet, il est difficile de localiser la position temporelle d'une impulsion d'une durée de 1 µs à la nanoseconde près. Pour mesurer des distances avec une précision de 1 mètre, il faut pouvoir situer temporellement l'impulsion à 3 ns près. Ceci est possible qu'à partir du moment où la durée de l'impulsion est d'au plus 10 ns.

Malheureusement, générer des impulsions d'une durée d'au plus 10 ns peut se révéler compliqué. La plupart des résultats publiés présentent des impulsions de plusieurs dizaines de nanosecondes. En effet, dans le cas de l'Er:YAG, des cristaux longs ($\sim 3-5$ cm) et peu dopés (0,25% ou 0,5%) sont généralement utilisés afin d'atténuer les effets de l'upconversion et de l'émission stimulée à la longueur d'onde de pompe. La longueur des cavités ainsi conçue est incompatible avec la génération d'impulsion courte. La durée d'impulsion la plus courte pour une cavité pompée par diode laser est de 27 ns [Martial2011].

Trois techniques permettent de réduire la durée des impulsions générées : diminuer la longueur de la cavité, augmenter le gain du cristal, et augmenter les pertes de la cavité. Dans la mesure où la puissance de pompe est limitée, les deux derniers points seront difficiles à mettre en œuvre.

1.5.2.5 Géométrie du milieu à gain

La gestion thermique du milieu à gain des lasers solides est indispensable pour maintenir leur efficacité et leur puissance moyenne accessible en sortie. L'échauffement thermique ont plusieurs conséquences notables :

- Un décalage spectral et une diminution des différentes sections efficaces de l'ion [Eichhorn2008]. Une absorption de pompe plus faible ou une section efficace d'émission laser qui diminue ont un impact direct sur l'efficacité du laser.
- L'apparition d'une lentille thermique (issue d'un gradient d'indice lié à un champ non uniforme de la température) non maîtrisée, qui peut changer les paramètres du faisceau dans la cavité si sa focale devient suffisamment courte.
- Une dilatation du cristal entraînant des forces et des contraintes mécaniques sur sa monture, sources de l'apparition d'une biréfringence dans le cristal. Un échauffement important peut même conduire à la rupture du cristal.

Pour optimiser la gestion thermique, il faut augmenter la surface d'échange thermique et se rapprocher de la source de chaleur. Géométriquement, cela revient à réduire une ou plusieurs dimensions du cristal ; du cristal massif, les recherches autour des lasers solides se sont tournées vers les disques minces⁵ et les plaques⁶.

Cependant, les niveaux de pompe prévus par le projet Minitélia restent modestes face aux puissances de pompe pour lesquelles les architectures sus-citées sont prévues. Il n'est donc pas envisageable de les utiliser, dans la mesure où leur réalisation est compliquée et encombrante.

Il existe une géométrie de milieu à gain qui permet la conception de cavités simples et adaptées pour des puissances moyennes entre le watt et quelques dizaines de watts : la fibre cristalline (fig. 1.16). Cette géométrie présentent de nombreux avantages :

⁵Thin-disk en anglais

⁶Slab en anglais

- Contrairement aux disques minces et aux plaques où l'extraction thermique s'opère sur une ou deux faces respectivement, la dissipation thermique dans une fibre cristalline est réalisée sur toute la surface du cylindre. De plus, étant donné le diamètre de la fibre cristalline (≤ 1 mm), la surface de contact est très proche de la source de chaleur. L'extraction thermique est alors optimale.
- Les faisceaux de pompe sont très divergents lorsqu'ils proviennent d'une diode laser. Ils sont guidés par réflexions totales internes dans le cristal, ce qui augmente le recouvrement spatial entre le faisceau de pompe et le signal laser par rapport aux cristaux massifs. Des simulations [Martial2011] et des mesures directes [Délén2013] ont montré que ces réflexions totales mènent un confinement au centre du cristal (cf. 2.2.4).
- L'amplification d'un signal laser peut dégrader son profil spatial, notamment lorsque celui-ci est guidé dans le cristal [TerGabrielyan2012, Zhu2008]. Comme la propagation du signal dans une fibre cristalline se réalise sans réflexion totale interne, le profil spatial du faisceau n'est pas altéré.

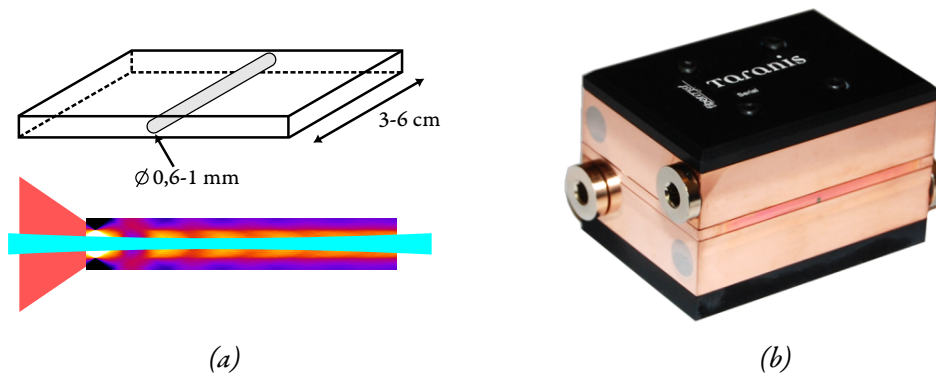


FIG. 1.16 : (a) Schéma de principe de la fibre cristalline. Le faisceau de pompe (rouge) est guidé par réflexions totales internes, le faisceau signal (bleu) se propage librement dans le cristal. (b) Fibre cristalline incorporée dans une plaque de cuivre refroidie par deux boîtes à eau. Produit commercialisé par Fibercryst sous le nom Taranis.

Le confinement du faisceau de pompe dans la fibre cristalline se traduit par l'augmentation du gain dans le cristal ; un gain plus élevé permet d'obtenir un front de montée de l'impulsion plus raide (et donc des impulsions potentiellement plus courtes) et favorise une émission à 1617 nm. En effet, cette longueur d'onde nécessite une inversion de population plus importante qu'à 1645 nm pour pouvoir être amplifiée dans la cavité (fig. 2.3).

Ces effets de confinement sont d'autant plus importants que le diamètre de la fibre cristalline est petit. Ainsi, on s'attend à obtenir des impulsions plus courtes (et potentiellement plus énergétiques du fait du recouvrement spatial accru) à 1617 nm avec une fibre cristalline de diamètre réduit.

De plus, cette géométrie permet la conception de cavités simples, répondant aux exigences de performances, tout en assurant une excellente gestion thermique du cristal permettant un fonctionnement sur une large gamme de température. C'est donc cette géométrie qui est retenue pour le projet Minitélia.

1.5.3 Architecture générale issue du cahier des charges

L'ARCHITECTURE générale de la cavité prévoit l'utilisation d'une fibre cristalline Er:YAG de $400\text{ }\mu\text{m}$ de diamètre, pompée autour de 1470 nm pour une émission à 1617 nm (fig. 1.17). Le déclenchement passif de la cavité est assuré par un absorbant saturable.

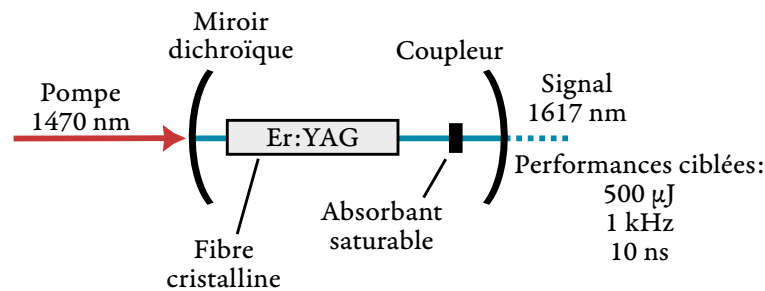


FIG. 1.17 : Architecture générale de la cavité pour le projet Minitélia.

Pour simplifier l'étude, le faisceau de pompe est issu d'une diode laser couplée dans une fibre optique. De plus, le contrôle en température du cristal Er:YAG et de la diode de pompe est effectué grâce à un circuit d'eau. celui-ci permettra l'étude de la dépendance du système laser avec la température entre $+10^{\circ}\text{C}$ et $+60^{\circ}\text{C}$.

Enfin, et dans la mesure où aucun effet laser issu de fibre cristalline de diamètre aussi petit que $400\text{ }\mu\text{m}$ n'a encore été démontré, des cristaux de $800\text{ }\mu\text{m}$ de diamètre seront également étudiés.

1.5.4 Le défi Minitélia

Le tableau 1.2 résume les objectifs du projet et les compare avec l'état de l'art des sources laser à base de cristaux dopés erbium, déclenchées passivement, et dont la puissance de pompe est inférieure à 16 W . On voit qu'il n'existe pas, en dehors de nos travaux, de telles sources utilisant une diode laser comme source de pompe dont l'énergie par impulsion est supérieure à $29\text{ }\mu\text{J}$.

Référence	[Stultz2005]	[Terekhov2014]	[Moskalev2008]	[Chen2012]	Minitélia
Cristal	Er:YAG			Er:Yb:LuAB	Er:YAG
Type de pompe	Laser à fibre			Diode laser	
Puissance de pompe	16 W	16 W	15 W	~ 20 W	10 W
Déclenchement	Cr:ZnSe			Co:MALO	Passif
Longueur d'onde	1617 nm	1617 nm	1645 nm	1540 nm	1617 nm
Énergie	235 μ J	350 μ J	270 μ J	29 μ J	500 μJ
Cadence	3,8 kHz	5,2 kHz	7,14 kHz	22 kHz	1 kHz
Puissance moyenne	0,9 W	1,8 W	1,9 W	0,64 W	0,5 W
Durée	6,8 ns	96 ns	65 ns	40 ns	10 ns
M ²					< 5

TAB. 1.2 : État de l'art des sources déclenchées passivement à faible puissance de pompe (<20 W), comparées avec les objectifs du projet Minitélia

Les défis proposés par le projet Minitélia sont nombreux :

- La puissance de pompe doit se situer autour de 15 W, alors que les seuils laser généralement observés pour les cavités solides dopés erbium et pompées par diode laser sont autour de 20 W.
- Les durées mesurées sont fréquemment de plusieurs dizaines de nanosecondes, y compris dans le cas d'un pompage par laser à fibre. Les impulsions les plus courtes mesurées pour un pompage par diode laser est de 27 ns, ce qui est bien supérieur à la durée de 10 ns visée pour le projet.
- De plus, ces records de performances doivent être obtenus avec un absorbant saturable, alors que le déclenchement passif n'a jamais été démontré pour l'Er:YAG dans le cas d'un pompage par diode laser avant nos travaux.
- Enfin, il faut assurer ces performances pour une large gamme de température : de -40° C jusqu'à +60° C.

Ces performances sont donc ambitieuses. Il est alors préférable d'étudier à priori la possibilité d'obtenir ces caractéristiques en sortie grâce à l'usage d'une simulation numérique.

1.6 Conclusion

LES avantages d'une émission laser dans un intervalle de longueurs d'onde entre 1,5 μ m et 1,8 μ m ont été présentés. D'une part l'émission à sécurité oculaire permet la montée en

énergie des impulsions pour augmenter la portée du système de mesure sans pour autant représenter un risque de lésion oculaire pour un observateur direct. D'autre part, l'absorption de l'atmosphère présente un minimum local dans cet intervalle.

Un des choix techniques possibles pour une émission à sécurité oculaire est l'utilisation d'un cristal dopé à l'ion erbium. De nombreuses sources laser solides utilisant de tels cristaux ont été étudiées et publiées. Un état de l'art de ces sources, pompées par laser à fibre erbium ou directement par diode laser, et déclenchée activement ou passivement, a été dressé.

Cet état de l'art montre qu'un type de source laser reste relativement peu étudié : le pompage direct par diode laser d'un cristal dopé à l'erbium à l'intérieur d'une cavité déclenchée passivement. Le projet Minitélia vise à proposer un prototype fonctionnel d'une telle source laser dans l'idée de remplacer les émetteurs des télémètres actuels. Ce projet, financé par la Direction Générale de l'Armement, fait intervenir plusieurs acteurs : les sociétés Cilas et Fibercryst, et le Laboratoire Charles Fabry.

Le cahier des charges imposé par le projet a été présenté, puis traduit vers une spécification technique. Celle-ci représente une véritable nouveauté et une ambition forte en comparaison de l'état de l'art en début de thèse. Dans ce contexte, la simulation numérique est un outil d'étude indispensable pour guider les recherches expérimentales.