

UNIVERSITE KASDI MERBAH-OUARGLA
Faculté des Mathématiques et des Sciences de la Matière
Département de Physique

Année : 2018/2019



N° d'enregistrement :
/..... / / / /

THESE
Pour l'obtention du Diplôme de Doctorat
en Physique des Rayonnements, Spectroscopie et Matière

Sujet de la thèse :
**Contribution au développement et l'optimisation
d'un télémètre laser en milieu aquatique**

Présentée et soutenue publiquement

par :

M. ALMABOUADA Fatah

le 04/07/2019

Devant le jury composé de :

KHELFAOUI Fethi	Professeur	U.K.M. Ouargla	Président
AIADI Kamal Eddine	Professeur	U.K.M. Ouargla	Promoteur
REHOUMA Ferhat	Professeur	U. El Oued	Examineur
BOUKRAA AOmar	Professeur	U.K.M. Ouargla	Examineur
BENTOUILA Omar	Maître de Conférence (A)	U.K.M. Ouargla	Examineur

UNIVERSITE KASDI MERBAH-OUARGLA
Faculté des Mathématiques et des Sciences de la Matière
Département de Physique

Année : 2018/2019



N° d'enregistrement :

/..... / / / /

THESE

Pour l'obtention du Diplôme de Doctorat
en Physique des Rayonnements, Spectroscopie et Matière

Sujet de la thèse :

**Contribution au développement et l'optimisation
d'un télémètre laser en milieu aquatique**

Présentée et soutenue publiquement

par :

M. ALMABOUADA Fatah

le 04/07/2019

Devant le jury composé de :

KHELFAOUI Fethi	Professeur	U.K.M. Ouargla	Président
AIADI Kamal Eddine	Professeur	U.K.M. Ouargla	Promoteur
REHOUMA Ferhat	Professeur	U. El Oued	Examineur
BOUKRAA AOmar	Professeur	U.K.M. Ouargla	Examineur
BENTOUILA Omar	Maître de Conférence (A)	U.K.M. Ouargla	Examineur

REMERCIEMENTS

Je tiens d'abord à remercier de tout mon cœur mes parents qui m'ont encouragé à poursuivre mes études et qui m'ont toujours soutenu dans les bons et les mauvais moments. Je leur dédie ce travail.

Je tiens à remercier profondément, à travers cette page, toutes les personnes qui ont contribué à l'accomplissement de ce travail.

J'adresse mes remerciements à mon Directeur de Thèse, Professeur Aiadi Kamal Eddine, pour ses orientations et ses encouragements continus tout au long de mes travaux et aussi pour la confiance qu'il a eu en moi.

Mes vifs remerciements vont également à tous les membres du jury qui ont bien voulu donner de leur temps précieux pour lire et évaluer ce travail. Le président du jury le Professeur Khelfaoui Fethi et les examinateurs : Professeur Rahouma Ferhat, Professeur Boukraa Aomar et le Docteur Bentouila Omar.

Ce travail a été réalisé au laboratoire de l'équipe Technologie des Systèmes Laser de la division des Milieux Ionisés et Lasers du Centre de Développement des Technologies Avancées (CDTA). Un grand merci à mes collègues qui m'ont accordé une aide inestimable durant ma thèse, et en particulier Messieurs Messaoud Slimane et Boushaki Rachid. Je n'oublie pas notre ex-chef d'équipe M. Louhibi Djelloul (Maitre de recherche A) qui a été l'initiateur de ce sujet de recherche.

Je tiens à remercier M. Achouri Abderrahim pour sa disponibilité et sa précieuse aide durant mon inscription en thèse.

Je remercie mon épouse pour ses encouragements et son soutien.

Merci à mes frères et sœurs ainsi qu'à toute ma famille.

Un grand merci à mes amis et à tous ceux qui m'ont soutenu depuis le début de cette thèse.

À la douce mémoire de ma chère grand-mère et mon cher oncle.

Enfin, je remercie mon pays l'Algérie, qui à travers l'accès gratuit aux études, m'a permis d'arriver là aujourd'hui.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	i
TABLE DES MATIERES	ii
LISTE DES TABLEAUX	v
LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES ABREVIATIONS	viii
Introduction générale	10
Chapitre 1 : Etat de l'art de la télémétrie et de l'imagerie laser aquatiques	14
1.1 Introduction	14
1.2 Domaine d'application de la télémétrie laser	14
1.3 Principe de la télémétrie laser et techniques utilisées	14
1.3.1 Télémétrie laser par comparaison de phase.....	15
1.3.2 Télémétrie laser à modulation de fréquence FMCW	16
1.3.3 Télémétrie laser à temps de vol TOF	18
1.3.4 Comparaison des trois techniques de télémétrie	19
1.4 Principe de l'imagerie laser sous-marine	20
1.5 Propagation de la lumière laser dans l'eau	21
1.5.1 Lois de Beer-Lambert et portée.....	21
1.5.2 Coefficient d'atténuation et longueur d'onde de propagation dans l'eau	22
1.5.3 Vitesse de propagation de la lumière dans l'eau	26
1.6 Conclusion	26
Chapitre 2 : Présentation du télémètre laser à temps de vol proposé	28
2.1 Introduction	28
2.2 Choix de la source laser	28
2.2.1 Laser à diode	28
2.2.2 Micro laser	29
2.2.3 Laser à solide	30
2.3 Choix du système de détection et mesure du télémètre	31
2.3.1 Choix du photodétecteur	32
2.3.2 Choix de l'étage d'amplification.....	34
2.3.3 Choix de l'étage discriminateur	35
2.3.4 Choix des circuits de mesure d'intervalle de temps et portée	36

2.4 Réception en imagerie	37
2.5 Evaluation des performances du télémètre laser aquatique.....	38
2.5.1 Etude du rapport signal sur bruit du télémètre laser aquatique	38
2.5.2 Amélioration de la portée du télémètre	42
2.6 Conclusion	43
Chapitre 3 : Simulation et expérimentation	45
3.1 Introduction	45
3.2 Émetteur laser.....	45
3.2.1 Télescope d'émission	45
3.2.2 Source laser	46
3.3 Caractérisation de l'eau utilisée et dispositif expérimental	54
3.3.1 Détermination du coefficient d'atténuation de l'eau	54
3.3.2 Dispositif expérimental	57
3.4 Conception et simulation du télescope de réception.....	58
3.4.1 Présentation du logiciel de simulation d'optique ZEMAX	58
3.4.2 Conception du télescope de réception.....	59
3.4.3 Simulation du télescope de réception.....	60
3.5 Simulation et expérimentation du système de détection.....	62
3.6 Montage pour la visualisation des profils 2D et 3D du spot laser	63
3.7 Réalisation expérimental du télescope de réception.....	63
3.8 Reproduction des images d'objets immergés dans l'eau	64
3.9 Conclusion	66
Chapitre 4 : Résultats et discussion.....	68
4.1 Introduction	68
4.2 Résultats de la simulation avec le logiciel ZEMAX	68
4.2.1 Simulation de la réponse du télescope de réception.....	68
4.2.2 Simulation pour une portée de 20 mètres.....	70
4.2.3 Simulation avec une source laser ayant un diamètre de spot plus large.....	74
4.3 Résultats expérimentaux et comparaison avec la simulation	75
4.4 Résultats de la simulation et de l'expérimentation du circuit de détection.....	77
4.5 Résultats de la reproduction des images d'objets immergés dans l'eau	80
4.6 Comparaisons et discussions	84
4.7 Conclusion	86

Conclusion générale et perspectives	88
BIBLIOGRAPHIE	91

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 Performances des trois techniques de télémétrie dans l'atmosphère.....	20
Tableau 1.2 Propriétés optiques de différents types d'eau pour $\lambda = 530$ nm [39].....	23
Tableau 1.3 Coefficients d'atténuation de différentes eaux pour plusieurs longueurs d'ondes [33].	24
Tableau 2. 1 Caractéristiques optoélectroniques des photodiodes à avalanche.	33
Tableau 2. 2 Valeurs numériques des différents paramètres et constantes pour le calcul du SNR.....	41
Tableau 2. 3 Amélioration de la portée par augmentation de la puissance du laser.....	42
Tableau 3. 1 Coefficients d'atténuation des trois types d'eau mesurés à $\lambda=532$ nm.....	56
Tableau 3. 2 Type de diffusion selon la longueur d'onde et la tailles des particules.	57
Tableau 3. 3 Valeurs numériques des paramètres introduits dans la simulation.....	61

LISTE DES FIGURES

Figure 1. 1 : Principe de la télémétrie laser.....	15
Figure 1. 2 : Schéma bloc du principe de la télémétrie par comparaison de phase (phase-shift).....	16
Figure 1. 3 : Signaux émis et rétrodiffusé de la télémétrie par comparaison de phase (phase-shift).....	16
Figure 1. 4 : Schéma bloc du principe de la télémétrie FMCW.....	17
Figure 1. 5 : Signaux de la télémétrie FMCW.....	17
Figure 1. 6 : Principe de la télémétrie laser temps de vol (TOF).....	18
Figure 1. 7 : Impulsions laser émise (Ch 2 : 200 mV/div) et rétrodiffusée (Ch 4 : 10 mV/div).....	19
Figure 1. 8 : Principe de l'imagerie laser sous-marine.....	21
Figure 1. 9 : Coefficients d'absorption a (m^{-1}) et de diffusion b (m^{-1}) en fonction de la longueur d'onde d'une eau de mer pure.....	23
Figure 1. 10 : Coefficient d'absorption de l'eau en fonction de la longueur d'onde.....	24
Figure 1. 11 : Evolution du coefficient d'atténuation en fonction de la longueur d'onde pour une eau claire et une eau trouble.....	25
Figure 1. 12 : Evolution de la lumière naturelle dans l'atmosphère et dans une eau claire.....	25
Figure 2. 1 : Micro-laser Nd :YVO ₄ + KTP.....	29
Figure 2. 2 : Impulsions laser (Ch 2) générées par le micro-laser Nd :YVO ₄	30
Figure 2. 3 : Laser à solide Nd :YAG + KTP + cellule de Pockels.....	30
Figure 2. 4 : Impulsion laser Q-switch à la longueur d'onde 532 nm.....	30
Figure 2. 5 : Laser à solide Nd :YAG + KTP + Cr :YAG.....	31
Figure 2. 6 : Schéma synoptique du système de détection d'un télémètre laser TOF.....	32
Figure 2. 7 : Circuit d'alimentation de la photodiode à avalanche.....	34
Figure 2. 8 : Trois topologies de l'étage amplificateur.....	35
Figure 2. 9 : Points de mesure de l'intervalle de temps Δt	36
Figure 2. 10 : Forme de l'impulsion obtenue à la sortie du circuit d'intervalle de temps Δt	37
Figure 2. 11 : Circuit de mesure de la portée.....	37
Figure 2. 12 : Principe de fonctionnement d'une caméra CCD d'un système d'imagerie laser.....	38
Figure 2. 13 : Photodiode à avalanche associée à l'amplificateur TIA.....	39
Figure 2. 14 : Evaluation du rapport SNR en fonction de la portée R pour $c = 0,151 ; 0,398 ; 2,190$ m^{-1} , $\rho = 0,1$ (trait continu) – $0,9$ (trait hachuré) et $P_{out} = 0,215$ MW.....	42
Figure 3. 1 : Emetteur laser constitué du télescope d'émission (1) et de la source laser (2).....	45
Figure 3. 2 : Télescope d'émission de type galiléen.....	46
Figure 3. 3 : Source laser Nd :YAG/Cr :YAG.....	47
Figure 3. 4 : Circuit électronique de la lampe flash.....	47
Figure 3. 5 : Forme du courant flash (Ch 2 : 2 V/div.) et de l'impulsion laser en mode relaxé (Ch 1 : 1 V/div.), (axe X : base de temps 20 μs /div.).....	48
Figure 3. 6 : Dispositif expérimental pour la mesure de l'énergie laser.....	49
Figure 3. 7 : Energie laser, en mode relaxé et Q-switch, fonction de l'énergie de pompage pour une longueur de cavité $L = 18,5$ cm avec $R = 50$ % et $R_c = 3$ m.....	49
Figure 3. 8 : Energie laser en fonction de la réflectivité du miroir de sortie (M2) et différents rayons de courbure (R_c) du miroir de fond (M1) pour la cavité de 18,5 cm de long.....	49
Figure 3. 9 : Energie laser en fonction de la réflectivité du miroir de sortie (M2) et différents rayons de courbure (R_c) du miroir de fond (M1) pour la cavité de 24 cm de long.....	50
Figure 3. 10 : Energie laser en fonction de la réflectivité du miroir de sortie (M2) et différents rayons de courbure (R_c) du miroir de fond (M1) pour la cavité de 39,5 cm de long.....	50
Figure 3. 11 : Profils temporels des impulsions laser Q-switch de durées de 38 ns (a) et 22,8 ns (b).....	51
Figure 3. 12 : Profils 2D (a) et 3D (b) du faisceau laser de la source Nd:YAG Q-switch.....	51
Figure 3. 13 : Association de la source laser et du télescope d'émission.....	52
Figure 3. 14 : Elargissement du faisceau laser en fonction de la longueur de propagation.....	53
Figure 3. 15 : Photographie de la cavité laser.....	53
Figure 3. 16 : Dispositif expérimental pour la détermination du coefficient d'atténuation de l'eau.....	54
Figure 3. 17 : Vue élargie du télescope de réception et les différentes réflexions de ses optiques.....	55

Figure 3. 18 : Photos des grains de sable sous microscope à balayage électronique.	56
Figure 3. 19 : Dispositif expérimental : (1) laser Nd:YAG/Cr:YAG, (2) télescope, (3) tube d'eau, (4) oscilloscope, (5) photodiode PIN, (6) lame, (7) trou.	57
Figure 3. 20 : Photo du dispositif expérimental (a) et du tube d'eau utilisé (b).	58
Figure 3. 21 : Télescope (a) conçu sous ZEMAX et la fenêtre du photodétecteur (b).	59
Figure 3. 22 : Profil 3D du télescope de réception.	60
Figure 3. 23 : Fenêtre de simulation représentant la disposition du télescope (à droite) et le réservoir à eau (à gauche).	61
Figure 3. 24 : Fenêtre de ZEMAX pour l'introduction des différents éléments de la simulation.	61
Figure 3. 25 : Schéma détaillé du circuit de détection de l'impulsion laser émise et rétrodiffusée.	62
Figure 3. 26 : Dispositif expérimental pour la visualisation des profils 2D et 3D des impulsions laser émise et rétrodiffusée.	63
Figure 3. 27 : Photos du télescope de réception réalisé.	64
Figure 3. 28 : Dispositif expérimental pour la prise d'image des objets immergés dans l'eau.	65
Figure 3. 29 : Diagramme synoptique de l'algorithme de traitement de la séquence vidéo.	65
Figure 3. 30 : Enregistrement de 25 images par seconde de la caméra CCD.	66
Figure 3. 31 : Images sélectionnées de la séquence vidéo enregistrée avec la caméra CCD.	66
Figure 4. 1 : Profils 2D (a) et 3D (b) du spot de la source laser utilisée en simulation.	68
Figure 4. 2 : Profils 2D (a) et 3D (b) du spot laser réfléchi pour une eau W1.	69
Figure 4. 3 : Profils 2D (a) et 3D (b) du spot laser réfléchi pour une eau W2.	69
Figure 4. 4 : Profils 2D (a) et 3D (b) du spot laser réfléchi pour une eau W3.	70
Figure 4. 5 : Profils 2D des spots laser obtenus pour les diffusions de Rayleigh (a) et de Mie (b) avec des tailles de particules de 100 μm et $b = 0,219 \text{ m}^{-1}$	71
Figure 4. 6 : Profils 3D des spots laser obtenus pour les diffusions de Rayleigh (a) et de Mie (b) avec des tailles de particules de 100 μm et $b = 0,219 \text{ m}^{-1}$	71
Figure 4. 7 : Profils 2D des spots laser obtenus pour les diffusions de Rayleigh (a) et de Mie (b) avec des tailles de particules de 100 μm et $b = 0,33 \text{ m}^{-1}$	72
Figure 4. 8 : Profils 3D des spots laser obtenus pour les diffusions de Rayleigh (a) et de Mie (b) avec des tailles de particules de 100 μm et $b = 0,33 \text{ m}^{-1}$	72
Figure 4. 9 : Fenêtre de simulation qui montrent le sens de propagation des rayonnements laser (a) et le télescope (b) pour une diffusion de Mie avec des particules de 20 μm de diamètre et $b = 0,05 \text{ m}^{-1}$	73
Figure 4. 10 : Fenêtres de simulation qui montrent le sens des rayonnements laser (a) et le télescope (b) pour une diffusion de Rayleigh avec un coefficient de diffusion $b = 0,05 \text{ m}^{-1}$	73
Figure 4. 11 : Profils 2D collectés sur la surface du détecteur pour les diffusions de Rayleigh (a) et de Mie (b) avec des particules de 4 μm de diamètre et un coefficient de diffusion $b = 0,05 \text{ m}^{-1}$	74
Figure 4. 12 : Profils 2D (a) et 3D (b) de la source laser.	75
Figure 4. 13 : Profils expérimentaux 2D (a) et 3D (b) du spot laser réfléchi pour une eau W1.	76
Figure 4. 14 : Profils expérimentaux 2D (a) et 3D (b) du spot laser réfléchi pour une eau W2.	76
Figure 4. 15 : Profils expérimentaux 2D (a) et 3D (b) du spot laser réfléchi pour une eau W3.	77
Figure 4. 16 : Circuit de détection simulé avec le logiciel de simulation électronique PSpice.	78
Figure 4. 17 : Les différents signaux obtenus à travers le circuit de détection.	78
Figure 4. 18 : Vue élargie des signaux obtenus à chaque étage du circuit de détection.	79
Figure 4. 19 : Impulsion laser émise (Ch1) and rétrodiffusée (Ch2).	79
Figure 4. 20 : Résultats expérimental (a) et de simulation (b) des sorties du post-amplificateur (Ch1) et de l'étage dérivateur (Ch2).	80
Figure 4. 21 : Réponse du circuit de détection à une impulsion laser avec deux pics.	80
Figure 4. 22 : Objets utilisés dans l'expérimentation : (a) cube, (b) cube plus petit, (c) cylindre, (d) image gravée.	81
Figure 4. 23 : Photo d'un éléphant gravée sur une plaque (a), son image couleur (b), son image en noir et blanc (c) et son profil 2D (d)	81
Figure 4. 24 : Objet de forme cylindrique (a), son image (b) et son profil 2D (c) sous l'eau.	82
Figure 4. 25 : Le premier cube (a), son image (b) et son profil 2D (c) dans une eau claire.	82
Figure 4. 26 : Image (a) et profil 2D (b) du cube de la Figure 4.25 dans une eau turbide.	83
Figure 4. 27 : Cube de forme plus grande (a), son image (b) et son profil 2D (c).	83

LISTE DES ABREVIATIONS

TOF	Time-of-flight
2D	Two dimensional
3D	Three dimensional
CCD	Charge Coupled Camera
ICCD	Intensified Charge Coupled Camera
EMCCD	Electron Multiplying CCD Camera
SNR	Signal to Noise Ratio
FMCW	Frequency Modulated Continuous Wave
TIA	Trans-Impedance Amplifier
APD	Avalanche PhotoDiode
PMT	PhotoMultiplier Tube
$c(\lambda)$	Coefficient attenuation de l'eau
$a(\lambda)$	Coefficient d'absorption de l'eau
$b(\lambda)$	Coefficient de diffusion de l'eau
DL	Diode laser
LIDAR	Light Detection and Ranging
LADAR	Laser Radar
c'	Vitesse de la lumière dans l'eau
n_a	Indice de réfraction de l'air
n_e	Indice de réfraction de l'eau
n_v	Indice de réfraction du verre

Introduction générale

Introduction générale

Généralement les dispositifs à ondes acoustiques, plus connus sous l'appellation de SONAR (SOund NAvigation and Ranging) sont utilisés dans les milieux marins pour la détection de présence d'objets étrangers, la détermination de leur portée et le relevé des fonds marins [1]. Sous certaines conditions, ces systèmes peuvent être limités en précision et en résolution du fait qu'ils sont sujets à la température et à la pression de l'eau [1, 2]. De nos jours, vu les propriétés particulières de la lumière laser telles que la directivité, la mono-chromaticité, la précision de mesure et la résolution par rapport au SONAR, les systèmes laser plus connus sous l'acronyme de LIDAR (Light Detection and Ranging) ou LADAR (Laser Radar) [3-5] commencent à avoir des applications similaires à celles des ondes acoustiques en matière de télémétrie et d'imagerie sous-marines [6, 7]. Néanmoins, les ondes sonores se propagent beaucoup mieux sur de longues distances contrairement à la lumière laser [1], malgré que la vitesse de propagation de la lumière dans l'eau ($2,25 \times 10^8$ m/s) est plus élevée que celle des ondes sonores (1490 m/s). Cette limitation, de la distance de propagation, est due à la forte atténuation de la lumière dans l'eau par rapport aux ondes sonores. Pour cette raison, actuellement, le laser équipe les robots marins pour déterminer leur portée par rapport aux obstacles et fournir des images en temps réel avec des profils 2D et 3D des objets [8]. Le laser est aussi utilisé dans des fermes d'élevage de poissons en pleine mer tel que le thon afin de déterminer leur taux de croissance [8, 9].

Il existe différents domaines d'application de la lumière laser dans les milieux aquatiques tels que : mer, océan, rivière et lac. Il est alors indispensable de définir certains paramètres et de maîtriser tous les éléments qui constituent un système de télémétrie ou d'imagerie laser afin de réussir l'application visée.

Généralement un télémètre ou un système d'imagerie laser est équipé d'un émetteur laser constitué d'une source laser et d'une optique d'émission [10]. La télémétrie est basée sur l'émission d'une ou plusieurs impulsions laser vers un objet, dont on veut déterminer la portée, et la récolte du signal rétrodiffusé. Tout dépend de la technique de télémétrie utilisée telle que la technique temps de vol (TOF : Time-Of-Flight), la technique de comparaison de phase ou la technique FMCW (Frequency Modulation Continuous Wave) [11, 12]. En imagerie, c'est la même source laser pulsée qui est utilisée [6, 13]. La deuxième partie d'un télémètre laser est son récepteur. Ce récepteur est constitué d'un télescope de réception, d'un photodétecteur et d'une électronique de décision afin d'afficher la portée de l'objet. Par contre le récepteur d'un système d'imagerie laser est constitué d'un télescope et d'une caméra CCD

[14]. Cela permet de reproduire les images de n'importe quel objet immergé dans l'eau afin d'être identifié.

Dans cette thèse, nous allons présenter les résultats obtenus dans la conception des systèmes de télémétrie et d'imagerie sous-marine proposés parmi les techniques existantes. Un télescope de réception pour la télémétrie a été proposé, simulé et réalisé. En plus de la télémétrie, ce télescope a servi pour visualiser les profils 2D et 3D de l'impulsion laser. Cela a été possible par l'utilisation d'un algorithme de traitement d'images développé pour cette application. Les obstacles et problèmes, que nous avons rencontrés dans la reproduction d'images dans l'eau ont été résolus par l'utilisation d'une caméra CCD ordinaire, du fait de la non-disponibilité d'une caméra pouvant être synchronisée avec les tirs laser, et l'algorithme de traitement d'images développé.

Cette thèse est organisée comme suit :

Le premier chapitre donne des notions de base sur les différentes techniques utilisées en télémétrie et le principe de l'imagerie laser en milieu aquatique. De plus, sont données les conditions de propagation d'un faisceau laser dans l'eau et les différents types d'eau pouvant exister dans la nature. Dans le second chapitre, nous présentons avec plus de détails le type de télémètre et de système d'imagerie laser proposés en milieux aquatiques. Chaque élément, qui constitue le système, est présenté avec détail afin de faire un choix judicieux sur les composants qui peuvent le constituer.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation du dispositif expérimental, à l'évaluation expérimentale de l'eau utilisée dans les expériences et au logiciel de simulation d'optique ZEMAX. Ce logiciel a permis de faire le design du télescope de réception et l'observation de sa réponse en milieu aquatique tout en reproduisant les conditions réelles de propagation. Plus de détails sont présentés concernant la source laser à Nd:YAG/Cr:YAG optimisée pour des applications de télémétrie et d'imagerie. Le quatrième chapitre est dédié aux différents résultats de simulations et d'expérimentations obtenus en télémétrie et en imagerie laser. Une attention particulière a été faite sur la propagation de la lumière laser dans l'eau et l'effet du coefficient d'atténuation de plusieurs types d'eau. Ces coefficients ont été déterminés de manière expérimentale afin de les introduire dans la simulation et par la suite pouvoir comparer les résultats de la simulation avec ceux de l'expérimental. De plus, une simulation du circuit électronique de détection a été faite en utilisant le logiciel de simulation PSpice et les différents signaux ont été comparés avec ceux obtenus expérimentalement. Pour ce qui est

de l'imagerie dans l'eau, l'utilisation de la caméra CCD ordinaire et l'algorithme de traitement d'images, qui lui a été développé avec MATLAB, ont permis de reproduire les images et profils de différentes formes d'objets immergés dans l'eau.

Enfin, nous présentons dans la conclusion générale une synthèse des résultats obtenus et les éventuelles perspectives de ce travail.

Chapitre 1 :

*Etat de l'art de la télémétrie
et de l'imagerie laser
aquatiques*

Chapitre 1 : Etat de l'art de la télémétrie et de l'imagerie laser aquatiques

1.1 Introduction

Dans ce chapitre sont présentés les notions de base et les domaines d'application d'une source laser en milieu aquatique. Plus particulièrement, ces domaines d'application sont la télémétrie et l'imagerie laser. Différentes techniques de télémétrie existent et chacune d'elles présente des avantages et des inconvénients. Afin de faire un choix sur la technique de télémétrie à adopter, trois techniques sont présentées avec une étude comparative. Le principe de l'imagerie laser dans un environnement aquatique est aussi décrit. De plus, les conditions de propagation d'un faisceau laser dans l'eau sont présentées. Une attention particulière est portée aux coefficients d'atténuation des types d'eau rencontrés dans la nature.

1.2 Domaine d'application de la télémétrie laser

La télémétrie laser est une technique de mesure de distance entre deux points [15]. Cette technique se retrouve dans beaucoup de domaines d'application tels que : le guidage des robots pour éviter les obstacles, l'équipement des satellites afin d'éviter les comètes, la mesure de distance terre-satellite ou satellite-lune [16], et dans le positionnement des grands navires dans les ports [17]. De nos jours, la télémétrie laser commence à être utilisée dans les milieux aquatiques [6, 18, 19], ce qui a fait d'elle un concurrent du sonar. Contrairement au sonar, le faisceau laser est caractérisé par sa directivité. Une propagation dans un seul sens permet de mesurer la distance sous l'eau entre deux points. Cette caractéristique a fait de la télémétrie laser un outil important pour la détection d'obstacles sous l'eau comme c'est le cas des robots sous-marins, la mesure des distances, l'imagerie sous-marine et le relevé topographique des fonds [20-23]. Un télémètre ou un système d'imagerie laser peut être positionné à la surface de l'eau et orienté vers le fond ou peut être immergé directement dans l'eau. Dans cette dernière configuration, le système est embarqué à l'intérieur d'un robot sous-marin et donc ne nécessite pas une enveloppe étanche. Dans certains systèmes, le dispositif de télémétrie ou d'imagerie est enfermé dans une enveloppe étanche qui résiste à l'eau et à la pression. Dans une telle configuration, l'utilisateur commande le dispositif à travers un câble étanche relié à la surface de l'eau [24].

1.3 Principe de la télémétrie laser et techniques utilisées

Le principe de la télémétrie laser est basé sur l'émission d'une ou plusieurs impulsions laser, d'une durée de quelques nanosecondes, vers un objet dont on veut déterminer la portée, et la

récolte du signal rétrodiffusé [10]. Comme donné sur la Figure 1.1, un télémètre laser est composé d'un émetteur et d'un récepteur. L'émetteur est constitué d'une source laser et d'un télescope d'émission. Le récepteur est constitué d'un télescope de réception, d'un détecteur et d'un étage électronique. Une attention particulière doit être faite au télescope de réception afin de bien focaliser les rayonnements laser rétrodiffusés par l'objet sur la surface active du photodétecteur. Ce dernier est connecté à l'étage électronique de mesure afin de déterminer l'intervalle de temps mis par l'impulsion laser pour atteindre l'objet et revenir. La portée est affichée par rapport à cet intervalle de temps. Les techniques de télémétrie laser les plus utilisées sont : comparaison de phase (Phase-Shift), modulation de fréquence (FMCW) et temps de vol (TOF) [11, 12]. Le principe de chaque technique est donné dans ce qui suit.

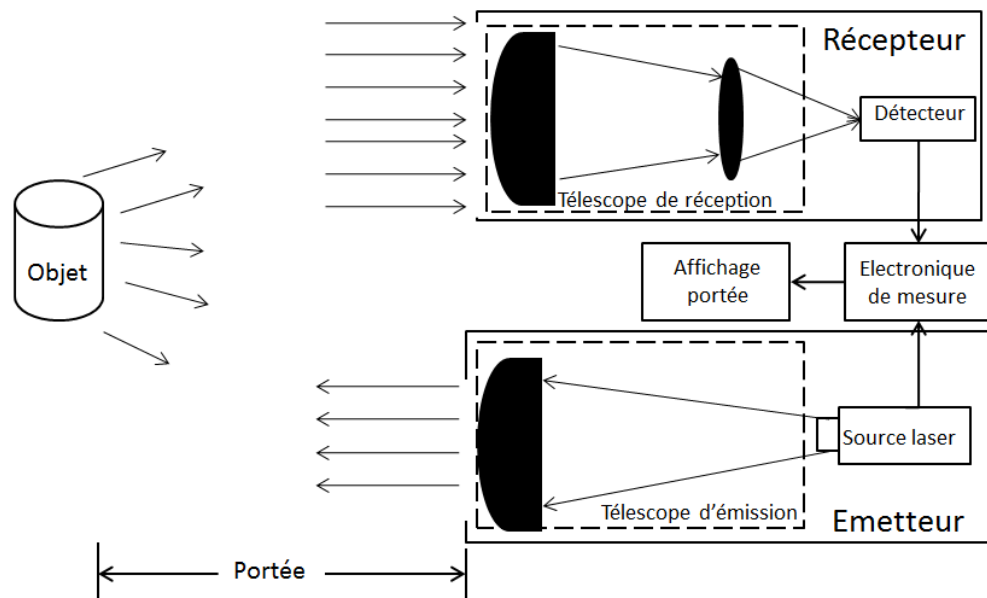


Figure 1. 1: Principe de la télémétrie laser.

1.3.1 Télémétrie laser par comparaison de phase

Dans un télémètre à comparaison de phase (Phase-shift), la puissance optique est modulée avec une fréquence constante [12]. Le schéma du principe de fonctionnement de cette technique est illustré dans la Figure 1.2. Une onde sinusoïdale de fréquence f_{rf} , générée par l'oscillateur principal, module le courant continu de la source laser (diode laser). Une photodiode récolte le faisceau laser réfléchi par l'objet. La mesure de la distance (ou portée R) D , comme donnée par la relation (1.1) [12], est déduite du déphasage $\Delta\varphi$ entre le photocourant fourni par la photodiode et le signal modulant la source laser comme représenté par les signaux de la Figure 1.3.

$$D = c' \cdot \frac{\Delta\varphi}{4\pi} \cdot \frac{1}{f_{rf}} \quad (1.1)$$

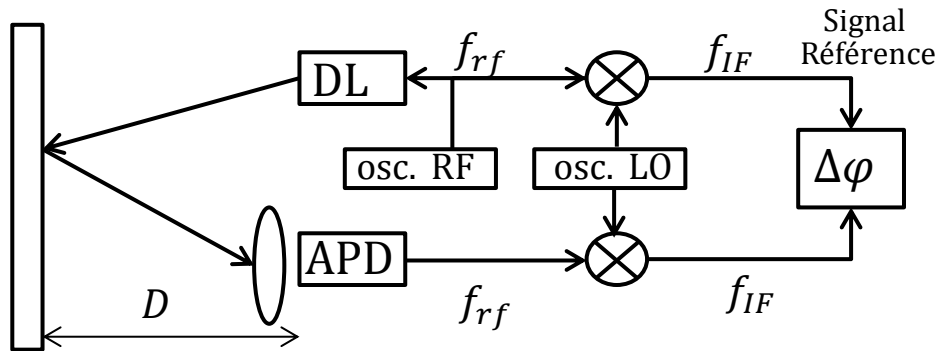


Figure 1. 2 : Schéma bloc du principe de la télémétrie par comparaison de phase (phase-shift).

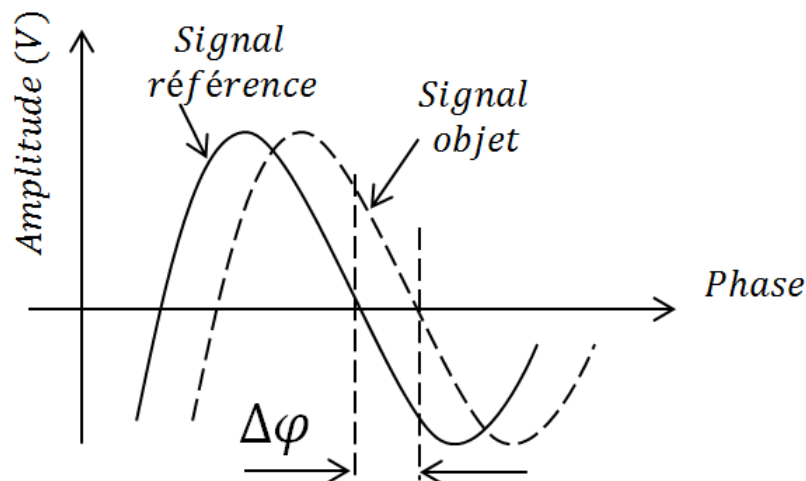


Figure 1. 3 : Signaux émis et rétrodiffusé de la télémétrie par comparaison de phase (phase-shift).

Le principal avantage de cette technique de télémétrie laser est la précision de mesure, mais elle présente certains inconvénients tels que : le niveau élevé du signal photoélectrique et le décalage de la fréquence intermédiaire.

1.3.2 Télémétrie laser à modulation de fréquence FMCW

Dans la méthode de télémétrie à modulation de fréquence à onde continue FMCW (Frequency Modulation Continuous Wave), comme représentée par la Figure 1.4, le signal laser est modulé en fréquence avec un signal sinusoïdal ou un signal rampe [11]. Le signal rétrodiffusé de l'objet ($f_R(t)$) présente un retard par rapport au signal émis ($f_E(t)$). La fréquence de battement (fréquence intermédiaire) est déduite du mélange de ces deux signaux par la relation :

$$f_{IF} = (f_E(t) - f_R(t)) \quad (1.2)$$

Comme le montre la Figure 1.5, le signal de battement (IF) a un comportement transitoire lorsque la pente de l'onde de rampe passe de haut en bas ou vice-versa. Sauf pour les zones instables, la fréquence de battement peut être mesurée en d'autres points. La portée peut être approximée par la relation suivante :

$$D = c' \cdot \frac{f_{IF} \cdot T_r}{4 \cdot \Delta f} \quad (1.3)$$

Où f_{IF} est la fréquence de battement (Hz), c' est la vitesse de la lumière dans le milieu de propagation (m/s), T_r étant la période du signal rampe (s) et Δf représente la largeur de la bande de fréquence de modulation (Hz).

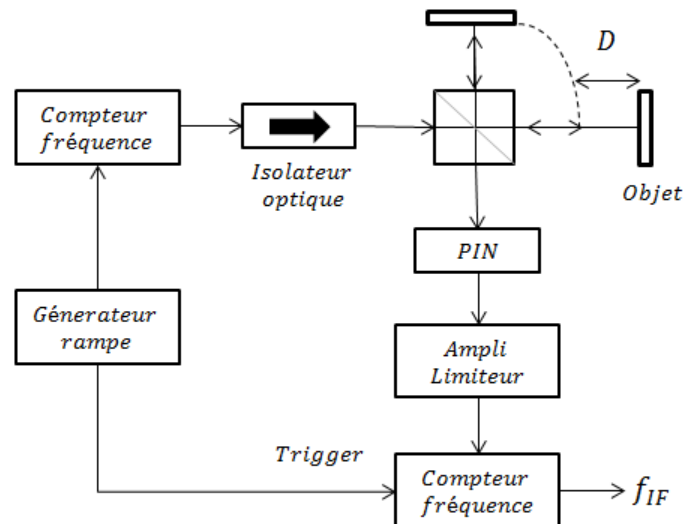


Figure 1. 4 : Schéma bloc du principe de la télémétrie FMCW.

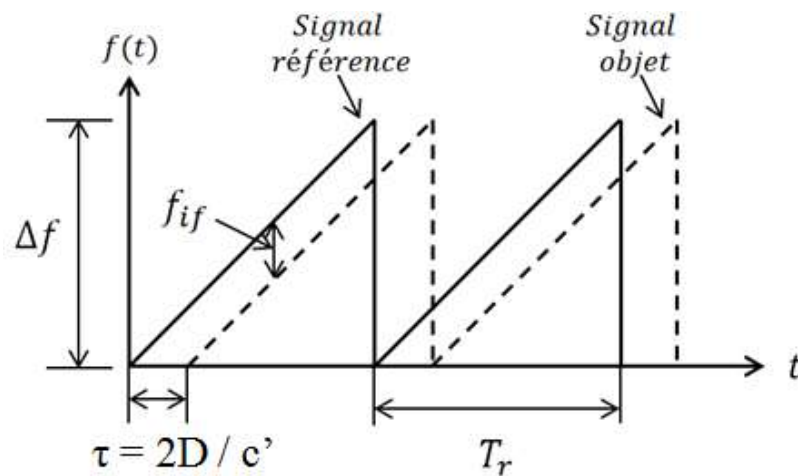


Figure 1. 5 : Signaux de la télémétrie FMCW.

1.3.3 Télémétrie laser à temps de vol TOF

La technique de télémétrie laser par temps de vol, appelée en anglais : Time-Of-Flight [10, 11], est la technique la plus courante en télémétrie laser. Le principe de la télémétrie TOF est l'émission d'une seule impulsion laser vers l'objet, d'une durée de quelques nanosecondes, et la récolte du signal rétrodiffusé. Le temps aller-retour mis entre la source laser, l'objet et l'optique de réception, appelé temps de vol (Time-Of-Flight) permet de déterminer la portée.

Comme représentée sur la Figure 1.6, une photodiode PIN est utilisée pour récolter une infime partie de l'impulsion laser émise. Le signal électrique issu de la PIN déclenchera le début du compteur de temps (START). Une fois le signal rétrodiffusé par l'objet est reçu au niveau du télescope de réception via l'utilisation d'un photodétecteur, une chaîne d'amplification amplifie le signal électrique obtenu à la sortie de ce détecteur du fait qu'il est beaucoup plus faible que celui collecté en émission. Le comptage préalablement enclenché par le signal issu de la photodiode PIN sera arrêté par le signal obtenu (STOP) du photodétecteur utilisé en réception et la portée sera déterminée par un autre étage. Ce dernier étage est connecté à un afficheur électronique qui affichera la portée mesurée. La portée R est déterminée par la relation suivante :

$$R = c' \cdot \frac{\Delta t}{2} \quad (1.4)$$

c' est la vitesse de la lumière dans le milieu de propagation (m/s). Δt : temps aller-retour de l'impulsion laser (s).

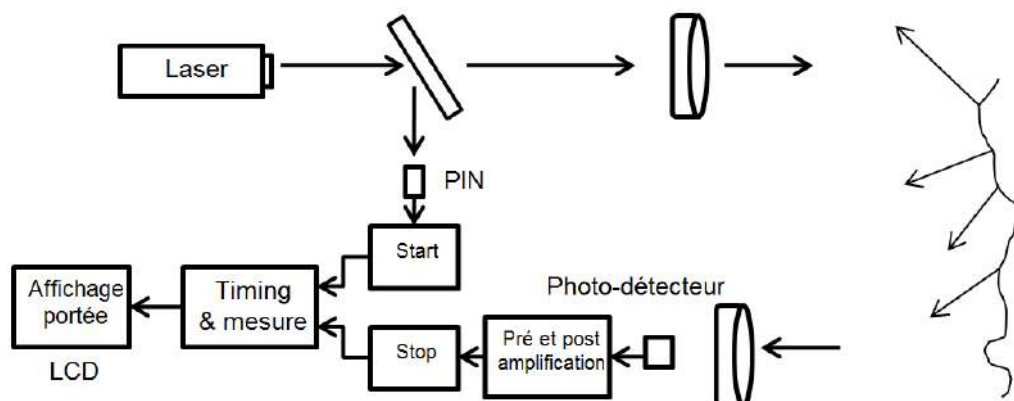


Figure 1. 6 : Principe de la télémétrie laser temps de vol (TOF).

Comme représenté dans la Figure 1.6, un certain nombre de lentilles et de filtre interférentiel (à la réception) sont utilisés afin de bien focaliser l'impulsion laser sur la surface sensible du

détecteur et d'éliminer les longueurs d'ondes parasites qui peuvent provenir du soleil ou d'autres sources de lumière.

À titre d'exemple, la Figure 1.7 représente les impulsions laser émises et rétrodiffusées en télémétrie TOF. L'utilisation au laboratoire d'un laser à Nd:YAG, dont la longueur d'onde est de 1064 nm, a permis d'émettre le faisceau laser dans l'atmosphère vers un objet pour mesurer la distance le séparant de la source laser. La courbe du bas (Ch 2) représente l'impulsion laser émise et collectée avec une photodiode PIN. L'impulsion du haut (Ch 4) est le signal rétrodiffusé de l'objet. Le temps aller-retour, ou intervalle de temps, écoulé est déterminé par rapport aux sommets des deux impulsions. Il est de 20 ns comme donné en haut à droite par (Δ) sur la fenêtre de l'oscilloscope. Cet intervalle de temps correspond à une distance de 3 m dans l'atmosphère.

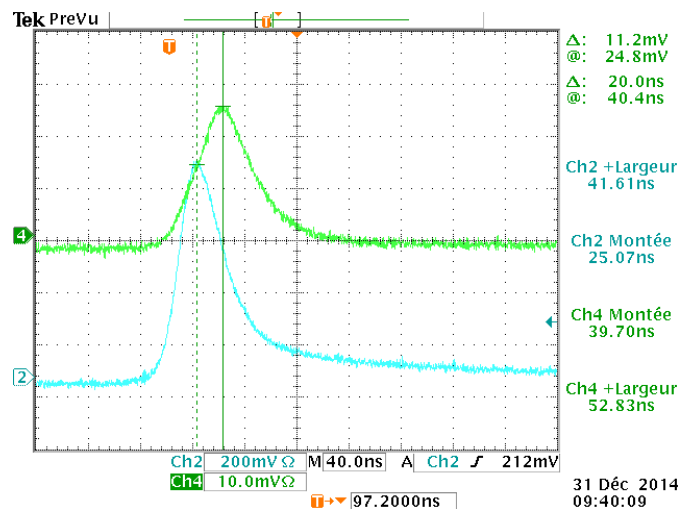


Figure 1. 7 : Impulsions laser émises (Ch 2 : 200 mV/div) et rétrodiffusées (Ch 4 : 10 mV/div).

1.3.4 Comparaison des trois techniques de télémétrie

Le tableau 1.1 [12] englobe les avantages et les inconvénients des trois techniques de télémétrie (TOF, FMCW et comparaison de phase) pour une propagation dans l'atmosphère. Généralement dans la technique TOF une source laser de type Nd:YAG à Q-switch est utilisée. Avec ce type de source et une puissance de 1,5 MW comme représentée sur le tableau 1.1, la portée maximale pouvant être atteinte est de 20 km dans l'atmosphère. Donc l'avantage majeur de cette technique est la longue distance de mesure. Ses inconvénients sont le prix de revient et la précision de mesure. Dans les deux autres techniques, la source laser utilisée est une diode laser. Il est beaucoup plus simple de moduler l'impulsion laser d'une telle source que de moduler la puissance d'un laser à solide. L'avantage commun, de ces deux

techniques, est la précision de mesure. Leur inconvénient est la portée du fait qu'avec une diode laser, on ne peut pas fournir des puissances laser de l'ordre du MW contrairement à un laser à solide. De plus le circuit de mesure de la portée, dans les techniques FMCW et comparaison de phase, est beaucoup plus complexe que celui de la télémétrie TOF. Pour ces raisons, la technique de télémétrie qui sera adoptée dans l'étude du télémètre laser est la technique à temps de vol TOF.

Tableau 1.1 Performances des trois techniques de télémétrie dans l'atmosphère.

Technique de télémétrie	TOF	FMCW	Phase-shift
Source laser	Laser à solide Q-switch	Diode laser	Diode laser
Puissance laser	1,5 MW	3 mW	10 mW
Portée maximale	20 km	30 m	400 m
Précision	5 m	36 mm	21 mm
Signal laser	Pulsé	Rampe	Sinusoidal

1.4 Principe de l'imagerie laser sous-marine

L'imagerie sous-marine a pour objectif de reproduire l'image et le profil 2D (et 3D) [25] de n'importe quel objet se trouvant immergé dans l'eau [22, 26-28]. La télémétrie et l'imagerie laser dans un milieu aquatique ont comme point commun la source laser. Comme représentée par la Figure 1.8, la source laser émet une impulsion de quelques nanosecondes vers l'objet à identifier. En imagerie, c'est la technique TOF qui est adoptée pour illuminer un objet. Pour ce qui est de la partie détection, à la place d'utiliser un photodétecteur pour collecter le signal rétrodiffusé, l'utilisation d'une caméra CCD (Charge Coupled Device) permet de reproduire l'image de l'objet qui sera affichée sur un écran [14]. La caméra dispose d'une optique de réception lui permettant d'augmenter la portée vers l'objet. Généralement, ces caméras CCD sont synchronisées avec la source laser [18, 29]. Cette synchronisation permet de déclencher la caméra à un instant précis qui suit l'émission de l'impulsion laser. La caméra est opérationnelle pour un temps très court ce qui permet d'éliminer la rétrodiffusion due aux particules qui se trouvent dans le milieu aquatique lors de la propagation du faisceau laser vers l'objet. La synchronisation de la caméra et l'utilisation de la technique TOF permettent aussi d'augmenter la portée d'illumination des objets dans l'eau. Les images obtenues par la caméra sont traitées et affichées par l'intermédiaire d'un logiciel tel que LABVIEW ou MATLAB. Par la suite, la visualisation des images se fait sur un écran.

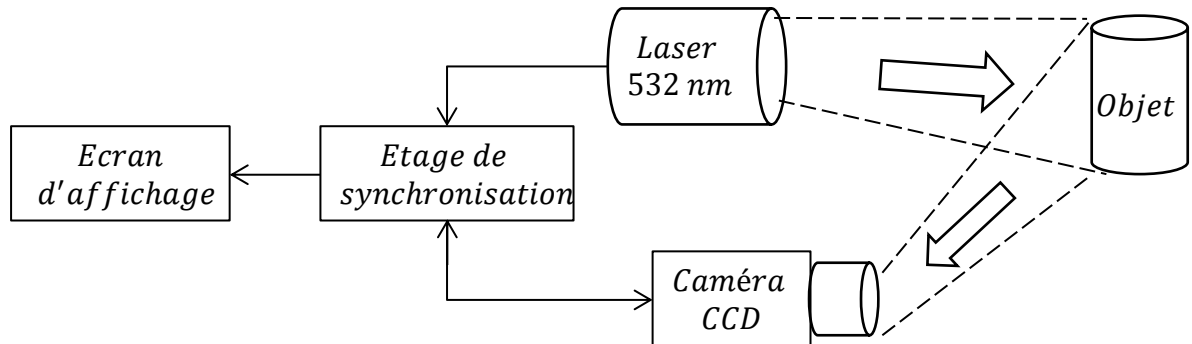


Figure 1. 8 : Principe de l'imagerie laser sous-marine.

Il est à noter que la propagation de la lumière dans l'eau par rapport à l'atmosphère doit susciter plus d'attention du fait que la lumière laser rencontre beaucoup plus d'atténuation dans l'eau que dans l'atmosphère [30]. Pour cela, dans la section suivante, sont données les conditions de propagations d'un faisceau laser dans l'eau et les longueurs d'ondes adéquates pour de longues distances de propagation.

1.5 Propagation de la lumière laser dans l'eau

La propagation de la lumière dans l'eau doit faire l'objet d'une attention particulière par rapport à la propagation dans l'atmosphère afin de choisir la longueur d'onde adéquate de la source laser. En effet, le faisceau laser rencontre plus d'atténuation dans l'eau que dans l'atmosphère [31]. Cette atténuation est due à la constitution de l'eau de mer qui contient de l'eau pure, du phytoplancton, de la matière organique dissoute et d'autres constituants [32-34]. Pour cela, la propagation d'un faisceau laser dans les milieux aquatiques a suscité l'intérêt de beaucoup de chercheurs en menant différents travaux afin de déterminer le coefficient d'atténuation de l'eau et les différentes longueurs d'onde qui peuvent se propager dans l'eau avec la plus faible atténuation possible [30, 35-38].

1.5.1 Lois de Beer-Lambert et portée

Pour un éclairage naturel de n'importe quel type d'eau (mer, lac, rivière ...) par le soleil, l'intensité lumineuse à une longueur d'onde donnée λ varie en fonction de la distance de propagation suivant la loi de Beer-Lambert [39]:

$$I_{\lambda}(z) = I_{0,\lambda} \cdot \exp(-c(\lambda) \cdot z) \quad (1.5)$$

Avec :

$I_{0,\lambda}$: Intensité lumineuse, à la surface de l'eau, exprimée en Watt.

$c(\lambda)$: Coefficient d'atténuation de l'eau à une longueur d'onde spécifique λ (m^{-1}).

z : Distance de propagation dans le milieu (m).

1.5.2 Coefficient d'atténuation et longueur d'onde de propagation dans l'eau

Afin d'étudier et de comprendre la propagation du faisceau laser dans l'eau, il est indispensable de rappeler que comme dans tout milieu, deux phénomènes contribuent à l'atténuation de la lumière qui sont : l'absorption et la diffusion [39]. Le coefficient d'atténuation est une somme des coefficients d'absorption et de diffusion [39]:

$$c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda) \quad (1.6)$$

Avec :

$c(\lambda)$: coefficient d'atténuation pour une longueur d'onde spécifique λ (m^{-1}).

$a(\lambda)$: coefficient d'absorption (m^{-1}).

$b(\lambda)$: coefficient de diffusion (m^{-1}).

Le coefficient d'absorption d'une eau de mer dépend des coefficients d'absorption des différents éléments qui rentrent dans sa constitution. Dans ce cas, ce coefficient peut être exprimé par la relation [40]:

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_y(\lambda) + a_s(\lambda) + a_i(\lambda) \quad (1.7)$$

Avec $a_w(\lambda)$: coefficient d'absorption de l'eau pure (m^{-1}). $a_y(\lambda)$: coefficient d'absorption des substances jaunes (m^{-1}). $a_s(\lambda)$: coefficient d'absorption des matières suspendues (m^{-1}). $a_i(\lambda)$: coefficient d'absorption des ions (m^{-1}).

Dans une eau de mer, l'absorption de la lumière est l'absorption de l'énergie des photons. L'eau pure, qui représente 95 % de l'eau de mer, est pour la lumière un milieu très absorbant et en particulier pour les infrarouges [37]. Quant à la diffusion de la lumière, qui est due aux inhomogénéités optiques du milieu, représente un changement aléatoire de la direction des rayons lumineux [41].

Les chercheurs ayant bien étudié les phénomènes d'absorption et de diffusion, sont arrivés à déduire que l'atténuation de la lumière dans une eau de mer pure est essentiellement due à

l'absorption. La diffusion ayant une moindre importance du fait qu'elle est faible comparé avec l'absorption comme le démontrent bien les courbes de la Figure 1.9 [36]. Ces courbes sont données pour une eau de mer pure où le coefficient de diffusion $b(\lambda)$ est très faible devant le coefficient d'absorption en fonction des longueurs d'onde du spectre électromagnétique. Cela s'avère exacte dans le cas d'une eau de mer pure, mais dans la réalité l'eau de mer ou les autres cours d'eau tels que les rivières et les lacs sont moins purs avec une diffusion qui s'avère être beaucoup plus importante que l'absorption comme le montre le tableau 1.2 [39]. Comme rapporté par C.D. Mobley, ce tableau représente les coefficients d'absorption et de diffusion de plusieurs types d'eau de mer. Pour une eau de mer côtière et pour une eau de mer turbide, la diffusion est beaucoup plus importante que l'absorption. Cette augmentation de la diffusion entraîne une augmentation systématique du coefficient d'atténuation.

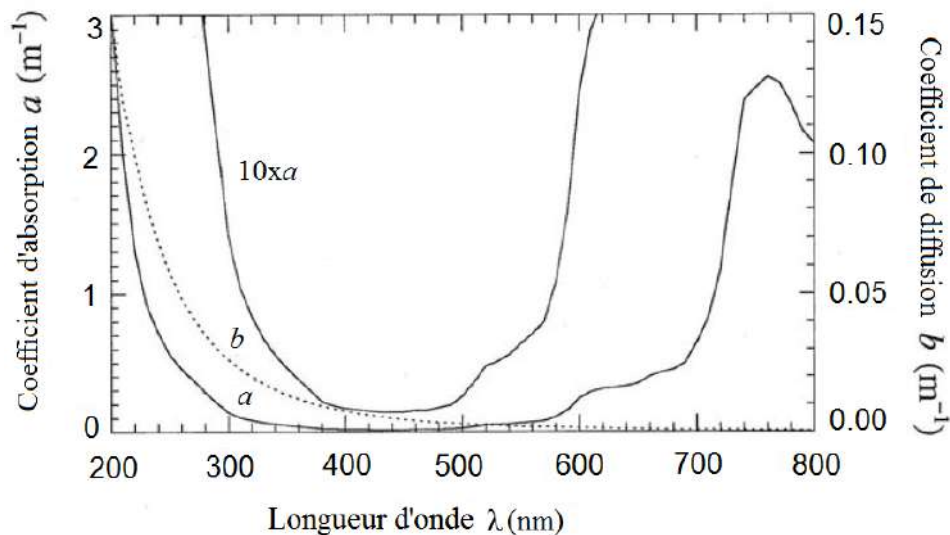


Figure 1. 9 : Coefficients d'absorption a (m^{-1}) et de diffusion b (m^{-1}) en fonction de la longueur d'onde d'une eau de mer pure.

Tableau 1.2 Propriétés optiques de différents types d'eau pour $\lambda = 530$ nm [39].

Type d'eau	a (m^{-1})	b (m^{-1})	c (m^{-1})
Eau de mer pure	0,0405	0,0025	0,043
Eau de mer claire	0,114	0,037	0,151
Eau de mer côtière	0,179	0,219	0,398
Eau turbide	0,366	1,824	2,190

Sur la base des travaux de H.U. Sverdrup et al. en 1942, une autre estimation du coefficient d'atténuation de l'eau de mer a été rapportée à différentes longueurs d'ondes comme le

montre le tableau 1.3 [33]. Ce tableau montre des valeurs qui se rapprochent aux valeurs du tableau 1.2 pour la longueur d'onde de 515 nm. Différemment au tableau précédent, ce tableau donne pour chaque type d'eau trois coefficients d'atténuation. À titre d'exemple, une eau de mer côtière peut être basse, moyenne ou haute.

Tableau 1.3 Coefficients d'atténuation de différentes eaux pour plusieurs longueurs d'ondes [33].

Type d'eau	Longueur d'onde λ (nm)			
	460	480	515	530
Eau de mer claire (basse)	0,038	0,026	0,035	0,038
Eau de mer claire (moyenne)	0,086	0,076	0,078	0,084
Eau de mer claire (haute)	0,160	0,154	0,143	0,140
Eau de mer côtière (basse)	0,224	0,230	0,190	0,169
Eau de mer côtière (moyenne)	0,362	0,334	0,276	0,269
Eau de mer côtière (haute)	0,510	0,454	0,398	0,348

La courbe donnée par la Figure 1.10 [39] représente le coefficient d'absorption de l'eau pour une large gamme spectrale de longueur d'onde. On remarque sur cette courbe que les faibles valeurs du coefficient d'absorption coïncident avec les longueurs d'onde du visible, et plus particulièrement celles du bleu et du vert.

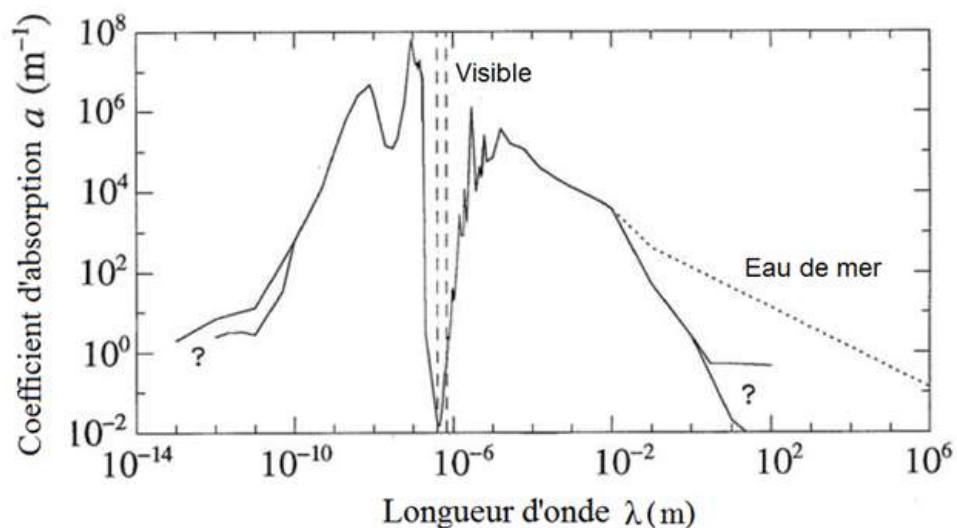


Figure 1.10 : Coefficient d'absorption de l'eau en fonction de la longueur d'onde.

La Figure 1.11 [42] montre la variation du coefficient d'atténuation pour une eau trouble et une eau claire sur une gamme de longueur d'onde s'étalant de 300 nm à 700 nm. Il est constaté que pour une eau trouble ce coefficient est plus élevé que dans le cas d'une eau claire comme il a été rapporté dans les tableaux 1.2 et 1.3. De plus, dans les deux types d'eau et en

particulier pour les infrarouges, l'atténuation est très élevée ce qui amène à déduire que l'utilisation d'une source laser dans le proche infrarouge n'est pas souhaitable.

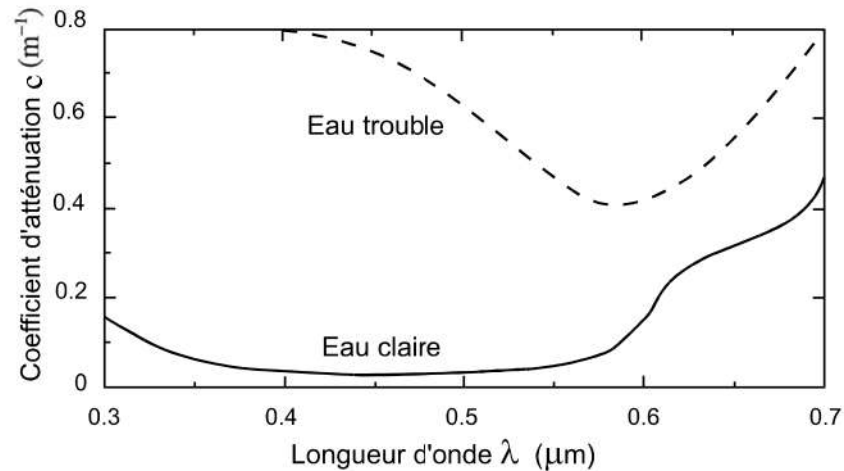


Figure 1.11 : Evolution du coefficient d'atténuation en fonction de la longueur d'onde pour une eau claire et une eau trouble.

La Figure 1.12 [42] permet d'observer la transmission du rayonnement solaire dans l'eau en fonction de la profondeur pour une large gamme spectrale allant jusqu'à 3,2 μm . Il est constaté que les longueurs d'onde situées dans le proche infrarouge sont atténuées dès les premiers centimètres sous l'eau. Les longueurs d'onde qui se propagent à plus de 100 m sous l'eau sont les longueurs d'onde qui se situent entre 400 nm et 550 nm du spectre lumineux.

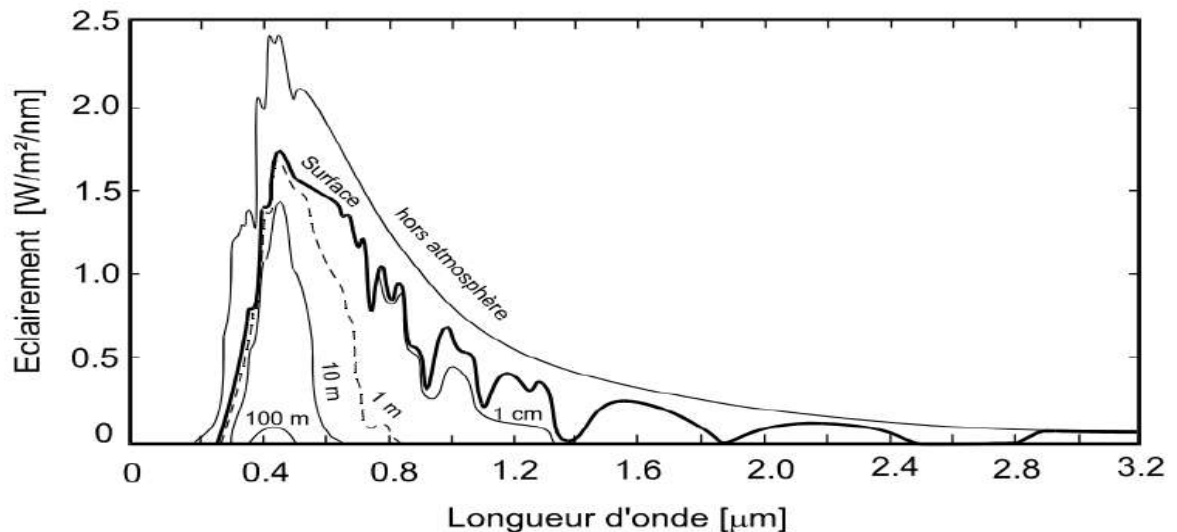


Figure 1.12 : Evolution de la lumière naturelle dans l'atmosphère et dans une eau claire.

De ces différentes courbes et ce qui a été rapporté dans les tableaux précédents, il y a deux longueurs d'ondes (bleu et vert) pour lesquelles l'atténuation est la plus faible possible et où le faisceau laser peut se propager pour de longues distances dans l'eau. Cela amène à conclure que la source laser pouvant être utilisée dans un télémètre ou un système d'imagerie laser en

milieu aquatique doit être un laser qui émet dans le bleu (435 à 480 nm) ou le vert (500 à 560 nm).

1.5.3 Vitesse de propagation de la lumière dans l'eau

Comme présentée dans les différentes techniques de télémétrie, la vitesse de la lumière rentre dans la détermination de la portée. Il est connu que la vitesse de propagation de la lumière dans l'atmosphère est de 3×10^8 m/s pour un indice de réfraction n_a égal à 1. Contrairement à l'atmosphère le coefficient de réfraction de l'eau n_e est de 1,33 [40], ce qui permet de déduire la vitesse de la lumière (c') dans l'eau par :

$$c' = 3 \cdot 10^8 \cdot \frac{n_a}{n_e} \quad (1.8)$$

Cela amène à ce que la vitesse de la lumière dans l'eau soit égale à : $2,25 \times 10^8$ m/s.

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, les principes de la télémétrie et de l'imagerie laser en milieu aquatique ont été présentés. Un récapitulatif des techniques de télémétrie laser les plus courantes a été fait. Le choix de la technique dite télémétrie à temps de vol TOF (Time-Of-Flight) a été fait en raison de sa simplicité de mise en œuvre. De plus, les caractéristiques de différents milieux marins tels que les coefficients d'absorption et de diffusion ont été rapportés. Cela a permis de faire le choix de la longueur d'onde de la source laser du télémètre qui permettra une bonne propagation du faisceau laser dans l'eau. En l'occurrence, ces deux longueurs d'onde sont le vert et le bleu. Comme le milieu aquatique présente un indice de réfraction différent de l'atmosphère, la vitesse de la lumière dans l'eau est égale à $2,25 \times 10^8$ m/s. Dans le chapitre suivant seront abordées les différentes parties du télémètre laser à temps de vol proposé et les points communs avec l'imagerie sous-marine.

Chapitre 2 :

*Présentation du télémètre
laser à temps de vol proposé*

Chapitre 2 : Présentation du télémètre laser à temps de vol proposé

2.1 Introduction

Dans le but de mettre au point un système de télémétrie ou d'imagerie laser dans l'eau, il est indispensable de faire un choix sur les différentes parties qui vont constituer un tel système et de ressortir les éléments communs pouvant être utilisés en télémétrie et en imagerie. Dans ce chapitre, sont présentés les différents étages qui constituent le télémètre laser proposé. Une étude a été menée afin de faire le choix de la source laser adéquate. De plus, les systèmes de réception appropriés, à la longueur d'onde du laser de 532 nm, sont décrits pour la télémétrie et l'imagerie. Afin d'évaluer les performances du télémètre par rapport aux capacités des éléments le constituant, une étude du rapport signal sur bruit est présentée.

2.2 Choix de la source laser

Sur la base de ce qui a été rapporté dans le chapitre 1, la source laser du télémètre devrait avoir une longueur d'onde de 532 nm (dans le vert) ou de 450 nm (dans le bleu). Ces deux longueurs d'onde permettent une bonne propagation de la lumière laser dans l'eau du fait qu'ils présentent les plus faibles coefficients d'atténuation. Dans ce qui suit, sont présentées les sources lasers qui peuvent fournir de telles longueurs d'ondes.

2.2.1 Laser à diode

La source laser peut être une diode laser pulsée qui émet dans le vert telle que la diode LD-520-120MG ou le bleu telle que la diode LD-450-1400MG. Une telle diode laser nécessite la réalisation d'un circuit driver afin de fournir la tension et le courant nécessaires pour générer des impulsions laser de l'ordre de la nanoseconde [43]. Il est à noter que ce type de source laser est fragile et dont le coût est élevé surtout pour les diodes laser qui émettent dans le bleu. Le prix d'une diode laser dont la puissance est de 50 mW, telle que la référence RHB510APA (445 nm, 50 mW, 60 °C, 5,6 mm), est de 4397 \$. De plus, pour des puissances laser élevées la diode nécessite un refroidissement à eau, à air ou à cellules thermoélectriques. Il y a certains fabricants qui ont mis au point des émetteurs lasers, à base de telles diodes lasers, hermétiques et étanches afin d'être immergé dans l'eau. Parmi ces fabricants, il y a OCEANTOOLS qui commercialise des sources laser dans le bleu et le vert telles que la source C-LASER (Underwater Lasers for Pointing, Scaling and Ranging). Un autre fabricant, Imenco Smart Solutions a développé des sources laser dans le vert dédiées pour des applications sous-marines d'une puissance maximale de 150 mW (Underwater Line Laser, 150 mW).

2.2.2 Micro laser

Comme le développement des sources laser a connu une grande avancée, il existe des cristaux laser, connus sous l'appellation de micro-laser (Micro-chip laser), qui peuvent générer la longueur d'onde de 532 nm. L'appellation de micro-laser est due à la longueur du cristal qui est de quelques millimètres, et même de l'ordre du micromètre. Ce type de laser est à base de barreau laser tel que le Nd: YVO₄ [44]. Généralement, un tel cristal est pompé par diode laser à la longueur d'onde de 808 nm qui correspond à la raie principale d'absorption du Nd:YVO₄. Certains barreaux laser sont munis d'un cristal doubleur (KTP) [45] et d'autres avec un absorbant saturable (Cr: YAG ou Vr: YAG) pour générer une impulsion laser Q-switch. De plus, les miroirs qui forment la cavité laser sont déposés sur les deux faces du barreau comme représenté sur la Figure 2.1 (HR : High Reflectivity, HT : High Transmission). Le principal avantage de ce type de laser est la possibilité de moduler le faisceau lumineux par l'intermédiaire du circuit électronique qui commande l'alimentation de la diode laser (DL) de pompage. Ce type de source peut être utilisé en télémétrie TOF, FMCW ou à comparaison de phase. Des tests effectués au niveau du laboratoire avec un micro-laser Nd :YVO₄+KTP de 2 mm de long a donné les résultats de la modulation du signal laser émis tels que représentés par la Figure 2.2 [44]. La partie électronique a été réalisée pour générer des trains d'impulsions. Les signaux de commande (signal PWM et signal sinusoïdal) sont donnés par les courbes supérieures (Ch 1) dans les deux graphes. Les courbes inférieures (Ch 2) représentent les impulsions laser collectées par une photodiode PIN et un amplificateur trans-impédance. Comme ce micro-laser n'inclut pas d'absorbant saturable dans sa cavité, les impulsions obtenues sont de l'ordre de la microseconde.

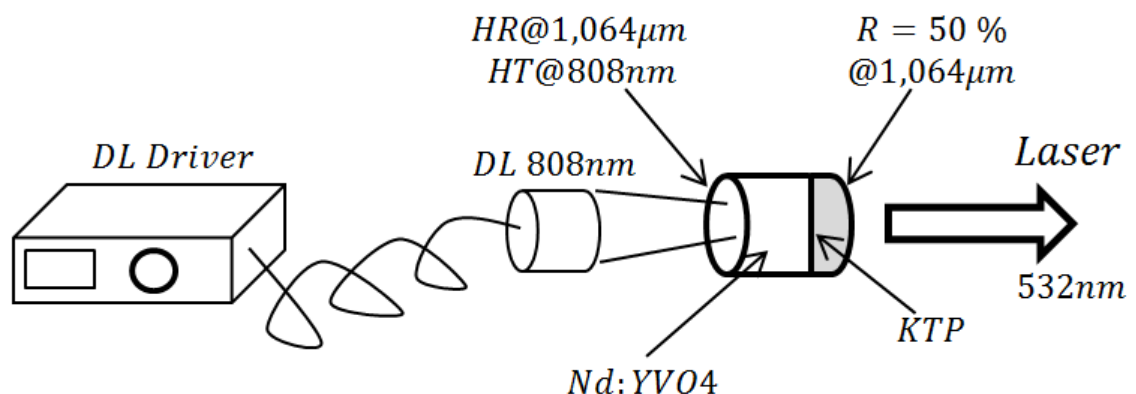


Figure 2. 1 : Micro-laser Nd :YVO₄ + KTP.

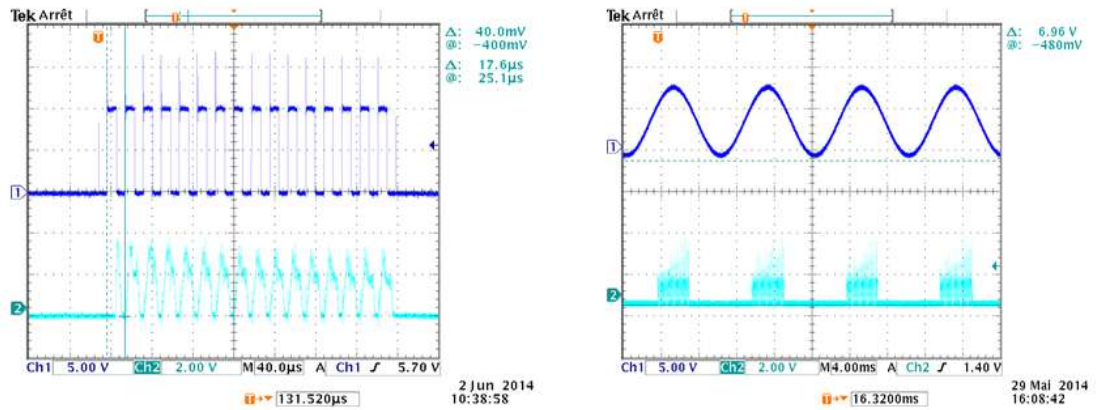


Figure 2. 2 : Impulsions laser (Ch 2) générées par le micro-laser Nd :YVO₄.

2.2.3 Laser à solide

Comme représentée par la Figure 2.3, la source laser de l'émetteur du télémètre peut être un laser à solide Nd :YAG (Neodymium doped Yttrium Aluminum Garnet) pompé par lampe flash (ou diode laser) avec un cristal doubleur tel que le KTP (le titanyl phosphate de potassium : KTiOPO₄ ou KTP) [45] pour la génération de la seconde harmonique (532 nm) et un Q-switch à commutation active. Ce type de Q-switch est réalisé à base d'une cellule électro-optique plus connue sous l'appellation de cellule de Pockels. Cette cellule, une fois insérée dans la cavité laser, permet d'obtenir une impulsion laser de l'ordre de la nanoseconde comme illustrée sur la Figure 2.4 (tests effectués avec un laser de laboratoire).

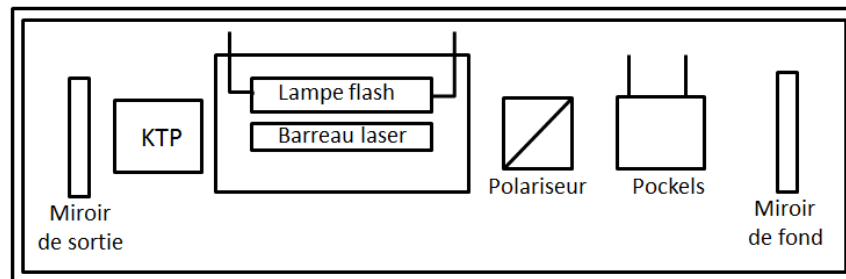


Figure 2. 3 : Laser à solide Nd :YAG + KTP + cellule de Pockels.

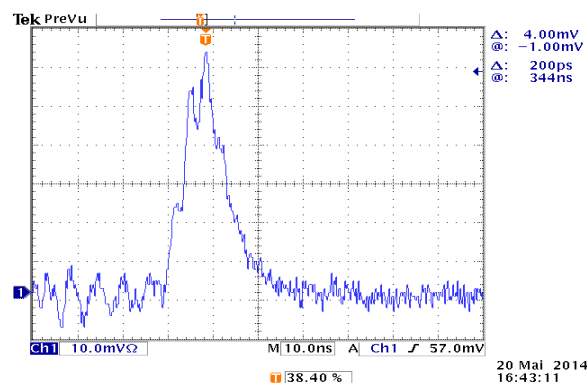


Figure 2. 4 : Impulsion laser Q-switch à la longueur d'onde 532 nm.

L'inconvénient de ce type de laser est l'utilisation d'une haute tension, qui est de l'ordre de 3 kV, pour alimenter la cellule de Pockels. Cette dernière est déclenchée par un signal retardé qui provient de l'électronique de la lampe flash. Pour cette raison, il serait plus intéressant d'utiliser un laser Q-switch à commutation passive. Ce dernier est à base d'absorbant saturable, tels que le Cr:YAG (Chromium doped Yttrium Aluminum Garnet) ou le V:YAG (Vanadium doped yttrium aluminium garnet) [45]. L'absorbant est placé à l'intérieur de la cavité laser comme le montre la Figure 2.5. L'utilisation d'un absorbant saturable à la place d'une cellule de Pockels permet de réduire la taille de l'électronique de l'émetteur laser et de diminuer la longueur de la cavité laser. Cela est dû à la longueur de l'absorbant saturable qui est de quelques millimètres contrairement à la cellule de Pockels.

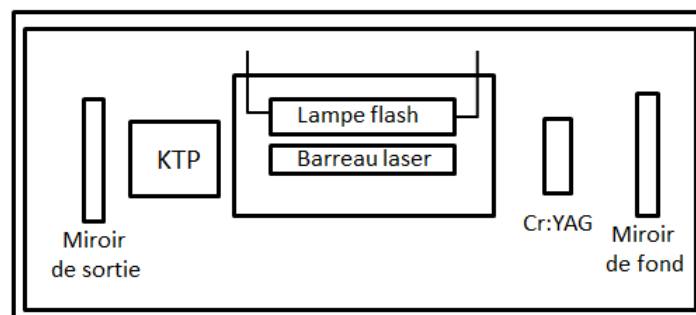


Figure 2.5 : Laser à solide Nd:YAG + KTP + Cr:YAG.

Parmi les quatre sources laser présentées, il est plus intéressant d'utiliser une source laser à Nd:YAG pompée par lampe flash avec un Q-switch à commutation passive et un cristal doubleur KTP afin d'obtenir la longueur d'onde 532 nm. De plus, cette source laser en comparaison avec les deux autres sources (Micro laser et diode laser) peut fournir des puissances optiques allant jusqu'aux mégawatts.

2.3 Choix du système de détection et mesure du télémètre

Un télémètre laser aquatique qui utilise la technique TOF est constitué des éléments suivants : une source laser pulsée à 532 nm, une optique de réception, un système de détection, un circuit discriminateur (Timing discriminator) [46], un circuit de mesure de la portée et un écran LCD (Liquid-Crystal Display). Le système de détection de ce télémètre laser, associé au télescope de réception, est le premier élément qui analysera le signal rétrodiffusé d'un objet immergé dans l'eau. Comme dans l'eau, le coefficient d'atténuation est plus élevé que dans l'atmosphère, il est important de choisir les composants appropriés d'un tel système de détection. Comme représenté par la Figure 2.6, ce système de détection comprend une photodiode PIN, une photodiode à avalanche APD [47] ou un tube photomultiplicateur PMT

(PhotoMultiplier Tube) [48, 49], le préamplificateur TIA (Trans-Impedance Amplifier) et le post-amplificateur, ainsi que le circuit discriminateur. Les photodiodes PIN et APD (ou PMT) transmettent respectivement les signaux START et STOP au circuit de mesure d'intervalle de temps ΔT . Cet intervalle de temps correspond au temps aller-retour (temps de vol) de l'impulsion laser. Un autre circuit détermine la portée de l'objet par rapport à ce temps aller-retour et la vitesse de propagation de la lumière laser dans l'eau selon l'équation (1.4). Par la suite, la mesure est affichée sur un écran LCD. À noter que le photodétecteur utilisé en réception doit avoir une bonne réponse à la longueur d'onde du laser de 532 nm.

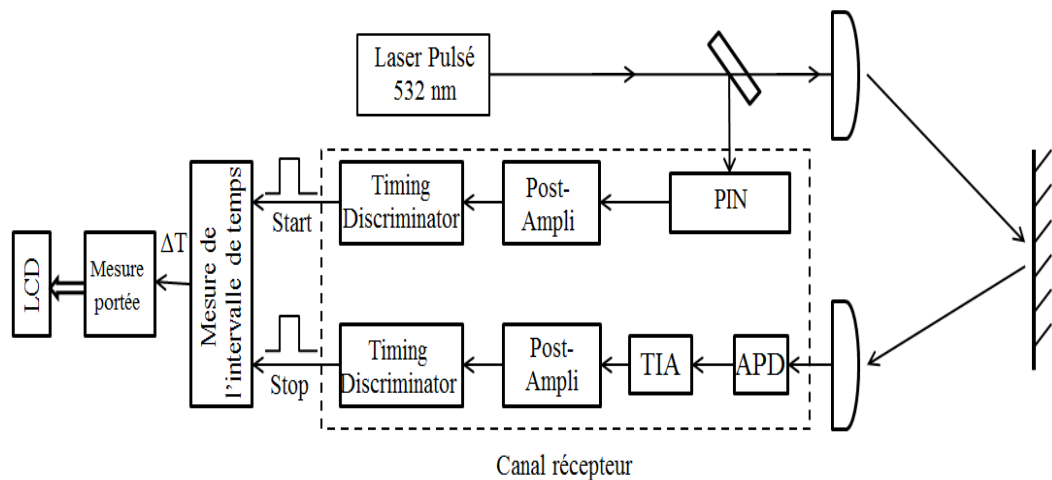


Figure 2. 6 : Schéma synoptique du système de détection d'un télémètre laser TOF.

2.3.1 Choix du photodétecteur

Un photodétecteur est un composant photoélectrique à base de semi-conducteur capable de convertir l'énergie lumineuse reçue sur sa surface photosensible en un courant électrique dit photocourant. Afin de pouvoir intégrer le système de détection d'un télémètre laser aquatique, il est primordial que ce photodétecteur remplisse certains critères de sélection. Ces critères sont : une bonne réponse spectrale à la longueur d'onde du laser, un gain interne d'amplification élevé, un faible courant d'obscurité afin de minimiser les bruits d'amplification et une bande passante permettant de détecter des impulsions lasers de très courtes durées. Les trois types de photodétecteur les plus utilisés dans de telles applications de télémétrie sont la photodiode PIN, la photodiode à avalanche (APD) et le tube photomultiplicateur PMT. Le désavantage que présente la PIN est son gain interne qui est égal à 1. Pour cette raison, elle est beaucoup plus utilisée en émission afin de fournir l'impulsion START qu'en réception. Contrairement à la PIN, la photodiode à avalanche APD présente un gain d'amplification interne pouvant avoir un facteur égal à 100. Pour ce qui est

du tube PMT, il présente un gain beaucoup plus élevé (amplification en courant) en comparaison avec l'APD, mais ses inconvénients sont son volume, sa fragilité (tube en verre) et sa tension d'alimentation très élevée qui est d'environ 1500 V. Pour ces raisons, le choix du photodétecteur se porte sur la photodiode à avalanche APD. Comme il existe plusieurs fabricants d'APD avec différentes caractéristiques, un choix de sélection s'avère essentiel.

Le tableau 2.1 représente les photodiodes sélectionnées du fabricant First Sensor. La photodiode à avalanche AD800-11 présente un courant d'obscurité plus faible en raison du diamètre de sa surface active (800 μm) par rapport à la photodiode AD1900-11 dont la surface active est plus grande avec un diamètre de 1900 μm . La troisième photodiode à avalanche AD230-9-400M, qui est une série hybride du fabricant, renferme à son intérieur l'amplificateur trans-impédance (TIA) dont le rôle est de transformer le photocourant obtenu de l'APD en une tension. Cette photodiode hybride présente un très faible courant d'obscurité (0,5 - 1,5 nA) en raison de sa très petite surface active dont le diamètre est de 230 μm . Les trois photodiodes présentes de très bonnes réponses spectrales à la longueur d'onde de 532 nm en se référant à leur sensibilité de détection. De plus, elles ont d'excellentes bandes passantes qui leur permettent de détecter des impulsions laser de durées minimales de l'ordre de 0,875 ns, 1 ns et 2 ns. La tension maximale d'alimentation pour chaque APD ne dépasse pas les 240 V avec un très faible courant. Cette tension est beaucoup moins élevée que celle du PMT et elle peut être obtenue par l'utilisation d'une batterie de 1,5 V et d'un circuit élévateur de tension tel que le LT1073 ou le LT1613. Comme exemple, le circuit LT1613 peut fournir une tension maximale de 34 V à partir d'une tension d'alimentation de 1,5 V. Comme le montre la Figure 2.7, le rajout d'un étage multiplicateur de tension (formé de condensateurs et de diodes) amène à fournir une tension en sortie de 120V.

Tableau 2. 1 Caractéristiques optoélectroniques des photodiodes à avalanche.

Détecteur	AD800-11	AD1900-11	AD230-9-400M
Bande passante (MHz)	350	175	400
Impulsion laser min. détectable (ns)	1	2	0.875
Surface active \varnothing (μm)	800	1900	230
Sensibilité de détection (A/W) $\lambda=532\text{nm}, M=100$	33	33	20
Courant d'obscurité (nA), M=100 (Typ-Max)	1 - 5	5 - 20	0,5 - 1,5
Tension de claquage (V), Min-Max	90 - 240	90 - 240	160 - 240

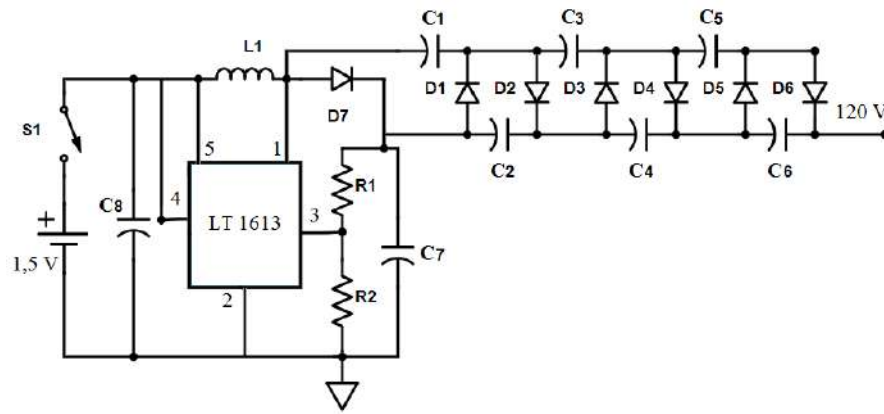


Figure 2. 7 : Circuit d'alimentation de la photodiode à avalanche.

2.3.2 Choix de l'étage d'amplification

Dans un télémètre laser, que ce soit en réception ou en émission, les étages d'amplification sont nécessaires afin d'amplifier le signal issu de la photodiode. La photodiode est suivie d'un premier étage d'amplification appelé amplificateur trans-impédance (TIA). Ce dernier transforme le photocourant, de quelques micro-ampères, issu de la photodiode en une tension de quelques millivolts d'amplitude. Comme cette tension est faible pour être appliquée à l'étage discriminateur, un autre étage d'amplification (post-amplification) est nécessaire. Ces amplificateurs peuvent être à base des transistors ou des amplificateurs opérationnels rapides. Une recherche a été effectuée sur les amplificateurs rapides et sur cette base trois différentes topologies de l'étage amplificateur sont proposées. Ces trois topologies sont illustrées par la Figure 2.8. La première configuration (Figure 2.8(a)) est constituée d'une APD et d'un amplificateur trans-impédance (TIA). Ce dernier est suivi par un autre amplificateur rapide. Dans cette configuration, les amplificateurs rapides qui peuvent être utilisés sont l'amplificateur AD8002 ou l'amplificateur AD8009 du fabricant Analog Devices [50]. La deuxième topologie (Figure 2.8(b)) est construite autour de la même APD que dans la première topologie et d'un seul circuit intégré qui renferme les deux étages d'amplification (TIA et post-amplificateur). Ce circuit est le AD8015 de Analog Devices. Dans la troisième topologie (Figure 2.8(c)), la photodiode hybride AD230-9-400M renferme dans son boîtier l'APD et l'amplificateur TIA. L'étage suivant, post-amplificateur, peut-être le circuit intégré AD8002 ou AD8009 comme dans la première topologie. La bande passante de l'amplificateur AD8009 est de 1 GHz et celle du AD8002 est de 600 MHz. Le AD8002 peut être largement utilisé vu sa rapidité et de plus son boîtier contient deux amplificateurs contrairement au boîtier du AD8009 qui ne contient qu'un seul.

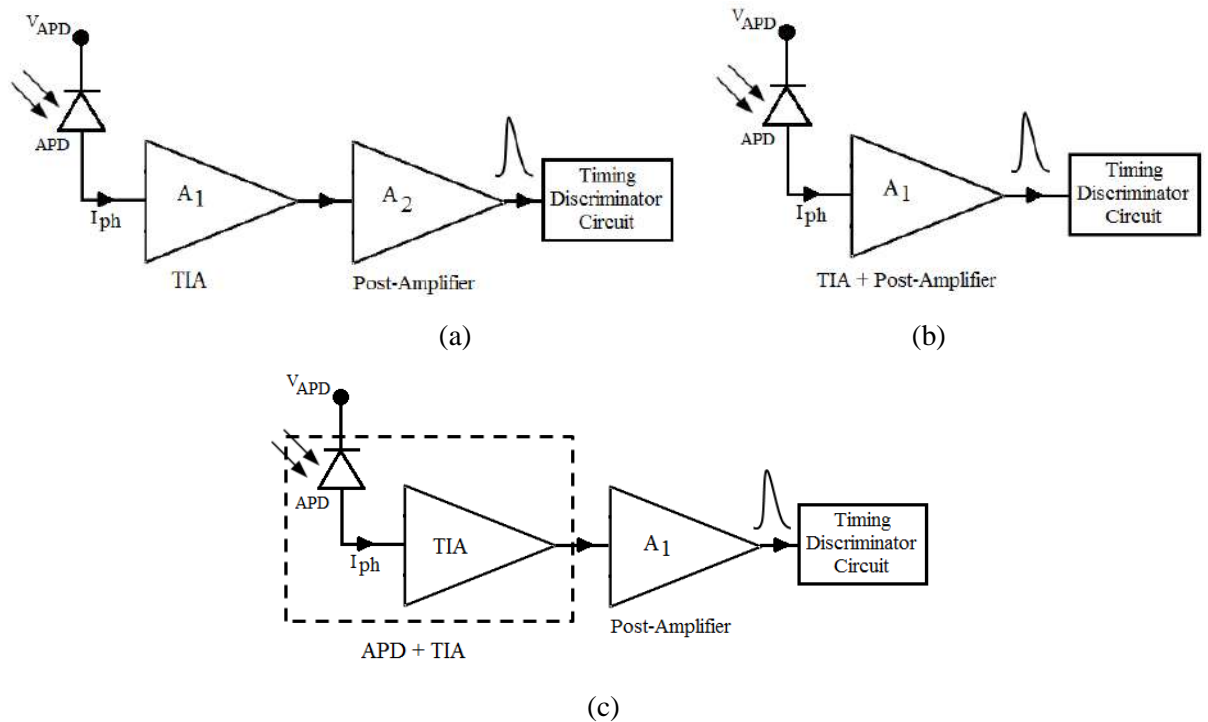


Figure 2. 8 : Trois topologies de l'étage amplificateur.

2.3.3 Choix de l'étage discriminateur

L'étage discriminateur, connu sous l'appellation anglaise de Timing Discriminator, est l'étage qui vient juste après l'étage post-amplificateur. Son rôle, en émission comme en réception, est de fournir les impulsions qui correspondent à la détermination du début (START) et la fin (STOP) de l'intervalle de temps Δt que met l'impulsion laser entre l'émetteur, l'objet et le récepteur. L'étage discriminateur est suivi de l'étage de mesure de l'intervalle de temps Δt . Les mesures doivent être faites, aux mêmes points de référence, pour les impulsions laser émises et réfléchies. Si cela est respecté, la mesure de la portée sera précise. Afin de générer les points de début et de fin de mesure, deux techniques sont utilisées. Dans la première technique, comme représentées par la Figure 2.9 (a), ces points sont déterminés par rapport à une tension de seuil (V_{ref}), préalablement fixée, qui correspond à un seuil des fronts de montée des impulsions laser émises et réfléchies. Dans la deuxième technique, ces points de mesure sont déterminés par rapport aux valeurs maximales des impulsions lasers émises et réfléchies comme représentées par la Figure 2.9(b).

Il est plus intéressant d'utiliser la deuxième technique afin de déterminer les points de mesure, du fait que dans le cas d'un faible signal laser reçu d'un objet lointain et avec une très faible réflectivité, il y aura toujours la possibilité de déterminer l'intervalle de temps Δt . Par contre

dans le cas de la première technique à seuil, la mesure de la portée risque de ne pas avoir lieu si le signal rétrodiffusé est en dessous du seuil de référence préalablement fixé.

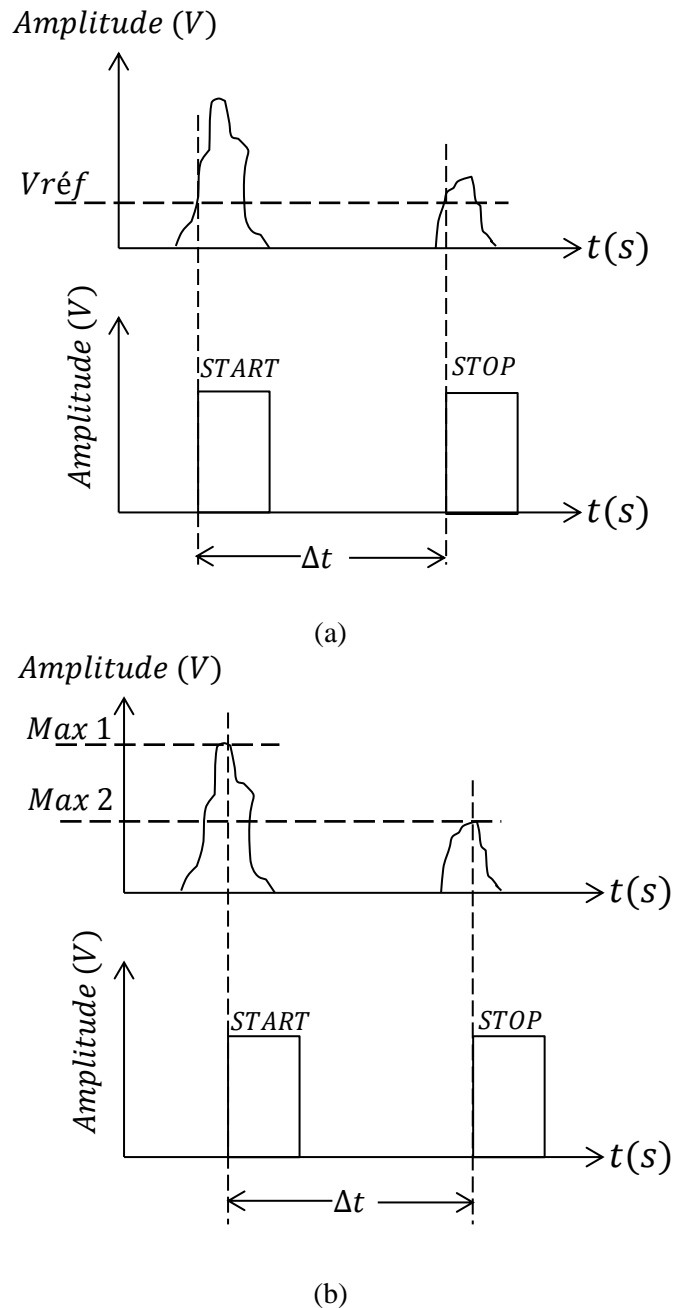


Figure 2.9 : Points de mesure de l'intervalle de temps Δt .

2.3.4 Choix des circuits de mesure d'intervalle de temps et portée

À partir des impulsions START et STOP obtenues des circuits discriminateurs, un circuit est utilisé pour générer une seule impulsion dont la durée est égale à Δt , comme représentée par la Figure 2.10. Comme le montre la Figure 2.11, cette impulsion est utilisée pour déterminer la portée par l'utilisation d'un microcontrôleur ou un circuit logique (porte logique AND) avec une horloge dont la fréquence (f) est de 112,5 MHz. Cette fréquence correspond à une

propagation de la lumière laser dans l'eau. Les impulsions obtenues, à la sortie de cette porte logique, incrémentent un compteur qui affichera sur un écran LCD la portée de l'objet. Pour une propagation dans l'atmosphère, la fréquence de cette horloge est de 115 MHz.

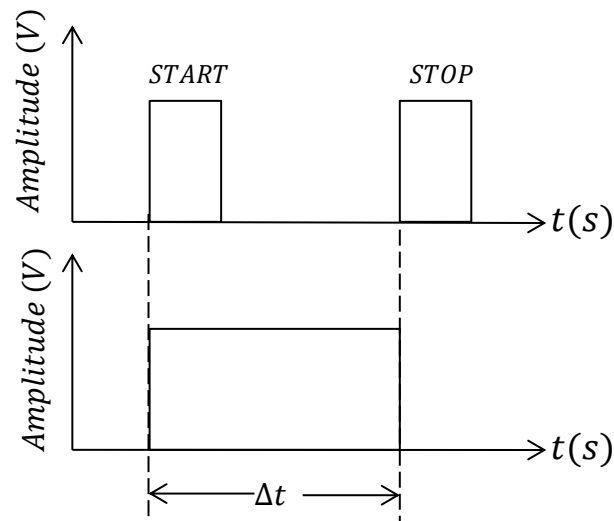


Figure 2. 10 : Forme de l'impulsion obtenue à la sortie du circuit d'intervalle de temps Δt .

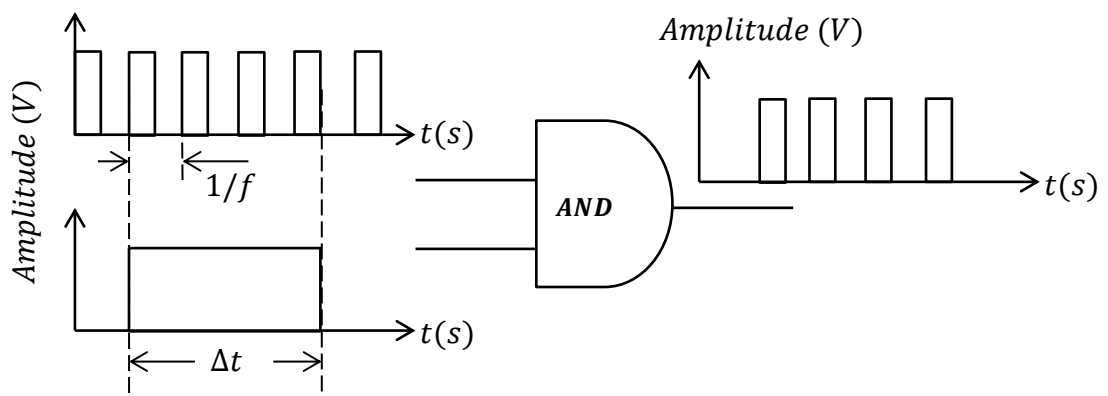


Figure 2. 11 : Circuit de mesure de la portée.

2.4 Réception en imagerie

L'élément commun entre la télémétrie et l'imagerie laser dans l'eau est la source laser. Lorsqu'un objet est immergé dans une eau à une certaine distance de profondeur, il est indispensable de l'illuminer pour obtenir son image surtout si le milieu est obscur. Comme décrit dans le chapitre 1, contrairement à la télémétrie, une caméra CCD (Charge Coupled Device) est utilisée en réception. Dans le but de réduire la rétrodiffusion, lors de la propagation du faisceau laser, la caméra est fermée. Elle ne sera active que de quelques secondes après l'émission du laser. Pour cela, un système d'imagerie est doté d'un étage de synchronisation entre le laser et la caméra, d'où l'appellation en anglais Gated Imaging System, comme schématisé sur la Figure 2.12. Dans certains milieux marins, où l'atténuation

est très élevée, il est préconisé d'utiliser des caméras de type ICCD (Intensified Charge Coupled Device Camera) qui contiennent un tube intensificateurs par rapport aux caméras CCD. Certaines caméras sont équipées de leur propre télescope de réception telle que la caméra PI-MAX4 du fabricant Princeton Instruments. Cette caméra peut enregistrer trois cents images par seconde.

Certaines applications font appel à la télémétrie et l'imagerie en même temps afin de faire une reconstitution en 3 dimensions (3D) de l'objet immergé dans l'eau ou dans l'atmosphère.

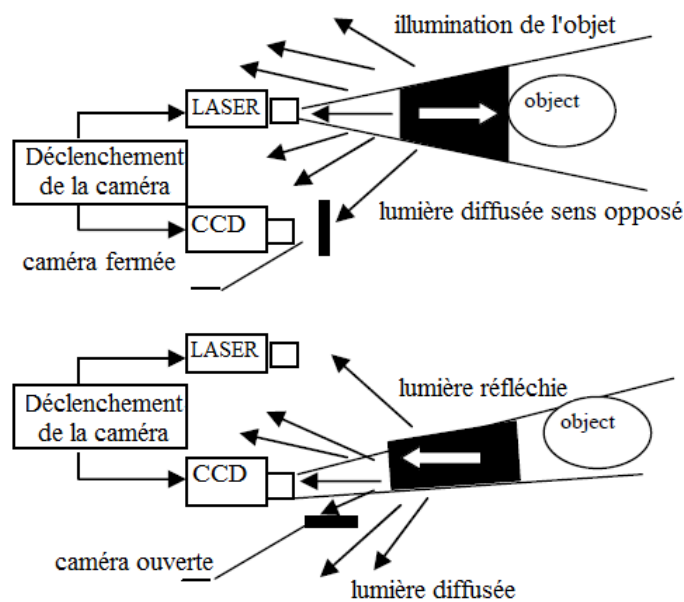


Figure 2.12 : Principe de fonctionnement d'une caméra CCD d'un système d'imagerie laser.

2.5 Evaluation des performances du télémètre laser aquatique

Afin d'évaluer les performances d'un télémètre laser, il est indispensable de faire l'évaluation de son rapport signal sur bruit. Ce rapport permettra de déterminer la distance maximale de mesure pouvant être atteinte sur la base des différents paramètres du télémètre. Ces paramètres sont la puissance du laser, le coefficient d'atténuation de l'eau, les performances du détecteur (Photodiode APD) et les différents bruits de la chaîne de détection.

2.5.1 Etude du rapport signal sur bruit du télémètre laser aquatique

Le rapport signal sur bruit SNR (Signal to Noise Ratio) d'un télémètre laser est exprimé par la relation (2.1) [5, 21] dans le cas d'une détection avec une photodiode à avalanche (APD) associée à un amplificateur trans-impédance (TIA) (Figure 2.13) :

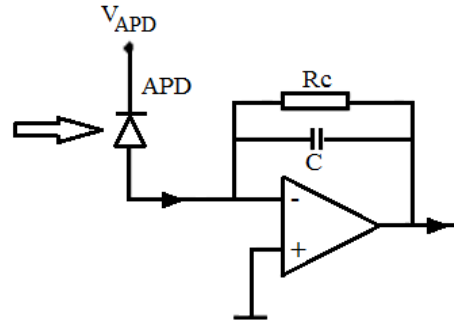


Figure 2. 13 : Photodiode à avalanche associée à l'amplificateur TIA.

$$SNR = \frac{\langle i_s^2 \rangle}{\langle i_n^2 \rangle} = \frac{\langle i_s^2 \rangle}{\langle i_p^2 \rangle + \langle i_b^2 \rangle + \langle i_c^2 \rangle + \langle i_{db}^2 \rangle + \langle i_t^2 \rangle} \quad (2.1)$$

$\langle i_p^2 \rangle$ est la puissance moyenne du bruit quantique associée à une photodiode à avalanche et donnée par :

$$\langle i_p^2 \rangle = 2q \cdot \mathfrak{R} \cdot P_r \cdot M^2 \cdot F(M) \cdot B \quad (2.2)$$

Avec \mathfrak{R} : la sensibilité de l'APD (A/W), P_r : la puissance laser reçue au niveau de l'APD (W), M : le gain en courant de l'APD, q : la charge de l'électron, $F(M)$: le facteur d'excès de bruit de l'APD et B : la bande passante (Hz).

$\langle i_b^2 \rangle$ est le bruit de fond généré par l'illumination du soleil et exprimé par :

$$\langle i_b^2 \rangle = 2q \cdot \mathfrak{R} \cdot P_b \cdot M^2 \cdot F(M) \cdot B \quad (2.3)$$

Avec P_b : la puissance du bruit de fond (nW).

$\langle i_c^2 \rangle$ est le bruit généré par la rétrodiffusion des particules suspendues dans l'eau (Clutter backscatter noise). Il est donné par la relation suivante :

$$\langle i_c^2 \rangle = 2q \cdot \mathfrak{R} \cdot P_c \cdot M^2 \cdot F(M) \cdot B \quad (2.4)$$

$\langle i_{db}^2 \rangle$ est le bruit généré par le courant d'obscurité (Dark bulk current noise) I_{db} de l'APD. Il est donné par:

$$\langle i_{db}^2 \rangle = 2q \cdot I_{db} \cdot M^2 \cdot F(M) \cdot B \quad (2.5)$$

$\langle i_t^2 \rangle$ est le bruit thermique (Thermal noise). Il est exprimé par la relation suivante:

$$\langle i_t^2 \rangle = \frac{4k.T.B.F_a}{R_C} \quad (2.6)$$

Avec k : constante de Boltzmann, T : température de la résistance de charge de l'amplificateur TIA (K), R_C : résistance de charge de l'amplificateur TIA (Ω), F_a : facteur de bruit de l'amplificateur TIA.

Le courant à la sortie du détecteur est exprimé par :

$$\langle i_s^2 \rangle = (M. \mathfrak{R}. P_r)^2 \quad (2.7)$$

Le facteur d'excès de bruit $F(M)$ est en fonction du gain interne M de la photodiode à avalanche et s'exprime par :

$$F(M) = k_{eff}.M + (1 - k_{eff}) \left(2 - \frac{1}{M}\right) \cong M^x \quad (2.8)$$

k_{eff} est une constante spécifique au matériau qui compose la structure de la photodiode. Pour le silicium, elle est de 0,02. x est le coefficient de multiplication d'avalanche qui caractérise le matériau de la photodiode et qui varie de 0,2 à 0,5 pour le silicium [51].

L'équation (2.1) est réécrite par :

$$SNR = \frac{(M. \mathfrak{R}. P_r)^2}{(2.q.B.M^{x+2}).[(P_r + P_c + P_b). \mathfrak{R} + I_{db}] + \frac{4k.T.F_a.B}{R_C}} \quad (2.9)$$

La puissance incidente (P_r) collectée sur la surface active du détecteur est donnée par [3, 51] :

$$P_r = P_{out} \cdot \rho \frac{\pi.D_{opt}^2 \cdot \eta_{opt} \cdot \eta_{fi}}{4.R^2} \exp(-2.c.R) \quad (2.10)$$

P_c est la puissance du bruit de rétrodiffusion (clutter noise power) et qui est exprimée [5] :

$$P_c = \frac{E \pi D_{opt}^2 \beta(\pi) C' \eta_{opt} \eta_{fi}}{8 R^2} \exp(-2.c.R) \quad (2.11)$$

$\beta(\pi)$ est le coefficient de diffusion en volume (volume scattering coefficient). La valeur de ce coefficient est donnée à un angle de diffusion de 180° et dépend du type d'eau (eau claire, eau côtière et eau turbide) [39]. Les autres paramètres sont P_{out} : la puissance du laser, E : l'énergie du laser, c' : la vitesse de la lumière dans l'eau, η_{opt} : le rendement des optiques, η_{fi} : le rendement du filtre interférentiel, D_{opt} : le diamètre de l'objectif et R : la portée.

Les valeurs numériques des paramètres et constantes utilisés dans les équations (2.9), (2.10) et (2.11) sont définis dans le tableau 2.2. La puissance du bruit de fond (P_b) a été fixée pour des conditions où le bruit est le plus élevé. Ces conditions sont : soleil au zénith, ciel dégagé et un fond aquatique calme et clair. Les caractéristiques de la photodiode sélectionnée sont celles de l'APD AD800-11.

Tableau 2. 2 Valeurs numériques des différents paramètres et constantes pour le calcul du SNR.

Parameter	Value
Rendement des optiques η_{opt}	0,98
Rendement du filtre interférentiel η_{fi}	0,6
Largeur de bande du filtre interférentiel $\Delta\lambda$ (nm)	10
Diamètre de l'objectif D_{opt} (m)	0,05
Puissance laser P_{out} (MW)	0,215
Energie du laser (mJ)	4,3
Résistance de charge de l'ampli TIA R_C (k Ω)	10
Facteur de bruit de l'ampli TIA F_a	1,6
Sensibilité de l'APD \mathfrak{R} (A/W) pour M=100	33
Courant d'obscurité de l'APD I_{db} (nA)	5
Bande électronique B (MHz)	350
Facteur d'amplification de l'APD factor M	100
Réfectivité de l'objet ρ	0,1 – 0,9
Bruit de fond P_b (nW)	1,7
Coefficient de multiplication d'avalanche x	0,4
Température de la résistance de charge T (K)	293
Coefficient d'atténuation de l'eau c (m ⁻¹)	0,151 ; 0,398 ; 2,190
Coefficient de diffusion en volume $\beta(\pi)$ (m ⁻¹ sr ⁻¹)	5,019 $\times 10^{-4}$; 1,03 $\times 10^{-3}$; 5,686 $\times 10^{-3}$
Vitesse de la lumière dans l'eau c' (m/s)	2,25 $\times 10^8$
Constante de Boltzmann k (J/K)	1,38 $\times 10^{-23}$
Charge de l'électron q (C)	1,602 $\times 10^{-19}$

La Figure 2.14 représente l'évaluation du SNR, selon l'équation (2.9), en fonction de la portée pour les trois coefficients d'atténuation de 0,151; 0,398 et 2,19 m⁻¹ qui correspondent respectivement à une eau de mer claire, une eau de mer côtière et une eau turbide (Tableau 1.2 du chapitre 1). Les valeurs de la réflectivité de l'objet sont fixées à 0,1 (trait continu) et 0,9 (trait hachuré). Ces valeurs correspondent à un objet avec une haute réflectivité (0,9) et un autre objet avec une très faible réflectivité (0,1). Dans le cas d'une eau turbide, la portée maximale pouvant être atteinte avec une puissance laser de 215 kW est moins de 5 m. Pour une eau côtière, la portée maximale varie de 15 m à 18 m selon la réflectivité de l'objet. Et la portée maximale qui peut être atteinte, dans le cas d'une eau claire, est de 31 m à 42 m.

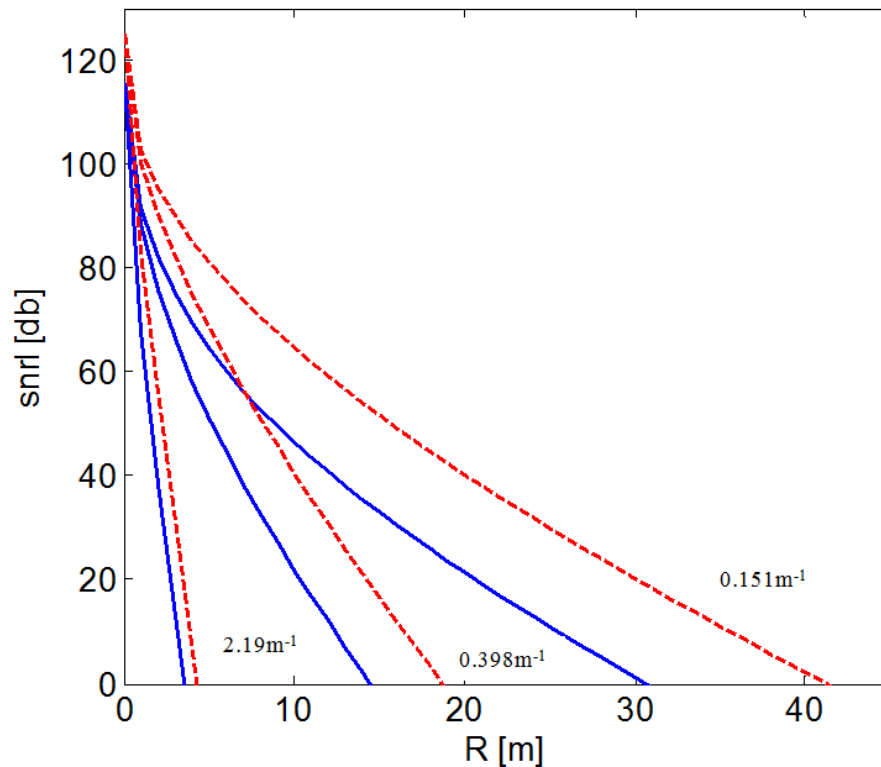


Figure 2. 14 : Evaluation du rapport SNR en fonction de la portée R pour $c = 0,151 ; 0,398 ; 2,190 \text{ m}^{-1}$, $\rho = 0,1$ (trait continu) – $0,9$ (trait hachuré) et $P_{out} = 0,215 \text{ MW}$.

2.5.2 Amélioration de la portée du télémètre

Une autre évaluation du rapport signal sur bruit a été faite pour une puissance laser plus élevée afin d'observer l'amélioration de la portée du télémètre. La puissance du laser a été augmentée de $0,2 \text{ MW}$ à 2 MW . Cette augmentation a démontré que ça n'aboutit pas systématiquement à une augmentation considérable de la portée maximale pouvant être atteinte par le télémètre laser surtout dans le cas d'une eau turbide comme représentée par le tableau 2.3. Cependant, pour une eau côtière, la portée peut être améliorée de 4 mètres. Pour une eau de mer claire, la portée peut être améliorée de 11 mètres. La multiplication par dix de la puissance laser ne résulte pas au même rapport de la portée.

Tableau 2. 3 Amélioration de la portée par augmentation de la puissance du laser.

$c \text{ (m}^{-1}\text{)}$	$R \text{ (m)}$	
	$P_{out} = 0,2 \text{ MW}$	$P_{out} = 2 \text{ MW}$
0,151	31 - 42	42 - 53
0,398	15 - 18	19 - 23
2,190	< 5	≈ 5

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre les différents étages du télémètre laser dédié pour des applications aquatiques ont été présentés. Parmi les sources laser présentées, le choix a été fait pour un laser Nd:YAG à Q-switch avec commutation passive et un cristal doubleur (KTP) pour générer la seconde harmonique du laser. Une sélection des composants optoélectroniques a été faite pour un système de détection capable de répondre à la longueur d'onde du laser de 532 nm. La photodiode à avalanche a été retenue comme étant le photodétecteur adéquat en association avec des amplificateurs opérationnels rapides en l'occurrence les AD8002 et AD8009. L'évaluation du rapport signal sur bruit SNR du télémètre laser aquatique a donné une idée sur les distances maximales que le dispositif peut atteindre pour les trois types d'eau (eau claire, eau côtière et eau turbide). Pour ce qui est de l'imagerie laser dans l'eau, le point commun avec la télémétrie est la source laser. En ce qui concerne la partie détection de l'imagerie laser, celle-ci est différente de celle du télémètre du fait qu'une caméra CCD est utilisée à la place d'une photodiode. Le chapitre suivant est consacré à la description de l'émetteur laser, à la présentation du dispositif expérimental, à la caractérisation de l'eau utilisée dans les expériences et à la description du logiciel de simulation d'optique ZEMAX.

Chapitre 3 :

Simulation
et expérimentation

Chapitre 3 : Simulation et expérimentation

3.1 Introduction

Dans ce chapitre sont décrites les conditions dans lesquelles sont effectuées les simulations et les expérimentations de télémétrie et d'imagerie laser aquatiques. Les expérimentations sont faites dans environnement aquatique qui a été reproduit au laboratoire. Plus de détails sont donnés sur la source laser Nd:YAG/Cr:YAG, sélectionnée parmi tant d'autres pour constituer l'émetteur du télémètre ou du dispositif d'imagerie. Le logiciel de simulation d'optique ZEMAX est utilisé pour le design du télescope de réception et l'observation de sa réponse en milieu marin sous différentes conditions de propagation de la lumière laser. Une évaluation expérimentale de l'eau de laboratoire est aussi faite. Cette évaluation est nécessaire afin de reproduire dans le logiciel de simulation optique les paramètres réels de propagation. Cette reproduction permet une comparaison des résultats de simulations avec ceux de l'expérimentation. Une description plus détaillée du circuit de détection, de la partie télémétrie, est présentée. Pour ce qui est de l'imagerie dans l'eau, le dispositif expérimental, la caméra CCD et l'algorithme de traitement d'images qui lui a été développée sont décrits.

3.2 Émetteur laser

Comme représenté sur la Figure 3.1, l'émetteur laser est constitué d'une source laser 532 nm et d'un télescope d'émission.

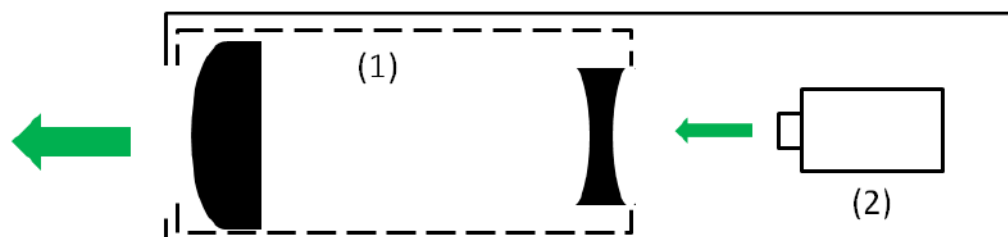


Figure 3. 1 : Emetteur laser constitué du télescope d'émission (1) et de la source laser (2).

3.2.1 Télescope d'émission

Comme le montre la Figure 3.2, le télescope d'émission est de type galiléen [52]. Il est constitué de deux lentilles L_1 et L_2 . La lentille L_1 est bi-concave d'un diamètre de 25 mm et d'une longueur focale f_1 de -25 mm. La lentille de sortie est plan-convexe d'un diamètre de 50 mm et d'une longueur focale f_2 de 75 mm. Le facteur de grossissement G de ce télescope est égal à 3. Cela est obtenu par le rapport des longueurs focales (équation (3.1)) des deux

lentilles. L'utilisation du télescope d'émission va augmenter le diamètre du faisceau de la source laser de D_1 à D_2 (équation (3.2)) et diminuer son angle de divergence de θ_1 à θ_2 (équation (3.3)). La distance entre les deux lentilles du télescope est égale à la différence des deux longueurs focales (équation (3.4)), c'est-à-dire 50 mm.

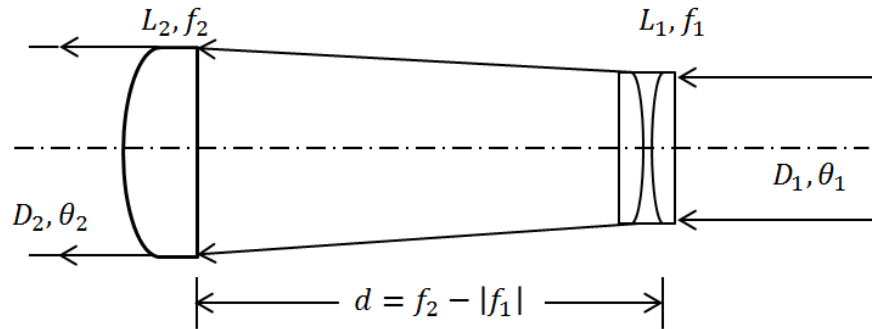


Figure 3. 2 : Télescope d'émission de type galiléen.

$$G = \frac{f_2}{|f_1|} \quad (3.1)$$

$$D_2 = G \cdot D_1 \quad (3.2)$$

$$\theta_2 = \frac{\theta_1}{G} \quad (3.3)$$

$$d = f_2 - |f_1| \quad (3.4)$$

3.2.2 Source laser

Comme rapporté dans la section 2.2 du chapitre 2, la source laser sélectionnée est une source Nd: YAG Q-switch à 532 nm. Le Q-switch est à commutation passive avec un absorbant saturable de type Cr :YAG. Cet absorbant, inséré dans la cavité laser, permet à la source laser de fournir des impulsions laser dont la durée est de l'ordre de la nanoseconde. L'utilisation d'un cristal doubleur (KTP) permet d'obtenir la seconde harmonique du laser (532 nm). La cavité de cette source laser est représentée par la Figure 3.3. Cette cavité de longueur (L) est formée d'un miroir de sortie M2 avec un rayon de courbure R2 et d'un miroir de fond M1 ayant un rayon de courbure Rc. Le faisceau laser à la sortie possède un diamètre D_1 avec un angle de divergence θ_1 . Le barreau laser Nd:YAG, de 6 mm de diamètre et 60 mm de long,

est pompé par une lampe flash à xénon de 4 mm de diamètre et 60 mm de long. L'absorbant saturable est de 6 mm de long et 8 mm de diamètre. Le cristal doubleur utilisé est de forme cubique de dimension 5 x 5 x 5 mm.

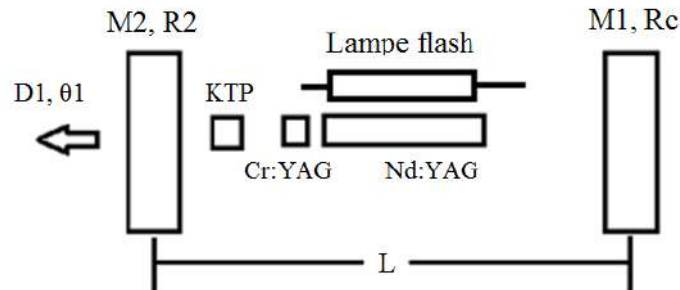


Figure 3. 3 : Source laser Nd :YAG/Cr :YAG.

L'alimentation de la lampe flash est donnée par la Figure 3.4. Ce circuit inclut : un circuit trigger pour l'ionisation initiale du gaz dans le tube par l'application d'une haute tension de 15 à 20 kV, un circuit de maintien (simmer circuit) de l'ionisation du gaz entre deux décharges du condensateur de stockage (C). La décharge de ce dernier dans la lampe est assurée par interrupteur à semi-conducteur (thyristor) à travers une bobine de mise en forme de l'impulsion du courant flash. La fréquence de répétition du laser est de 1 Hz. La durée de l'impulsion du courant de la lampe a été fixée à 100 μ s pour une énergie de pompage variable. Cette énergie varie de 9 J à 55 J par l'augmentation de la tension de charge du condensateur C.

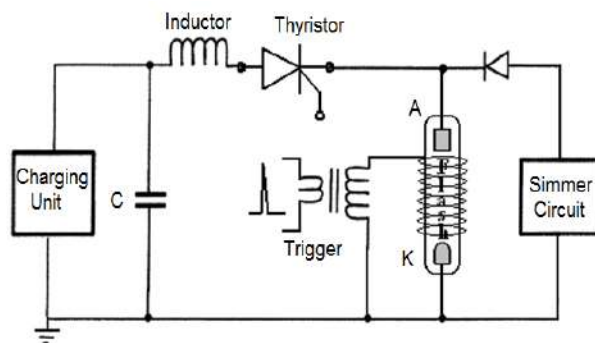


Figure 3. 4 : Circuit électronique de la lampe flash.

Les formes du courant de la lampe (Ch 2) et de l'impulsion laser (Ch 1) en mode relaxé (sans absorbant saturable dans la cavité) sont illustrées par la Figure 3.5. La durée du courant flash, à mi-hauteur, coïncide avec la valeur de 100 μ s et son amplitude maximale est de 525 A. L'impulsion laser qui correspond à ce courant a une durée d'environ 80 μ s.

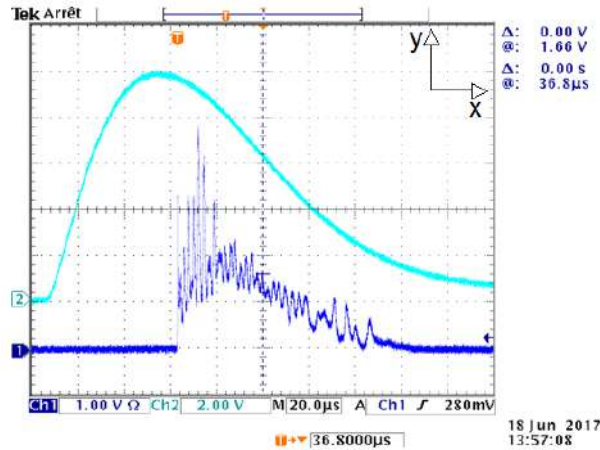


Figure 3. 5 : Forme du courant flash (Ch 2 : 2 V/div.) et de l’impulsion laser en mode relaxé (Ch 1 : 1 V/div.), (axe X : base de temps 20 μs/div.).

Afin de sélectionner la cavité laser adéquate, en termes d’énergie et de longueur, pouvant être intégrée dans le télémètre laser, deux types de cavités ont été étudiées. Les cavités plan-plan et plan-concave ont fait l’objet d’expérimentations approfondies. Pour chaque type de cavité, trois longueurs ($L = 18,5$ cm, 24 cm et 39,5 cm) ont été étudiées [53] et cela pour différents rayons de courbure ($R_c = 1$ m, 2 m, 3 m et plan) du miroir de fond M1 et un miroir de sortie M2 plan ($R_2 = \text{infini}$) avec différentes réflectivités ($R = 50\%$, 60%, 70%, 80%, 85% et 90%). Le miroir M1 est revêtu d’un dépôt d’une haute réflectivité à 1064 nm (99%). Comme représentée sur la Figure 3.6, l’énergie laser est mesurée par un Joule-mètre ED200 (Gentec Electro-Optics Inc.). Ce dernier est connecté à un oscilloscope numérique dont la référence est TDS3052 (Tektronix Inc.). L’impulsion laser a été collectée par une photodiode PIN (BPX65) dont le temps de montée est de 2 ns. Les énergies laser obtenues pour les trois longueurs de cavité avec les différents miroirs de sortie et de fond sont représentées par les Figures 3.8, 3.9 et 3.10 pour une énergie de pompage de 20 J. Il est à préciser que ces énergies sont obtenues pour une longueur d’onde de 1064 nm. C’est-à-dire sans l’insertion dans la cavité du cristal doubleur. La cavité de 18,5 cm de long, avec un miroir de fond ayant un rayon de courbure de 3 m et un miroir de sortie d’une réflectivité de 50%, a donné les meilleures performances avec une énergie laser maximale de 28,4 mJ. L’énergie laser en sortie en fonction de l’énergie de pompage, pour la cavité de 18,5 cm de long, est représentée par la Figure 3.7 pour les modes de fonctionnement du laser en relaxé et en Q-switch. Les énergies maximales obtenues pour les deux modes (relaxé et Q-switch) sont respectivement de 604 mJ et 246 mJ. Des durées d’impulsion laser variant de 20 à 40 ns ont été obtenues comme observées sur les formes temporelles des impulsions laser données par la Figure 3.11. Il est à préciser qu’après le rajout du cristal KTP dans cette cavité laser, un filtre interférentiel est placé à sa sortie.

Ce filtre permet d'éliminer la longueur d'onde 1064 nm et cela afin de faire des expériences qu'avec une source à la longueur d'onde de 532 nm.

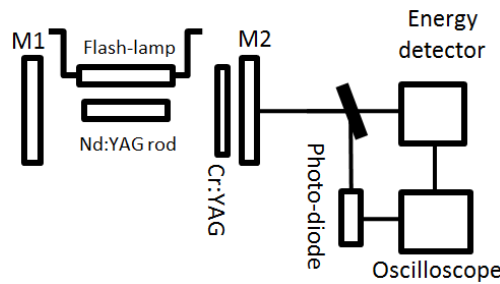


Figure 3. 6 : Dispositif expérimental pour la mesure de l'énergie laser.

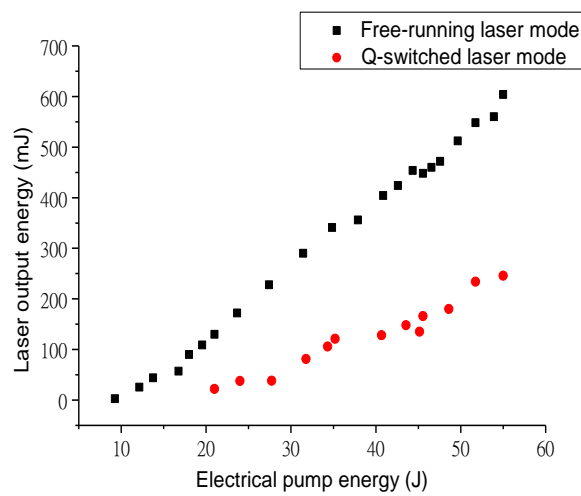


Figure 3. 7 : Energie laser, en mode relaxé et Q-switch, fonction de l'énergie de pompage pour une longueur de cavité $L = 18,5$ cm avec $R = 50\%$ et $R_c = 3$ m.

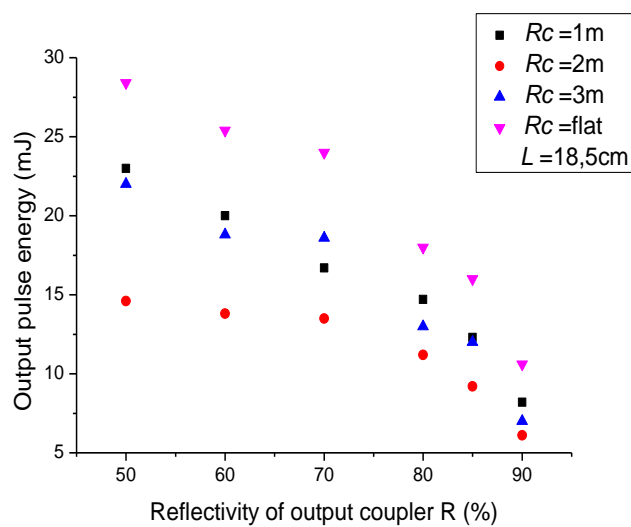


Figure 3. 8 : Energie laser en fonction de la réflectivité du miroir de sortie (M2) et différents rayons de courbure (R_c) du miroir de fond (M1) pour la cavité de 18,5 cm de long.

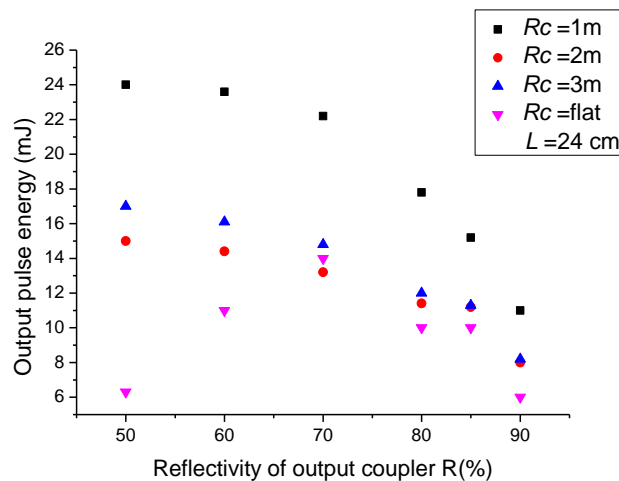


Figure 3. 9 : Energie laser en fonction de la réflectivité du miroir de sortie (M2) et différents rayons de courbure (Rc) du miroir de fond (M1) pour la cavité de 24 cm de long.

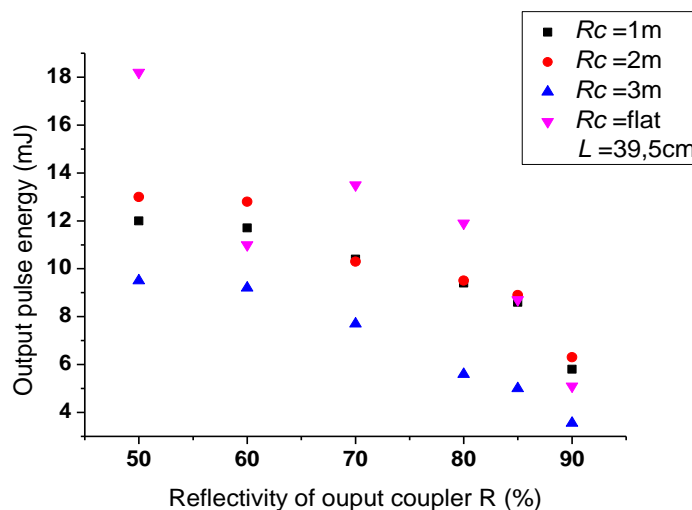


Figure 3. 10 : Energie laser en fonction de la réflectivité du miroir de sortie (M2) et différents rayons de courbure (Rc) du miroir de fond (M1) pour la cavité de 39,5 cm de long.

L'énergie laser mesurée, après le rajout à la sortie de la cavité laser du filtre interférentiel, est de 4,3 mJ à 532 nm avec une durée d'impulsion de 20 ns (une puissance crête de 215 kW) et une fréquence de répétition de 1 Hz. Ce sont ces caractéristiques qui seront prises en considération dans la simulation et les expérimentations.

Les profils spatiaux 2D et 3D de cette source laser sont représentés par la Figure 3.12. La source laser présente un profil gaussien qui représente le mode fondamental du laser TEM₀₀. Ces profils ont été visualisés par la mise au point d'un dispositif expérimental dans le cadre de cette thèse. Ce dispositif sera présenté avec plus de détails à la fin de ce chapitre.

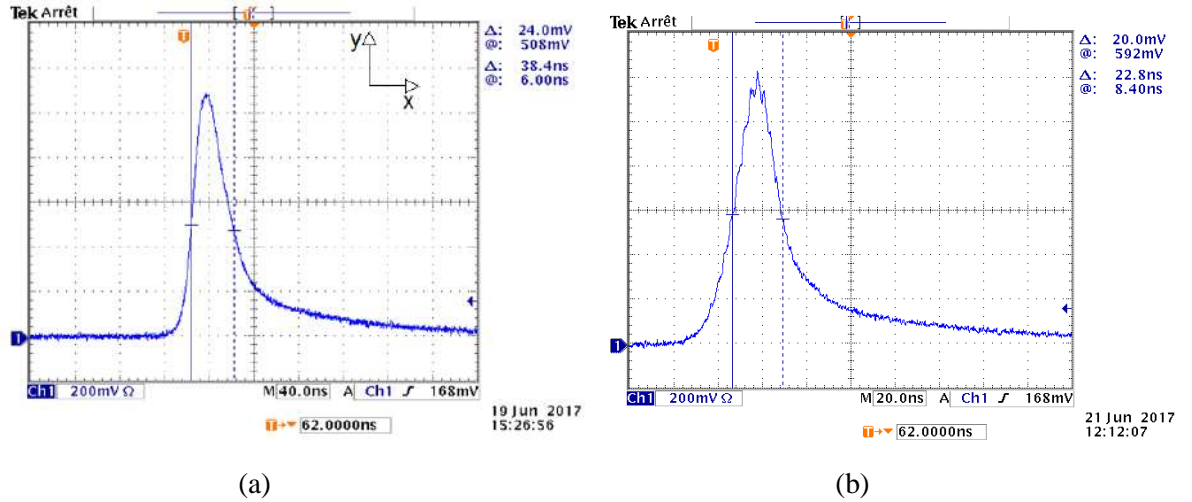


Figure 3. 11 : Profils temporels des impulsions laser Q-switch de durées de 38 ns (a) et 22,8 ns (b).

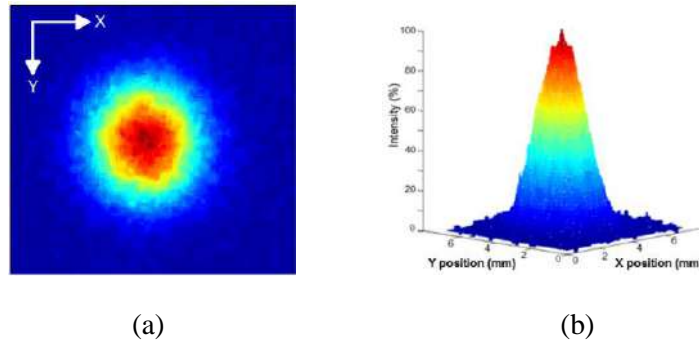


Figure 3. 12 : Profils 2D (a) et 3D (b) du faisceau laser de la source Nd:YAG Q-switch.

Pour déterminer le diamètre du spot de la source laser en sortie, les équations de la cavité plan-concave sont utilisées [45]. Le diamètre D_1 de la source laser est déterminé par l'équation (3.5) où M^2 est le facteur de qualité de la source laser et w_0 est son rayon (beam waist) à la sortie de la cavité (miroir M2). Le facteur de qualité M^2 est supposé être égal à 1,5. Pour la cavité laser avec une longueur de 18,5 cm et un rayon de courbure de 3 m du miroir de fond (M1), le w_0 est donné par la relation (3.6) à la longueur d'onde 532 nm. L'angle de divergence de son faisceau est donné par l'équation (3.7). Les valeurs obtenues sont $w_0 = 349 \mu\text{m}$ et $\theta = 1,45 \text{ mrad}$. Donc le diamètre du faisceau laser dans ce cas est $D_1 = 1,047\text{mm}$.

$$D_1 = 2 \cdot M^2 \cdot w_0 \tag{3.5}$$

$$w_0^2 = \left(\frac{\lambda}{\pi}\right) [L(R_c - L)]^{1/2} \tag{3.6}$$

$$\theta_1 = 2.M^2 \frac{\lambda}{\pi w_0} \quad (3.7)$$

L'association de la source laser Nd:YAG avec le télescope, présenté dans la section précédente, donnera un nouveau diamètre de faisceau et un nouvel angle de divergence comme illustré par la Figure 3.13. Ces nouveaux paramètres sont déterminés par les équations (3.2) et (3.3). Le diamètre du faisceau laser à la sortie du télescope d'émission est $D_2 = 3,141 \text{ mm}$ et son angle de divergence est $\theta_2 = 483 \mu\text{rad}$. Afin d'observer l'effet du rajout d'un télescope d'émission sur une longue distance, les équations (3.8) et (3.9) permettent de ressortir le diamètre du spot laser pour une distance de propagation comme cela est illustré par les courbes de la Figure 3.14. Le diamètre de la source laser pour une distance z est égal à 2 fois le rayon $w(z)$. Il est à noter que dans l'équation (3.8), le w_0 correspond au rayon à la sortie du télescope et non pas à celui donné par l'équation (3.6). Ces courbes démontrent que l'utilisation d'un télescope d'émission à la sortie de la source laser diminue considérablement le diamètre du faisceau laser pour une longue distance de propagation. Cela est le résultat de la diminution de la divergence du faisceau.

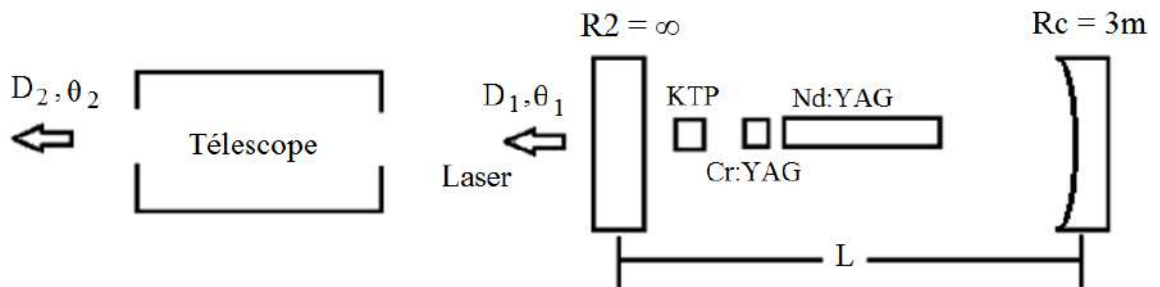


Figure 3. 13 : Association de la source laser et du télescope d'émission.

$$w(z) = w_0 \left[1 + \left(\frac{z}{Z_R} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.8)$$

Avec :

$$Z_R = \frac{\pi \cdot w_0^2}{\lambda \cdot M^2} \quad (3.9)$$

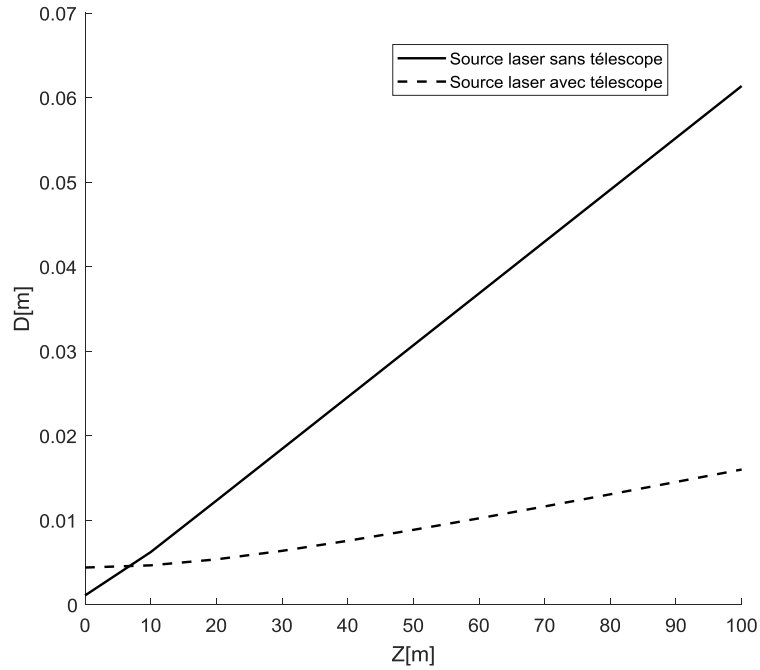


Figure 3. 14 : Elargissement du faisceau laser en fonction de la longueur de propagation.

Une photographie de la source laser Nd :YAG/Cr :YAG utilisée est donnée par la Figure 3.15. Les éléments qui sont observés sur cette photographie sont le miroir de fond (M1), l'absorbant saturable Cr :YAG, la tête laser renfermant le barreau laser Nd :YAG et la lampe flash, le miroir de sortie (M2) et le cristal doubleur KTP. Ce dernier peut être placé à l'intérieur ou à l'extérieur de la cavité.

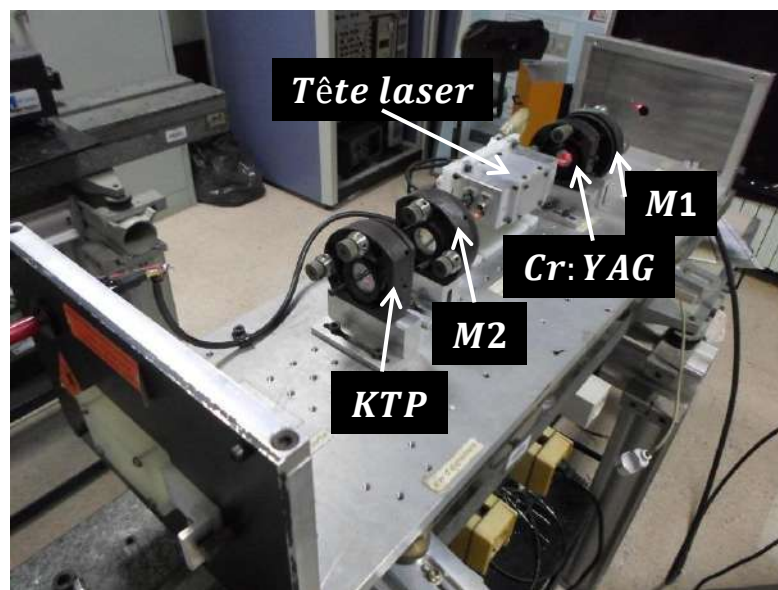


Figure 3. 15 : Photographie de la cavité laser.

3.3 Caractérisation de l'eau utilisée et dispositif expérimental

Le milieu aquatique est reproduit expérimentalement au niveau du laboratoire par l'utilisation d'un tube à eau de 1,2 m de long et de 20 cm de diamètre avec une fenêtre, en verre, fixée sur un côté. Pour reproduire un environnement aquatique avec différents types d'eau, plus au moins similaires à ceux du tableau 1.2, le tube a été rempli d'eau de robinet et par la suite des quantités de sable ont été rajoutées afin d'augmenter le coefficient d'atténuation du milieu. Le montage expérimental utilisé pour déterminer le coefficient d'atténuation de cette eau est présenté dans la section suivante. Par la suite, le dispositif expérimental, utilisé pour observer la transmission du faisceau laser dans ces types d'eau, est décrit dans la section 3.3.2.

3.3.1 Détermination du coefficient d'atténuation de l'eau

Le dispositif expérimental, utilisé pour déterminer le coefficient d'atténuation de l'eau utilisée dans les expérimentations, est représenté par la Figure 3.16. Ce dispositif est constitué du tube à eau de 1,2 m de long et de 20 cm de diamètre, de la source laser Nd :YAG doublée à Q-switch (532 nm), du télescope de réception et de deux photodiodes PIN (PIN₁ et PIN₂). Les deux photodiodes sont connectées à l'oscilloscope Tektronix. La photodiode PIN₁ enregistre l'amplitude (A_{out}) de l'impulsion laser à la sortie du laser et la photodiode PIN₂ enregistre l'amplitude (A_{in}) du signal rétrodiffusé de l'objet (cube en téflon) placé à l'extrémité du tube. Une relation qui donne le coefficient d'atténuation $c(\lambda)$ de l'eau a été déterminée à partir du trajet parcouru (Figure 3.16) par le faisceau laser de l'émission jusqu'à sa réflexion sur la photodiode PIN₂. Afin d'obtenir des coefficients avec la plus grande exactitude possible, les pertes dues aux optiques du télescope (les trois lentilles et le filtre interférentiel à 532 nm) n'ont pas été négligées comme représenté sur la Figure 3.17. Ces pertes, ou réflexions des optiques, sont fonctions des indices de réfraction de l'air (n_a), du verre (n_v) qui constitue la fenêtre du tube et de l'eau (n_e).

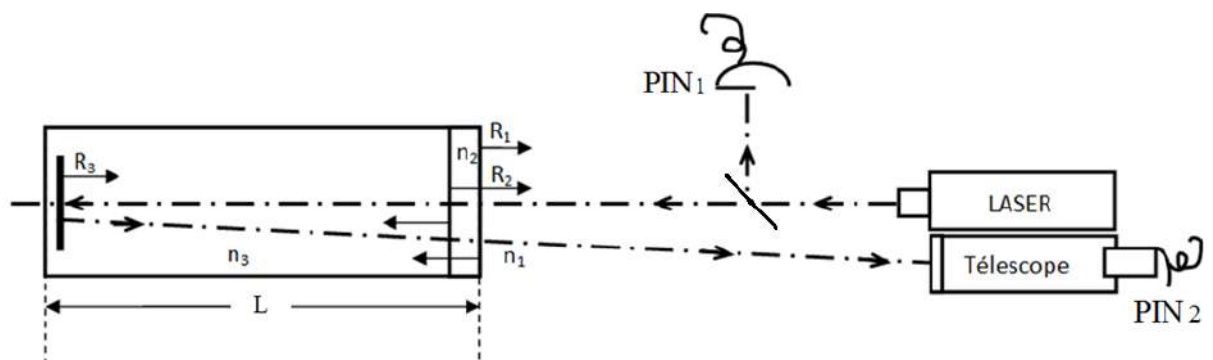


Figure 3. 16 : Dispositif expérimental pour la détermination du coefficient d'atténuation de l'eau.

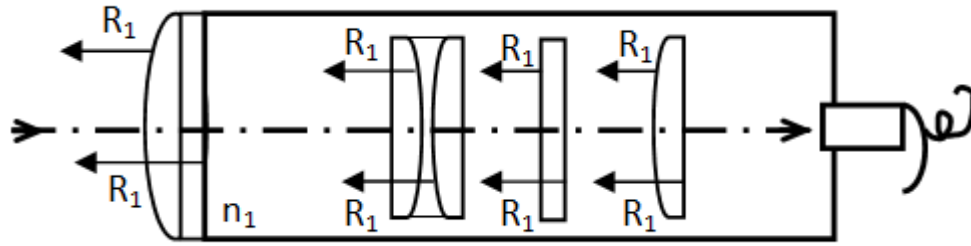


Figure 3. 17 : Vue élargie du télescope de réception et les différentes réflexions de ses optiques.

La relation finale, pour la détermination du coefficient d'atténuation de l'eau utilisée à la longueur d'onde du laser (532 nm), est donnée par :

$$c(\lambda) = \frac{1}{2L} \text{Ln} \left[(1 - R_1)^{10} \cdot (1 - R_2)^2 \cdot R_3 \cdot \frac{A_{out}}{A_{in}} \right] \quad (3.10)$$

Avec A_{out} : amplitude de l'impulsion laser émise et enregistrée sur l'oscilloscope.

A_{in} : amplitude de l'impulsion laser rétrodiffusée de l'objet et enregistrée sur l'oscilloscope.

R_1 : réflectivité des optiques qui correspond à l'interface air-verre. Cette réflectivité est donnée par :

$$R_1 = \left(\frac{n_v - n_a}{n_v + n_a} \right)^2 \quad (3.11)$$

R_2 : réflectivité des optiques qui correspond à l'interface eau-verre. Cette réflectivité est donnée par :

$$R_2 = \left(\frac{n_e - n_2}{n_e + n_2} \right)^2 \quad (3.12)$$

R_3 : réflectivité de l'objet en téflon et dont la valeur numérique est de 99 %.

Pour les indices de réfraction de $n_a = 1$, $n_v = 1,55$ et $n_e = 1,33$; les réflectivités sont de $R_1 = 4,6 \%$ et $R_2 = 0,58 \%$.

Les coefficients d'atténuation de trois types d'eau ont été mesurés par l'utilisation du montage expérimental présenté par la Figure 3.16 et de l'équation (3.10). Ces types d'eau sont une eau du robinet (W1), une eau du robinet plus 250 g de sable (W2) et une eau du robinet plus 350 g de sable (W3). Les coefficients d'atténuation de ces trois types d'eaux sont donnés par le tableau (3.1) selon les amplitudes des intensités laser reçues pour chaque eau. L'eau du robinet (W1) présente un coefficient d'atténuation de $0,130 \text{ m}^{-1}$, ce qui correspond

approximativement au coefficient d'atténuation d'une eau de mer claire (Tableau 1.2). Pour l'eau W2, le coefficient d'atténuation est de $0,343 \text{ m}^{-1}$ qui est proche de celui d'une eau côtière ($0,348 \text{ m}^{-1}$) selon Sverdrup et al. [33] (Tableau 1.3) à la longueur d'onde de 530 nm. Et enfin, le coefficient d'atténuation de l'eau W3 est de $0,580 \text{ m}^{-1}$. Ce dernier coefficient correspond probablement à la plus faible eau trouble du fait qu'aucune valeur similaire n'a été rapportée pour les eaux côtières à 532 nm.

L'utilisation d'un microscope électronique à balayage (SEM Jeol JSM 6360LV) a permis de définir la taille des grains du sable utilisé avec l'eau. Les images des grains sont données par la Figure 3.18. La taille des grains varient de 50 à 400 μm . La détermination de la taille des grains peut donner une idée sur le type de diffusion qui pourrait avoir lieu dans l'eau lors de la propagation du faisceau laser.

Tableau 3. 1 Coefficients d'atténuation des trois types d'eau mesurés à $\lambda = 532 \text{ nm}$.

A_{out} (mV)	A_{in} (mV)	Eau	Type	c (m^{-1})
111,4	50	W1	Eau du robinet	0,130
111,4	30	W2	W1 + 250g de sable	0,343
111,4	17	W3	W1 + 350g de sable	0,580

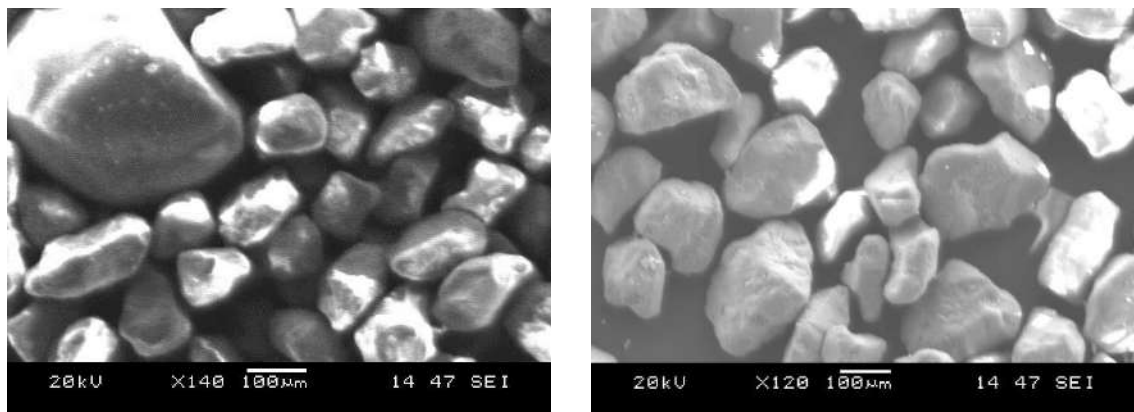


Figure 3. 18 : Photos des grains de sable sous microscope à balayage électronique.

Comme le démontre le tableau 3.2, le type de diffusion est en rapport avec la longueur d'onde du laser λ et les tailles de particules se trouvant dans le milieu de propagation. Pour des particules dont le diamètre est très petit à la longueur d'onde ($\ll \lambda$), la diffusion qui peut avoir lieu dans l'eau est de type Rayleigh. Pour des particules avec un diamètre égal à la longueur d'onde ($\approx \lambda$), la diffusion est de type Mie. Et pour des particules dont le diamètre est très grand par rapport à la longueur d'onde ($\gg \lambda$), la diffusion est de type non-sélective.

Ce dernier type de diffusion coïncide avec les tailles des grains de sable représentés par la Figure 3.18.

Tableau 3. 2 Type de diffusion selon la longueur d'onde et la tailles des particules.

Type de diffusion	Taille des particules
Diffusion Rayleigh	$\ll \lambda$
Diffusion Mie	$\approx \lambda$
Diffusion non-sélective	$\gg \lambda$

Il est à noter que dans une eau, il peut y avoir les trois diffusions à la fois. Cela dépend des tailles de particules qui peuvent se trouver dans cette eau.

3.3.2 Dispositif expérimental

Les détails du montage expérimental sont illustrés dans la Figure 3.19. La source laser Nd:YAG/Cr:YAG, située à 5 m, est orientée vers le tube rempli d'eau. La face avant du tube est munie d'une fenêtre en verre pour permettre au faisceau laser de traverser le tube. Un objet est immergé dans le tube d'eau à travers un trou d'environ 12 cm de diamètre. Cet objet est un cube en téflon pur (PTFE) avec les dimensions de 70 x 70 x 70 mm et dont le coefficient de réflexion est de 99 % pour une gamme spectrale allant de 250 à 2500 nm [54]. Une photodiode PIN collecte l'impulsion laser émise à travers une lame placée à la sortie du laser et inclinée de 45°. Le télescope de réception est adjacent à la source laser afin de collecter l'impulsion laser rétrodiffusée de l'objet par l'intermédiaire d'une autre photodiode placée à sa sortie et connectée à l'oscilloscope. Le télescope de réception a été réalisé et simulé avec le logiciel ZEMAX. Une photographie du dispositif expérimental est donnée par la Figure 3.20.

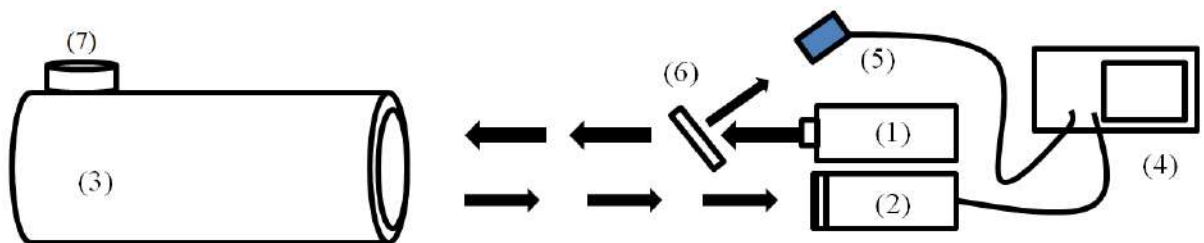


Figure 3. 19 : Dispositif expérimental : (1) laser Nd:YAG/Cr:YAG, (2) télescope, (3) tube d'eau, (4) oscilloscope, (5) photodiode PIN, (6) lame, (7) trou.

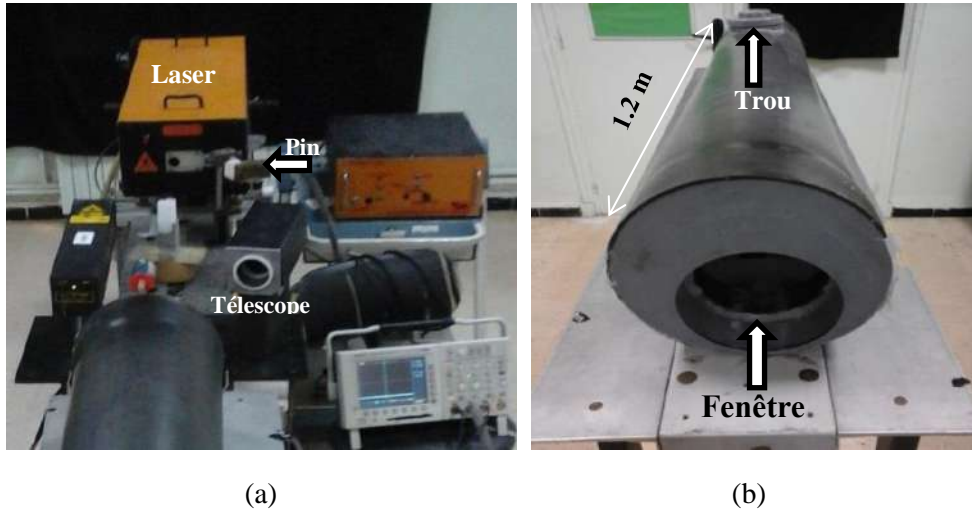


Figure 3. 20 : Photo du dispositif expérimental (a) et du tube d'eau utilisé (b).

3.4 Conception et simulation du télescope de réception

Le logiciel ZEMAX est l'outil qui sera utilisé pour le design du télescope de réception et sa simulation dans un environnement aquatique afin d'observer sa réponse.

3.4.1 Présentation du logiciel de simulation d'optique ZEMAX

Le logiciel ZEMAX est un logiciel de simulation et d'analyse optiques [55, 56]. L'utilisateur peut faire le design et la simulation d'un simple system tel qu'un système de mise en forme de faisceau laser [57] ou un télescope [58]. Il peut aussi être utilisé dans des simulations de systèmes optiques plus complexes tel que l'œil humain [59]. Ce simulateur comprend deux parties : la partie séquentielle (Sequential mode part) et la partie non-séquentielle NSC (Non-Sequential mode part) [60]. Dans sa première partie, l'utilisateur peut faire le design du modèle souhaité par l'utilisation des composants optiques disponibles dans sa bibliothèque tels que les lentilles, les optiques, les sources et les détecteurs. Une fois, le design du système est terminé, il sera transféré vers la partie NSC afin d'observer sa réponse dans le milieu de propagation approprié. Il est possible d'observer dans la partie NSC l'effet de plusieurs types de diffusions telles que les diffusions de Rayleigh, de Mie et de Henyey-Greenstein. Cela est envisageable par l'introduction de la longueur d'onde, la transmission du milieu, l'angle de diffusion, le coefficient de diffusion (Mean Path), la taille des particules et l'indice de réfraction dans le cas de la diffusion Mie [55]. Mais cela dépend de la version utilisée. À titre d'exemple la version 2015 possède toutes les diffusions citées, mais la version 2009 du logiciel n'inclut pas la diffusion de Mie.

Ce simulateur a été utilisé dans le cadre de cette thèse pour faire le design et la simulation du télescope de réception en reproduisant des conditions similaires à celles du dispositif expérimental et du milieu aquatique.

3.4.2 Conception du télescope de réception

Comme rapporté dans la section précédente, le design du télescope de réception est fait dans la partie séquentielle de ZEMAX [60]. Ce télescope est de type galiléen comme représenté sur la Figure 3.21(a). Il est constitué d'un objectif, d'une lentille divergente et d'une lentille de focalisation. L'objectif est une lentille plan-convexe avec un diamètre de 50 mm et une longueur focale de 100 mm. La lentille divergente est de type bi-concave de 45 mm diamètre et d'une longueur focale de -50 mm. La lentille de focalisation est de type plan-convexe d'un diamètre de 25 mm et d'une longueur focale de 35 mm. Ces trois lentilles sont traitées antireflet (AR) dans le visible (400 - 700 nm) et leur matériau est le N-BK7 (verre borosilicate crown). La lumière laser, réfléchie sur l'objectif du télescope, est focalisée sur la surface active du détecteur dont le diamètre est de 800 μm comme illustré par la Figure 3.21(b). Sur cette fenêtre du simulateur, les rayons de la lumière laser sont focalisés à l'intérieur de la surface active de la photodiode. Cela est aussi observé sur la Figure 3.22 qui représente le profil en 3 dimensions (3D) du télescope.

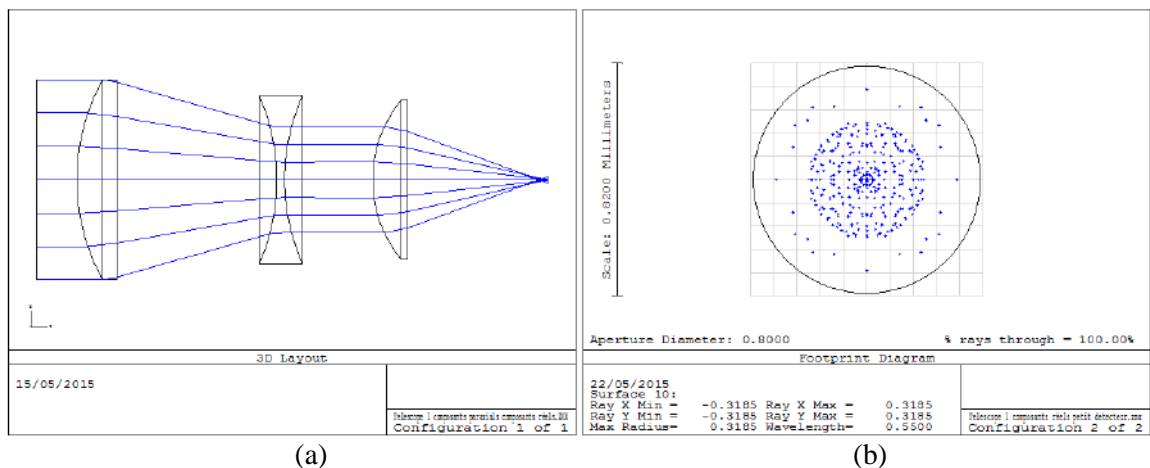


Figure 3. 21: Télescope (a) conçu sous ZEMAX et la fenêtre du photodétecteur (b).

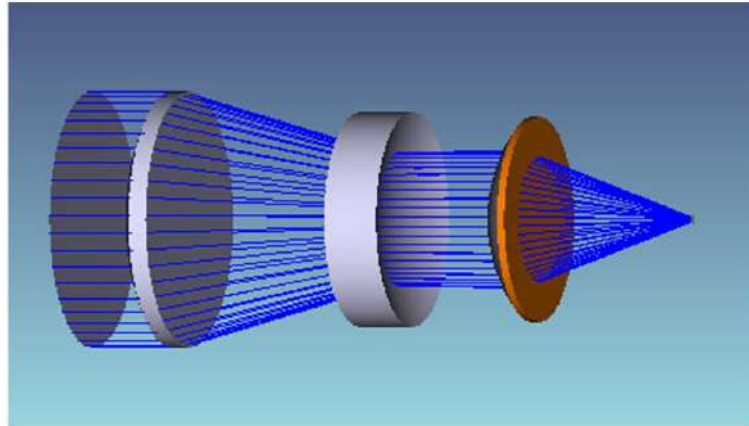


Figure 3. 22 : Profil 3D du télescope de réception.

Dans la partie suivante, sont donnés les conditions et les paramètres fixés pour simuler la réponse du télescope en milieu aquatique.

3.4.3 Simulation du télescope de réception

Pour observer l'effet de l'atténuation de l'eau sur la puissance laser rétrodiffusée, le modèle du télescope réalisé est translaté vers la partie Non-Séquentielle (NSC) de ZEMAX [55]. Par similarité aux conditions expérimentales, le milieu aquatique est reproduit exactement dans un tube de 1,2 m de long et de 20 cm de diamètre [61]. Le télescope est placé 5 m loin du tube à eau comme représenté par la Figure 3.23. Pour chaque type d'eau tel que présenté dans le tableau 3.1, le coefficient d'atténuation approprié est considéré pour déterminer la puissance laser au niveau de l'objet. Cette évaluation est nécessaire du fait que le simulateur considère l'emplacement de l'objet au fond du tube comme étant la source laser qui émet vers le télescope. En considérant le coefficient d'atténuation de l'eau pour un seul trajet du faisceau laser à travers chaque type d'eau, la puissance laser qui sera réfléchiée par l'objet vers le télescope peut être évaluée par l'équation (1.5). Les paramètres utilisés dans la simulation sont donnés par le tableau 3.3. Ces éléments qui constituent le télescope (les trois lentilles), le milieu de propagation, la source laser et le détecteur sont introduits dans l'éditeur non-séquentiel de ZEMAX tels que représentés par la Figure 3.24.

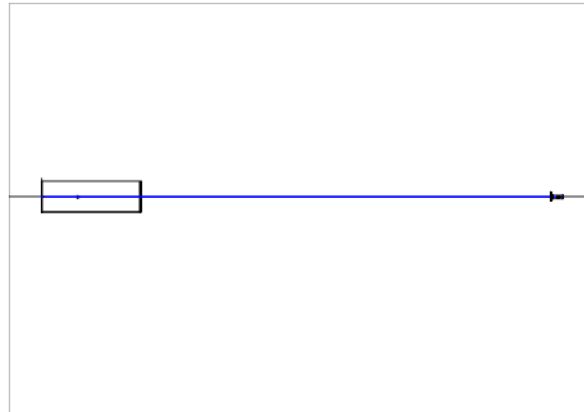


Figure 3. 23 : Fenêtre de simulation représentant la disposition du télescope (à droite) et le réservoir à eau (à gauche).

Object Type	Comment	Ref Object	Inside Of	X Position	Y Position	Z Position	Tilt About X	Tilt About Y	Tilt About Z
1 Null Object	Dist to target	0	0	0.000	0.000	6200.000	0.000	0.000	0.000
2 Standard ..	laboratory	0	0	0.000	0.000	-7000.000	0.000	0.000	0.000
3 Standard ..	Outside box	0	0	0.000	0.000	-5000.000	0.000	180.000	0.000
4 Standard ..	water	0	0	0.000	0.000	-5000.000	0.000	180.000	0.000
5 Standard ..	Box	0	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
6 Source Ga ..	Source	0	4	0.000	0.000	-6200.000	0.000	0.000	0.000
7 Standard ..	Window	5	5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8 Standard ..	Objective	7	5	0.000	0.000	20.000	0.000	0.000	0.000
9 Standard ..	Collim Lens	8	5	0.000	0.000	60.000	0.000	0.000	0.000
10 Standard ..	Foc Lens	9	5	0.000	0.000	23.000	0.000	0.000	0.000
11 Annular V ..		0	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
12 Detector ..		10	5	0.000	0.000	38.100	0.000	0.000	0.000

Figure 3. 24 : Fenêtre de ZEMAX pour l'introduction des différents éléments de la simulation.

Par la suite, une deuxième simulation est faite pour une longueur de propagation de 20 m et où sont considérés les types d'eau présentés dans le tableau 1.2 (Eau de mer claire, eau de mer côtière et eau turbide). Le but de cette deuxième simulation, c'est de démontrer l'effet de l'atténuation de l'eau sur la lumière laser dans un milieu de propagation plus long. Les résultats pour chaque simulation sont donnés dans le chapitre suivant de cette thèse.

Tableau 3. 3 Valeurs numériques des paramètres introduits dans la simulation.

Paramètre	Valeur
Longueur d'onde du laser (nm)	532
Puissance du laser P_{out} (W)	$2,15 \times 10^5$
Puissance laser estimée à l'objet ($\times 10^5$ W)	1,83 ; 1,42 ; 1,07
Coefficient d'atténuation de l'eau (m^{-1})	0,130 ; 0,343 ; 0,580
Estimation du diamètre du spot laser à l'objet (mm)	4,36
Diamètre de l'objectif du télescope D_{opt} (m)	0,05
Distance entre l'objet et le télescope (m)	5 (air) + 1,2 (tube d'eau)
Diamètre de la surface active du détecteur (μm)	800
Température de l'eau ($^{\circ}C$)	20

3.5 Simulation et expérimentation du système de détection

Le système de détection tel que décrit dans le chapitre 2 de cette thèse, est représenté avec plus de détails dans la Figure 3.25. Une partie de l'impulsion laser émise est réfléchiée sur la zone active de la photodiode PIN pour fournir le signal START à l'étage de comptage. Le photocourant obtenu à partir de la photodiode PIN (BPX65) est converti en tension par un transistor rapide Q1 (BFR90). Le circuit dérivateur RC (R4, C4) délivre un signal où le point de passage par zéro représente le déclenchement du début de mesure du temps. Ce point correspond au sommet du signal d'entrée. Le signal START est obtenu à la sortie du circuit amplificateur rapide (AD8009 ou AD8002). Pour l'impulsion laser de retour, le photocourant délivré par l'APD est appliqué à l'entrée de l'amplificateur trans-impédance TIA (pré-amplification). Un autre étage d'amplification est appliqué (post-amplification) en utilisant le même amplificateur rapide. La sortie de ce dernier amplificateur est suivie du circuit discriminateur et à sa sortie l'impulsion STOP, qui met fin au comptage, est obtenue. Le circuit de mesure d'intervalle de temps comprend une porte XOR et une bascule de type D. Le signal de sortie de cette porte correspond à l'intervalle de temps aller-retour (Δt) de l'impulsion laser émise et l'impulsion laser rétrodiffusée par l'objet dans l'eau.

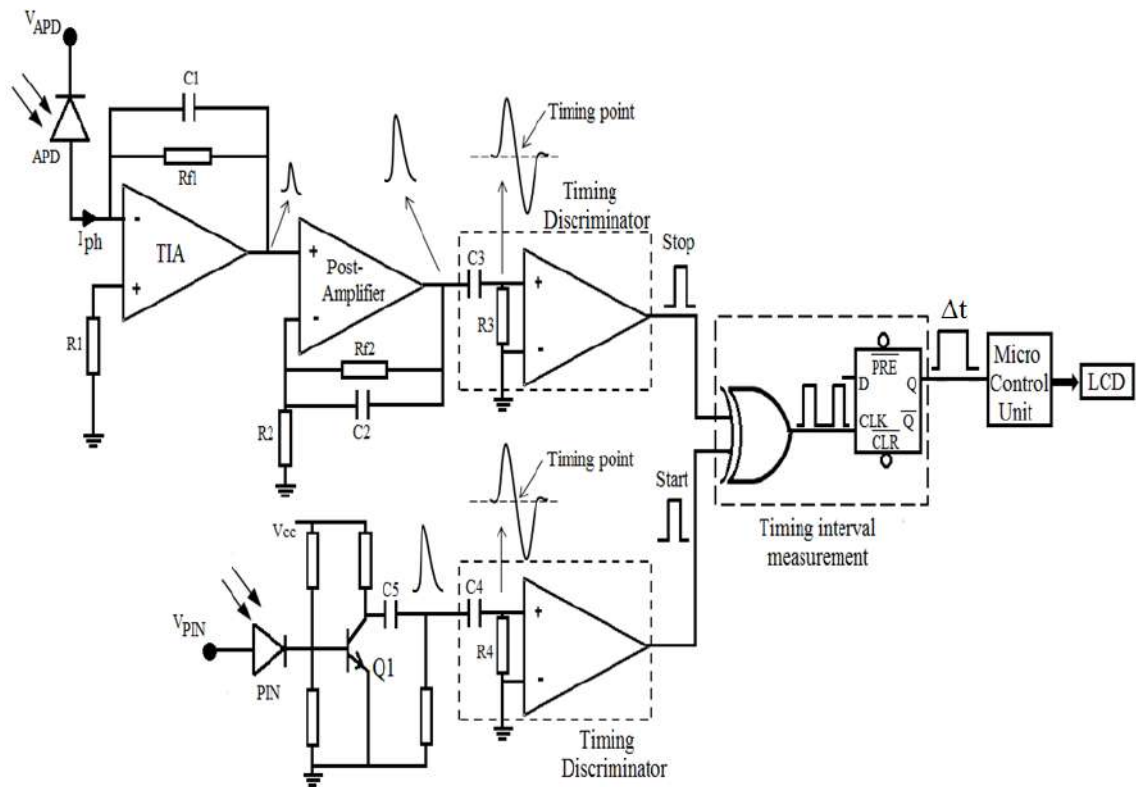


Figure 3. 25 : Schéma détaillé du circuit de détection de l'impulsion laser émise et rétrodiffusée.

3.6 Montage pour la visualisation des profils 2D et 3D du spot laser

Dans le but de visualiser le profil spatial de la source laser et en raison de la non-disponibilité d'un analyseur de faisceau, une solution a été trouvée pour déterminer les profils 2D et 3D. Cela a été possible par l'utilisation du télescope de réception réalisé et de la caméra CCD utilisée en imagerie. Le dispositif expérimental est presque le même que celui de la Figure 3.19. La seule différence est le remplacement de la photodiode PIN par la caméra. Le dispositif expérimental est donné par la Figure 3.26. La caméra est placée en position 1 et à la sortie du laser, une lame en verre, est positionnée afin de réfléchir une partie de l'impulsion laser émise sur le capteur de la caméra. Un papier transparent est placé entre la caméra et la lame pour éviter sa saturation et l'endommagement de son capteur CCD. La caméra prendra en photo l'image du spot laser sur le papier transparent. Par la suite, un traitement de l'image obtenue, par un programme développé sous MATLAB, permet de visualiser les profils 2D et 3D de la source laser. Une fois la caméra placée en position 2, le profil du faisceau laser réfléchi par l'objet placé dans le tube d'eau est enregistré par la caméra CCD à travers le télescope. L'utilisation du télescope est due au fait que le faisceau laser est beaucoup plus élargi qu'à son émission et le télescope va le focaliser sur le capteur de la caméra.

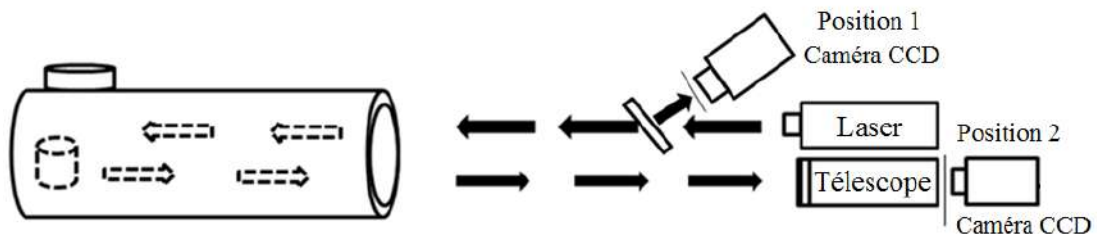


Figure 3. 26 : Dispositif expérimental pour la visualisation des profils 2D et 3D des impulsions laser émises et rétrodiffusées.

3.7 Réalisation expérimental du télescope de réception

Le télescope de réception a été réalisé comme représenté sur la Figure 3.27. L'objectif, de 50,8 mm de diamètre et de 160 mm de longueur focale, est placé sur un support en dural (alliage d'aluminium, de cuivre, de magnésium et de manganèse) [62]. Sa face tournée vers l'objet est traité anti-reflets. Les deux autres lentilles (Divergente et de focalisation) sont montées dans un seul support. Le diamètre de la lentille divergente est de 22,4 mm et sa longueur focale est de -20 mm. La lentille de focalisation a un diamètre de 12,5 mm et une longueur focale de 15 mm. Ces lentilles ont été utilisées en raison de la non-disponibilité des lentilles de la simulation. Un filtre interférentiel, de 25,4 mm de diamètre, est placé entre la

lentille divergente et la lentille de focalisation afin d'éliminer les lumières parasites qui peuvent parvenir d'autres sources de lumière. La photodiode est placée sur le même support à travers un trou qui lui permet de recevoir le faisceau laser focalisé sur sa surface active. Les dimensions du télescope sont 250 x 90 x 90 mm.



Figure 3. 27 : Photos du télescope de réception réalisé.

3.8 Reproduction des images d'objets immergés dans l'eau

La Figure 3. 28 représente le dispositif expérimental pour la visualisation des images d'objets immergés dans le tube à eau. La source laser Nd:YAG à la longueur d'onde de 523 nm, avec la même énergie de 4,3 mJ, une fréquence de répétition de 1 Hz et une impulsion laser d'une durée de 20 ns, est toujours située à 5 m du tube de 1,2 m de long. Plusieurs objets ont été immergés dans l'eau à tour de rôle à travers l'ouverture de 12 cm de diamètre comme représentée sur le haut du tube. La caméra CCD est orientée vers la fenêtre du tube. Vu la non-disponibilité d'une caméra CCD qui peut être synchronisée avec le laser, afin de prendre l'image de l'objet au moment du tir laser, une caméra ordinaire a été utilisée. Cette caméra CCD est un appareil de prise de photo ordinaire de marque Samsung dont la référence est ES95. Les caractéristiques de cet appareil photo sont : un capteur CCD de dimensions 6,16 x

4,62 mm, une résolution vidéo de 1280 x 720 pixels, un zoom optique 5X et l'enregistrement d'une séquence vidéo de 25 images par seconde. Comme cette caméra ne peut être synchronisée avec le laser pour une prise de photo, un programme a été développé sous MATLAB afin de sélectionner, traiter et afficher les photos qui contiennent des images. Un télescope d'émission est utilisé à la sortie du faisceau afin d'avoir un spot plus grand au niveau de l'objet, ce qui permettra une bonne illumination de sa surface. Ce télescope est tel que présenté dans la section 3.2.1.

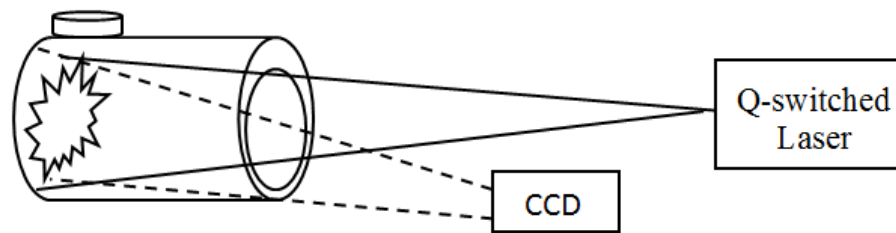


Figure 3. 28 : Dispositif expérimental pour la prise d'image des objets immergés dans l'eau.

Le diagramme synoptique de l'algorithme de traitement de la séquence vidéo est donné par la Figure 3.29. Le laser est mis en marche pendant plusieurs dizaines de secondes et la caméra est actionnée pendant le fonctionnement du laser. Il est à noter que l'expérimentation se déroule dans l'obscurité totale au niveau du laboratoire. C'est-à-dire sans la mise sous tension des lumières du laboratoire et pas de rayonnements solaires qui rentrent par la fenêtre du laboratoire où un rideau noir très opaque est placé. Comme représentée dans le diagramme synoptique, la séquence vidéo obtenue est convertie en un nombre d'images qui correspond à la durée d'enregistrement de la séquence. Comme la fréquence de répétition du laser est de 1 Hz, les photos non illuminées par le faisceau laser apparaissent en noir comme représentées sur la Figure 3.30. Les photos qui contiennent des images de l'objet sont sélectionnées comme illustrées par la Figure 3.31. La dernière étape de l'algorithme est de prendre une seule photo et de l'afficher en couleur ou en Noir et blanc (NB). De plus, le profil 2D de l'objet est affiché représentant la répartition de l'intensité de la lumière laser sur la surface de l'objet.

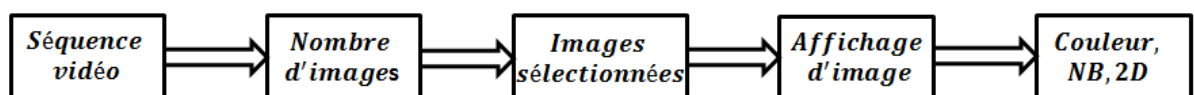


Figure 3. 29 : Diagramme synoptique de l'algorithme de traitement de la séquence vidéo.

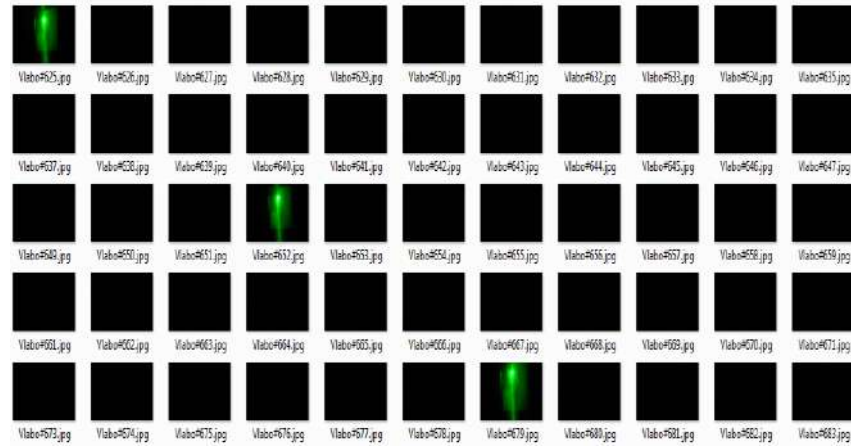


Figure 3. 30 : Enregistrement de 25 images par seconde de la caméra CCD.

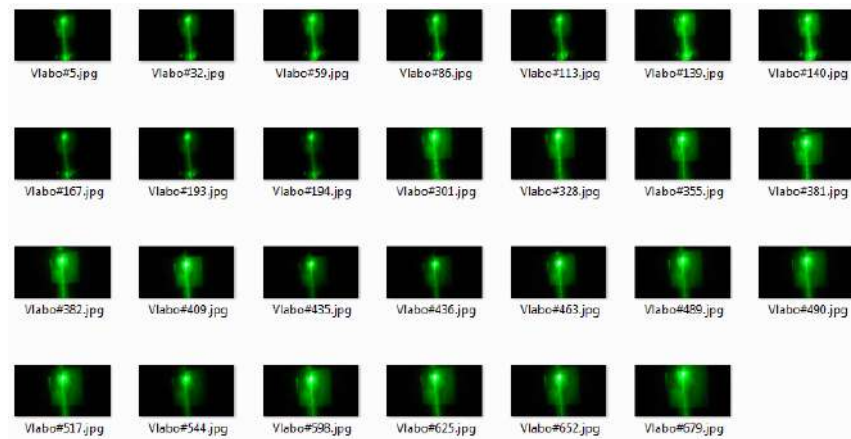


Figure 3. 31 : Images sélectionnées de la séquence vidéo enregistrée avec la caméra CCD.

3.9 Conclusion

Dans ce chapitre ont été présentés le dispositif expérimental, le logiciel de simulation ZEMAX et les conditions dans lesquelles sont effectuées les simulations. De plus, une description détaillée a été faite concernant la source laser doublée Nd :YAG/Cr :YAG. L'augmentation de l'énergie de pompage de cette source laser résulte dans l'augmentation de l'énergie à sa sortie ce qui peut être très favorable pour des applications de télémétrie et d'imagerie dans des eaux très turbides. Le milieu aquatique a été reproduit au laboratoire et il a été nécessaire de déterminer son coefficient d'atténuation afin de l'introduire dans les simulations. Dans le chapitre suivant, sont présentés les résultats de simulation avec comparaison des résultats obtenus en expérimentation.

Chapitre 4 :

Résultats et discussion

Chapitre 4 : Résultats et discussion

4.1 Introduction

Dans ce chapitre sont présentés les résultats de la simulation et de l'expérimentation, obtenus en télémétrie et en imagerie laser dans un environnement aquatique. Les simulations sont faites pour les mêmes conditions expérimentales. Les résultats obtenus par simulation sont comparés avec ceux obtenus par expérimentation et cela en termes de puissance laser collectée à la sortie du télescope de réception. De plus, une autre simulation a été faite pour une distance de propagation de 20 m dans l'eau. Pour cette distance de propagation, les simulations sont réalisées avec une eau côtière afin de démontrer l'effet du coefficient d'atténuation et plus particulièrement les effets des diffusions de Rayleigh et de Mie. Les résultats expérimentaux du circuit de détection sont comparés avec ceux obtenus en simulation. Pour ce qui est de l'imagerie laser dans l'eau, plusieurs objets de différentes formes ont été utilisés et les résultats obtenus sont discutés. À la fin de ce chapitre, une comparaison est faite entre les systèmes existants dans la littérature et le travail effectué dans cette thèse.

4.2 Résultats de la simulation avec le logiciel ZEMAX

Les profils 2D et 3D du spot de la source laser 532 nm, décrite dans le chapitre 3 afin d'être utilisée dans la simulation, sont donnés par la Figure 4.1. La barre colorée qui apparaît dans la fenêtre du profil 2D représente l'intensité lumineuse maximale exprimée en W/cm^2 .

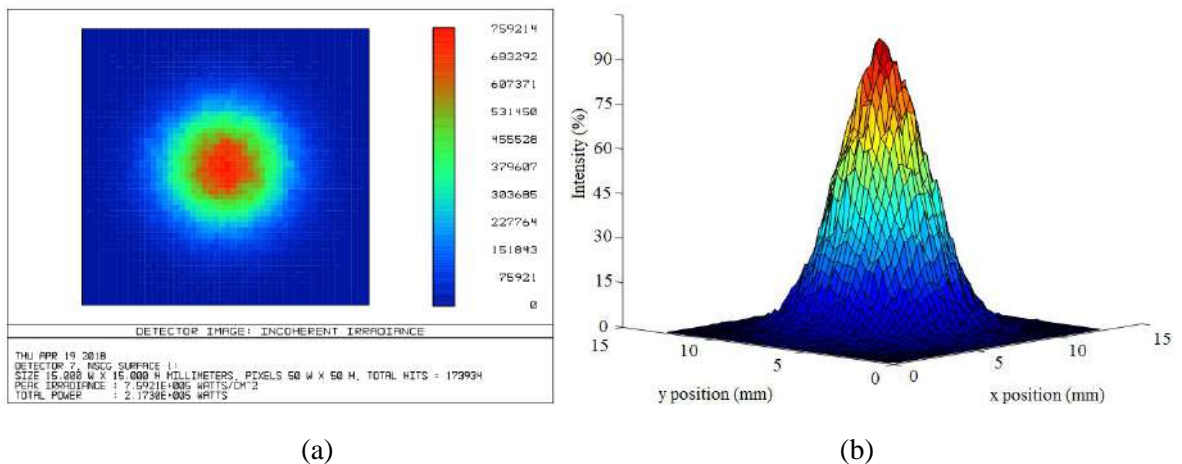


Figure 4. 1 : Profils 2D (a) et 3D (b) du spot de la source laser utilisée en simulation.

4.2.1 Simulation de la réponse du télescope de réception

Afin d'observer la réponse du télescope de réception présenté dans la section 3.4 du chapitre 3, la première simulation est faite avec le premier type d'eau W1 dont le coefficient

d'atténuation est de $0,130 \text{ m}^{-1}$. La Figure 4.2 illustre les profils 2D et 3D du faisceau laser réfléchi et enregistré sur la surface active du détecteur à la sortie du télescope. La puissance laser enregistrée telle que donnée sur la fenêtre 2D du logiciel (Figure 4.2(a)) est de $1,7 \times 10^5 \text{ W}$ (Total power : en bas de la fenêtre). Cette puissance correspond à 54,4 % de la puissance laser émise ($2,15 \times 10^5 \text{ W}$).

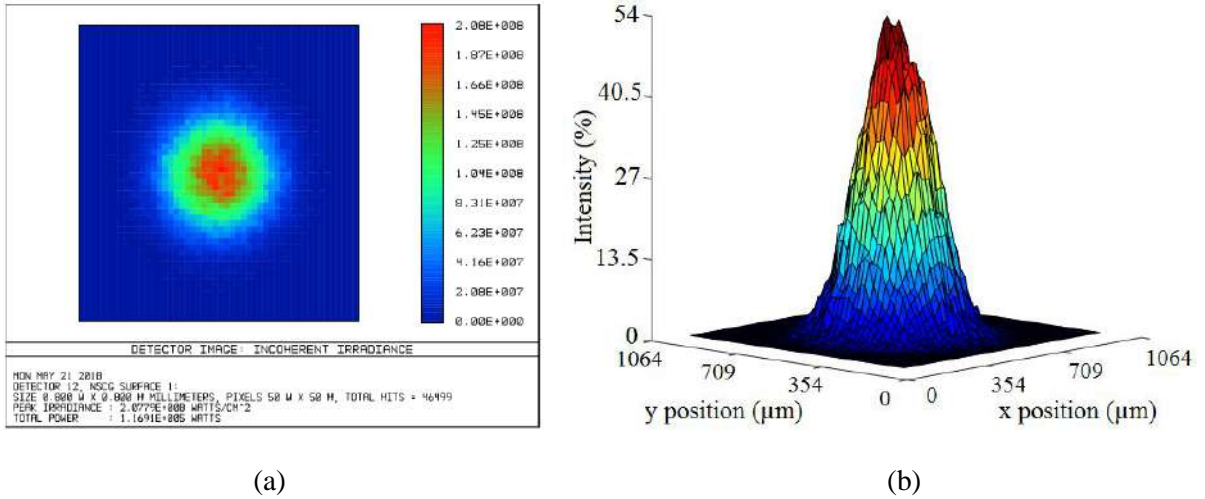


Figure 4.2 : Profils 2D (a) et 3D (b) du spot laser réfléchi pour une eau W1.

Pour ce qui est de la deuxième simulation avec le type d'eau W2, qui représente une augmentation du coefficient d'atténuation de $0,130 \text{ m}^{-1}$ à $0,343 \text{ m}^{-1}$, les profils 2D et 3D du spot laser collecté sur le détecteur à travers le télescope sont données par la Figure 4.3. La puissance laser obtenue pour ce type d'eau est de $6,8 \times 10^4 \text{ W}$. Cette puissance est estimée à 31,4 % de la puissance de la source laser. Dans cette simulation le coefficient d'atténuation de l'eau est plus importante, ce qui résulte en une diminution de la puissance laser réfléchie par rapport à la puissance obtenue pour l'eau W1.

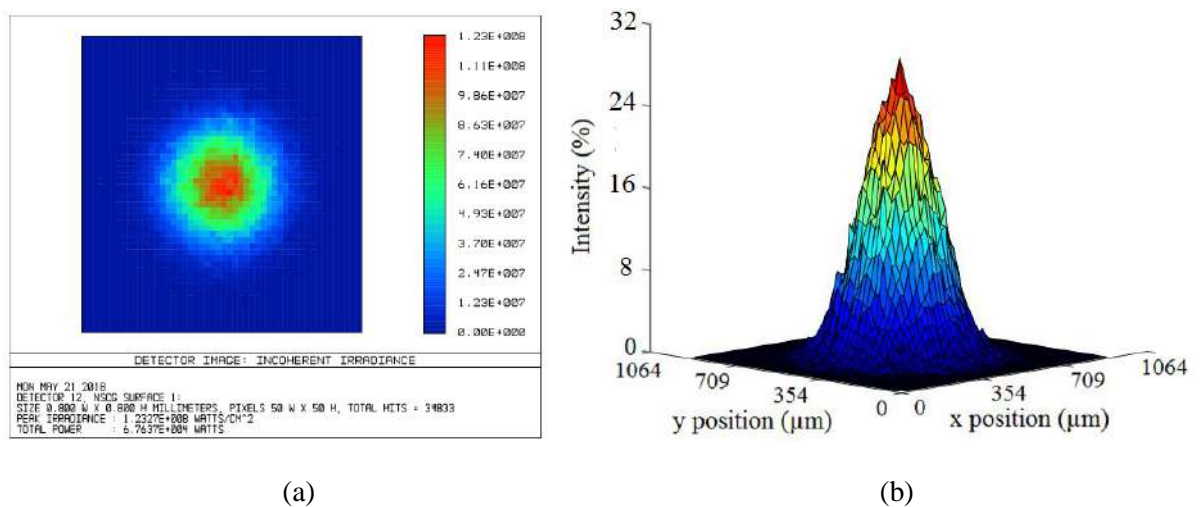


Figure 4.3 : Profils 2D (a) et 3D (b) du spot laser réfléchi pour une eau W2.

La troisième simulation est effectuée pour une eau de type W3 dont le coefficient d'atténuation est de $0,580 \text{ m}^{-1}$. Les profils 2D et 3D du spot laser collecté par le télescope sont donnés par la Figure 4.4. La puissance laser transmise est de $3,72 \times 10^4 \text{ W}$ qui correspond à 17,3 % de la puissance laser émise. Pour cette simulation où l'atténuation est plus importante que les deux premières simulations, il est observé une forte diminution de la puissance laser transmise dans l'eau W3.

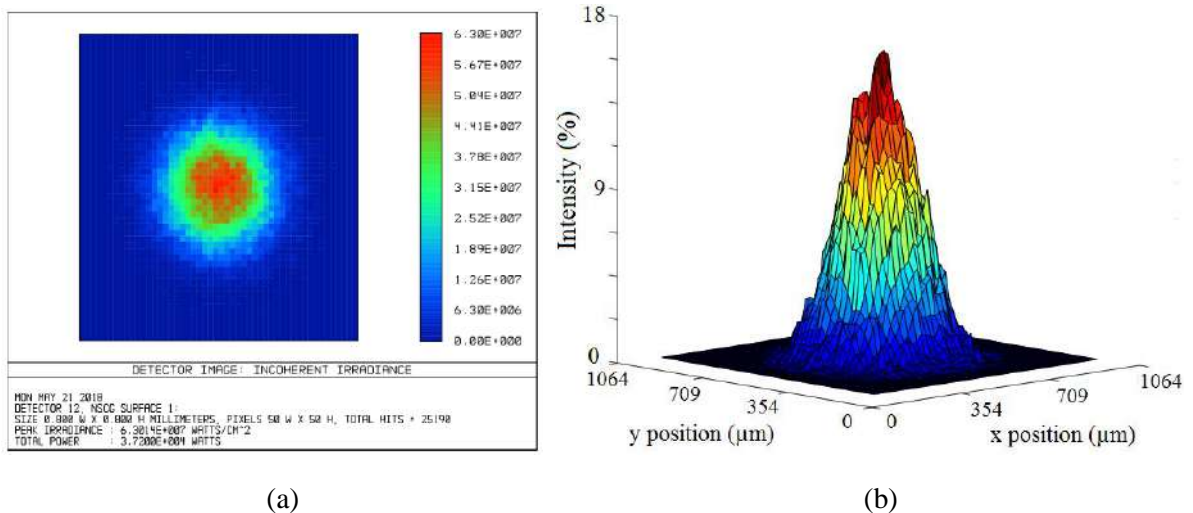


Figure 4. 4 : Profils 2D (a) et 3D (b) du spot laser réfléchi pour une eau W3.

À travers les différents profils 2D enregistrés, il est observé que la taille du faisceau laser telle que vue par le télescope est pratiquement la même. Ce fait est directement lié à l'optimisation de la surface active du détecteur et au grossissement du télescope. Cependant, il convient de noter que l'augmentation de la surface active du détecteur peut avoir un impact négatif sur l'augmentation du bruit du système de détection. Un détecteur avec une plus grande surface active est plus exposé au bruit de fond.

Dans la prochaine section d'autres simulations sont faites pour une distance de propagation de 20 mètres.

4.2.2 Simulation pour une portée de 20 mètres

Une autre simulation a été faite, pour une distance de propagation de 20 m, avec une eau turbide dont le coefficient d'atténuation a été fixé à $0,698 \text{ m}^{-1}$. La puissance laser estimée au niveau de l'objet est de 186 mW. Deux types de diffusion ont été considérés : Rayleigh et Mie. Pour la simulation avec la diffusion de Mie, des tailles de particules ont été fixées à $100 \mu\text{m}$ et un coefficient de diffusion $b = 0,219 \text{ m}^{-1}$. Les profils 2D et 3D du faisceau laser, enregistrés par le simulateur sur la surface active du détecteur, sont donnés par les Figures 4.5

et 4.6. La puissance laser obtenue dans le cas d'une diffusion de Mie est de 4,33 mW (Figure 4.5(b)) et qui correspond à 2,32 % de la puissance laser à l'objet (186 mW). Pour la diffusion de Rayleigh, la puissance enregistrée est de 2,6 mW qui correspondent à 1,4 % de la puissance laser à l'objet. La puissance laser réfléchiée dans le cas de la diffusion de Mie est plus grande que celle de la diffusion de Rayleigh. Il est aussi observé que pour la diffusion de Mie, la taille du spot est plus large que celle de Rayleigh. Cela est observé par la comparaison des deux profils 3D (Figure 4.6) où des points chauds apparaissent sur les extrémités de la fenêtre du détecteur.

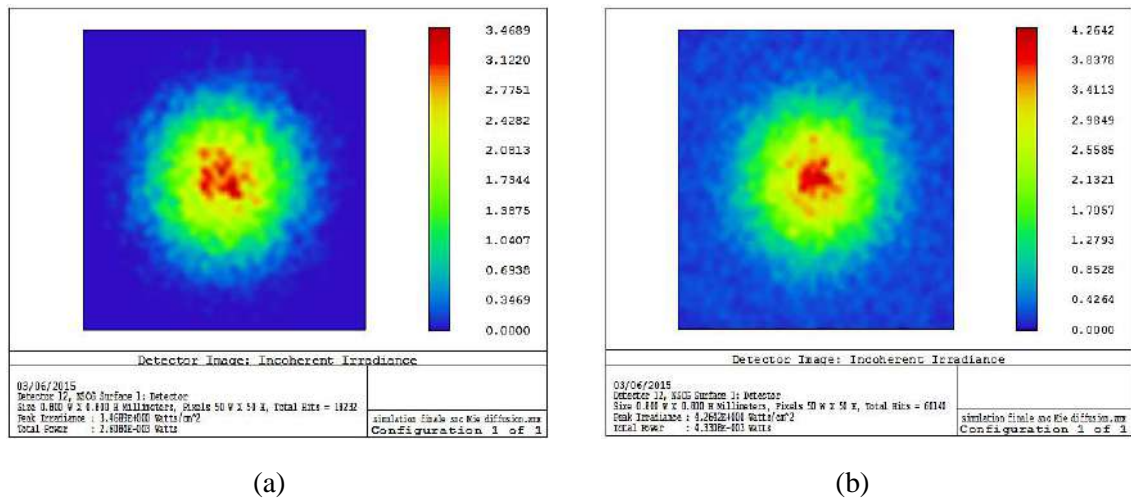


Figure 4. 5 : Profils 2D des spots laser obtenus pour les diffusions de Rayleigh (a) et de Mie (b) avec des tailles de particules de 100 μm et $b = 0,219 \text{ m}^{-1}$.

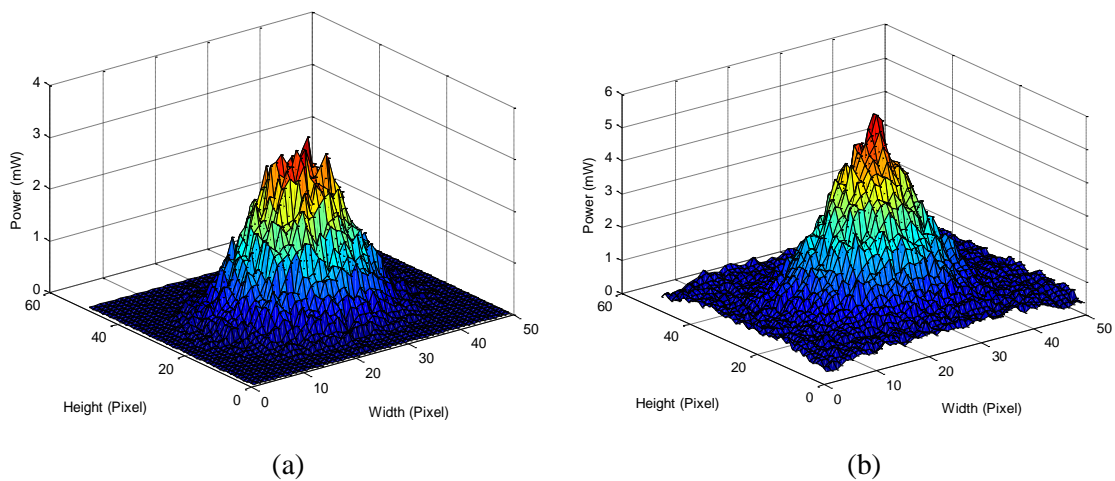


Figure 4. 6 : Profils 3D des spots laser obtenus pour les diffusions de Rayleigh (a) et de Mie (b) avec des tailles de particules de 100 μm et $b = 0,219 \text{ m}^{-1}$.

Avec les mêmes conditions de simulation que les précédentes et en augmentant le coefficient de diffusion de $0,219 \text{ m}^{-1}$ à $0,33 \text{ m}^{-1}$ (un coefficient qui se situe entre celui d'une eau côtière et

d'une eau turbide), les profils 2D des spots laser obtenus sont illustrés par la Figure 4.7. La puissance laser rétrodiffusée pour la diffusion de Mie (0,236 mW) est plus élevée que celle obtenue avec la diffusion de Rayleigh (0,182 mW). Le profil 3D (Figure 4.8(b)) du spot laser dans le cas de la diffusion de Mie est aussi plus large que celui de la diffusion de Rayleigh. Cela confirme le résultat obtenu avec un coefficient de diffusion de $0,219 \text{ m}^{-1}$.

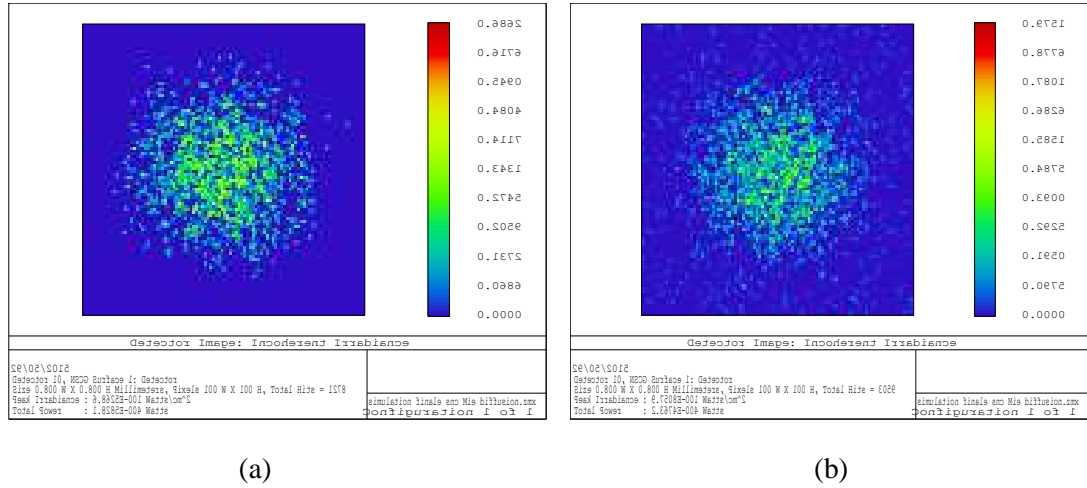


Figure 4. 7 : Profils 2D des spots laser obtenus pour les diffusions de Rayleigh (a) et de Mie (b) avec des tailles de particules de $100 \mu\text{m}$ et $b = 0,33 \text{ m}^{-1}$.

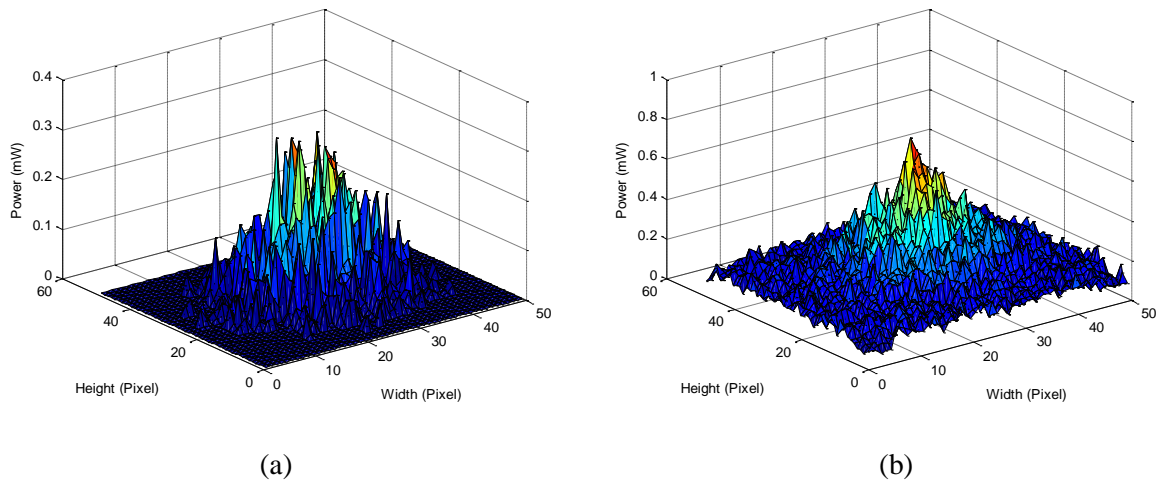


Figure 4. 8 : Profils 3D des spots laser obtenus pour les diffusions de Rayleigh (a) et de Mie (b) avec des tailles de particules de $100 \mu\text{m}$ et $b = 0,33 \text{ m}^{-1}$.

À partir de ces deux dernières simulations, il résulte que la puissance laser réfléchiée pour la diffusion de Mie est plus importante que celle de la diffusion de Rayleigh. L'explication de cela est du fait que l'intensité des rayonnements Rayleigh dispersés est identique dans les sens aller et retour (bidirectionnel) de la propagation, tandis que pour la diffusion de Mie l'intensité des rayonnements est plus grande dans le sens direct que dans le sens inverse. C'est pour cela que dans les Figures 4.5 et 4.7, les spots laser obtenus avec la diffusion de

Mie, montrent plus de puissance laser dans la surface active du détecteur. De plus, l'augmentation de la distance entre le télescope et l'objet montre clairement l'effet du coefficient d'atténuation de l'eau sur la diminution de la puissance laser rétrodiffusée.

Les Figures 4.9 et 4.10 montrent bien le sens de propagation de la lumière laser de l'objet (source) vers le télescope pour les deux diffusions de Rayleigh et de Mie. Dans le cas de la diffusion de Rayleigh, il est clairement observé que les rayonnements diffusés dans l'eau se propagent dans toutes les directions. Par contre dans le cas de la diffusion de Mie, la propagation des rayonnements est beaucoup plus intense dans le sens direct.

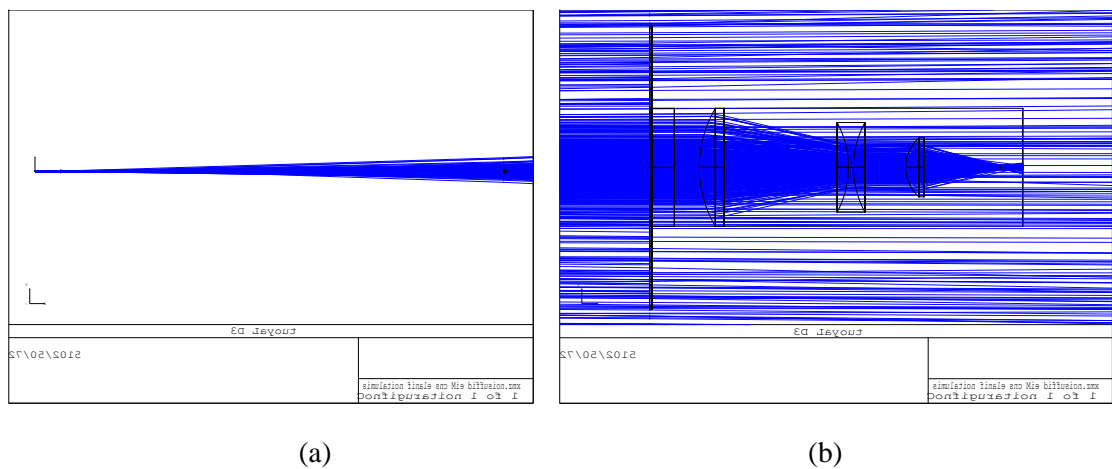


Figure 4. 9 : Fenêtre de simulation qui montrent le sens de propagation des rayonnements laser (a) et le télescope (b) pour une diffusion de Mie avec des particules de $20 \mu\text{m}$ de diamètre et $b = 0,05 \text{ m}^{-1}$.

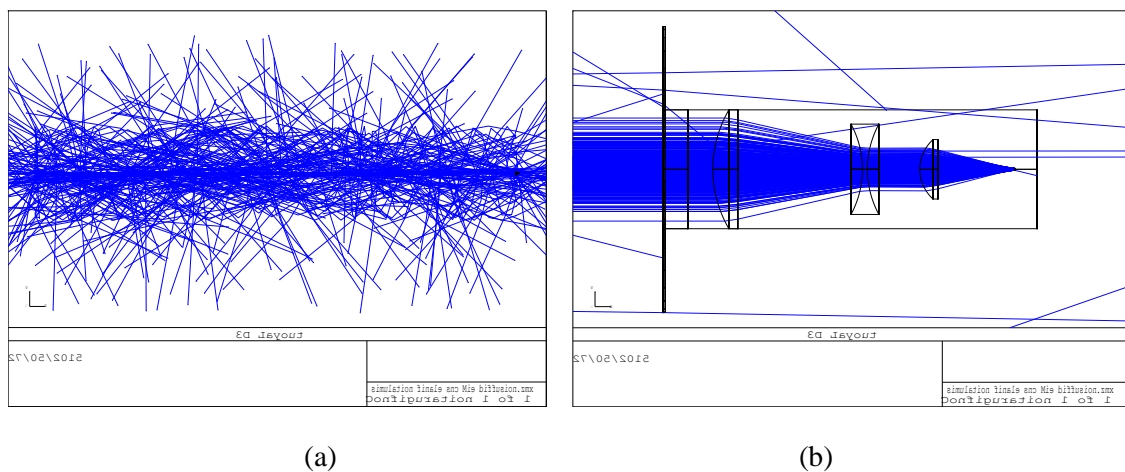


Figure 4. 10 : Fenêtres de simulation qui montrent le sens des rayonnements laser (a) et le télescope (b) pour une diffusion de Rayleigh avec un coefficient de diffusion $b = 0,05 \text{ m}^{-1}$.

Pour la diffusion de Mie, plusieurs simulations ont été effectuées en changeant le diamètre des particules de $4 \mu\text{m}$ à $250 \mu\text{m}$ et la variation du coefficient de diffusion de $0,05 \text{ m}^{-1}$ à 1 m^{-1}

correspondant à différents types d'eau. Les résultats obtenus ont été similaires. La disparition de l'effet de la diffusion de Mie a été observée pour des tailles de particules ayant un diamètre supérieur à 300 μm .

4.2.3 Simulation avec une source laser ayant un diamètre de spot plus large

Afin d'observer la réponse du télescope avec une source laser dont la taille du spot dépasse les 5 mm de diamètre d'autres simulations ont été faites. Pour une source laser avec un spot de 15 mm de diamètre au niveau de l'objet, les Figures 4.11(a) et 4.11(b) représentent les profils 2D des spots collectés sur la surface active du détecteur pour les diffusions de Rayleigh et de Mie avec un coefficient de diffusion de $0,05 \text{ m}^{-1}$. En comparant ces profils avec les résultats précédents, il est remarqué que le faisceau laser réfléchi n'est pas bien focalisé au centre du détecteur. Un maximum d'intensité est obtenu sur le cercle du détecteur que sur son centre. Dans cette situation où la tâche laser est beaucoup plus grande, la solution est d'augmenter le diamètre de l'objectif du télescope. Mais l'utilisation d'un télescope avec un plus grand objectif va générer beaucoup plus de bruits parasites au niveau du circuit de détection. Donc la solution idéale, comme ça a déjà été proposé dans le chapitre 3, le rajout d'un télescope au niveau de l'émetteur laser réduira la divergence du faisceau laser et diminuera ainsi son diamètre. Cela résoudra le problème en évitant d'utiliser un télescope de réception plus grand.

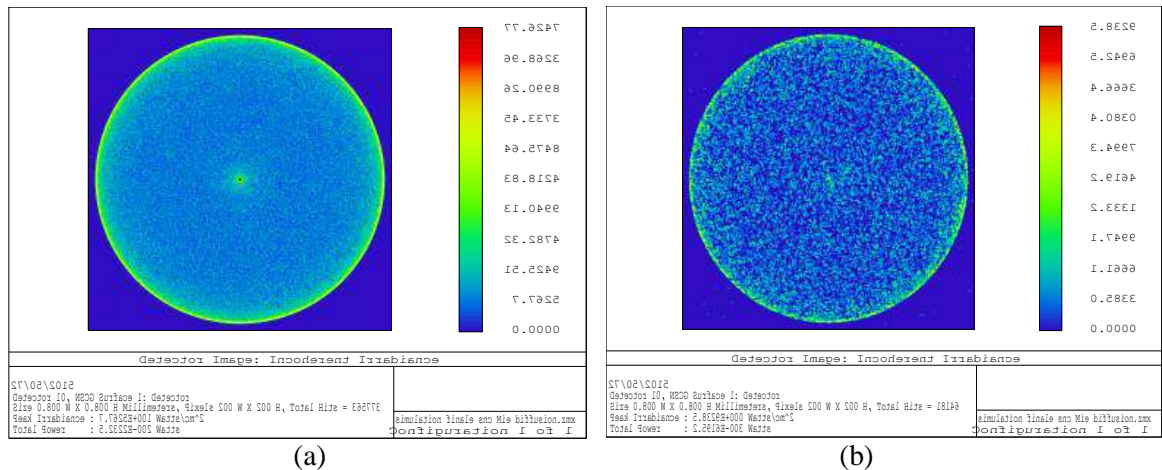


Figure 4. 11 : Profils 2D collectés sur la surface du détecteur pour les diffusions de Rayleigh (a) et de Mie (b) avec des particules de 4 μm de diamètre et un coefficient de diffusion $b = 0,05 \text{ m}^{-1}$.

À partir des résultats obtenus lors des différentes simulations, il a été observé la diminution de la puissance laser réfléchi par l'objet due à l'augmentation du coefficient d'atténuation des types d'eau simulés. Ce coefficient d'atténuation est le résultat de l'absorption et de la diffusion de l'eau pure et de ses constituants. La diminution de la puissance laser dans l'eau

affectera considérablement la distance de propagation de la lumière laser que ce soit en télémètre ou en imagerie. Cela confirme le résultat du calcul du SNR, où la portée maximale pouvant être atteinte est plus petite avec les valeurs les plus élevées du coefficient d'atténuation de l'eau. L'effet de l'atténuation de l'eau sera observé expérimentalement dans la section suivante.

4.3 Résultats expérimentaux et comparaison avec la simulation

Les profils 2D et 3D, de la source laser Nd :YAG Q-switch à 532 nm utilisée dans les expériences, sont représentés par la Figure 4.12.

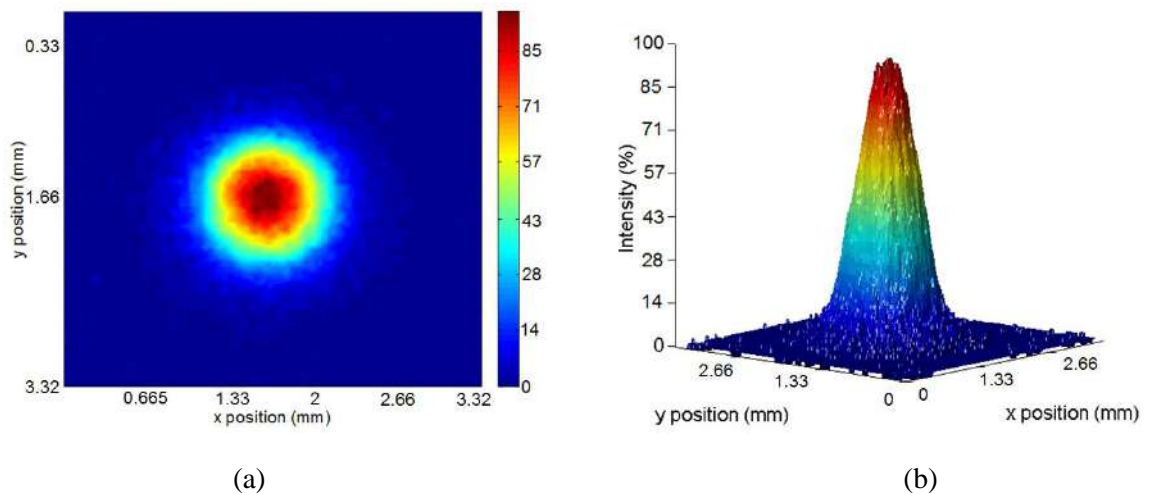


Figure 4. 12 : Profils 2D (a) et 3D (b) de la source laser.

La première expérience a été faite avec une eau de type W1 comme défini dans le tableau 3.1. La Figure 4.13 illustre les profils 2D et 3D du spot laser réfléchi par l'objet dans l'eau W1 à une température de 20° C. Ces profils sont de même allure que ceux de la source laser (Figure 4.12) avec une certaine atténuation de la puissance laser qui est due à la propagation du faisceau laser dans l'eau. La puissance laser réfléchi par l'objet et collectée à la sortie du télescope est de $1,22 \times 10^5$ W et qui correspond à 57 % de la puissance laser émise. Cette valeur se rapproche de la valeur obtenue par simulation pour le même type d'eau W1 ($1,17 \times 10^5$ W) (Figure 4.2(b)). Et comme observé dans le profil 2D, le diamètre du spot laser est en dessous de 800 μ m de même que la simulation.

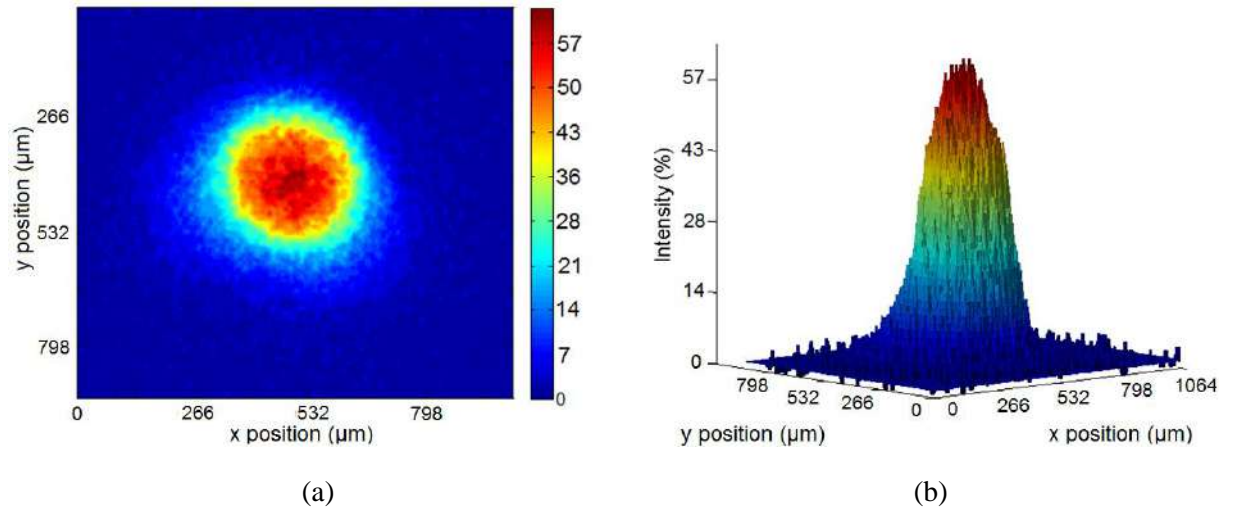


Figure 4. 13 : Profils expérimentaux 2D (a) et 3D (b) du spot laser réfléchi pour une eau W1.

Pour la seconde expérience avec une eau de type W2, les profils 2D et 3D du spot laser réfléchi de l’objet et enregistré à la sortie du télescope par la caméra CCD, sont représentés par la Figure 4.14. Dans ce cas, l’intensité laser est moindre que dans le cas de l’eau W1 (Figure 4.13). La puissance laser collectée est égale à $6,15 \times 10^4$ W et qui correspond à 28,6 % de la puissance laser émise ($2,15 \times 10^5$ W). Cette valeur se rapproche de la valeur obtenue en simulation ($6,8 \times 10^4$ W) avec le même type d’eau W2.

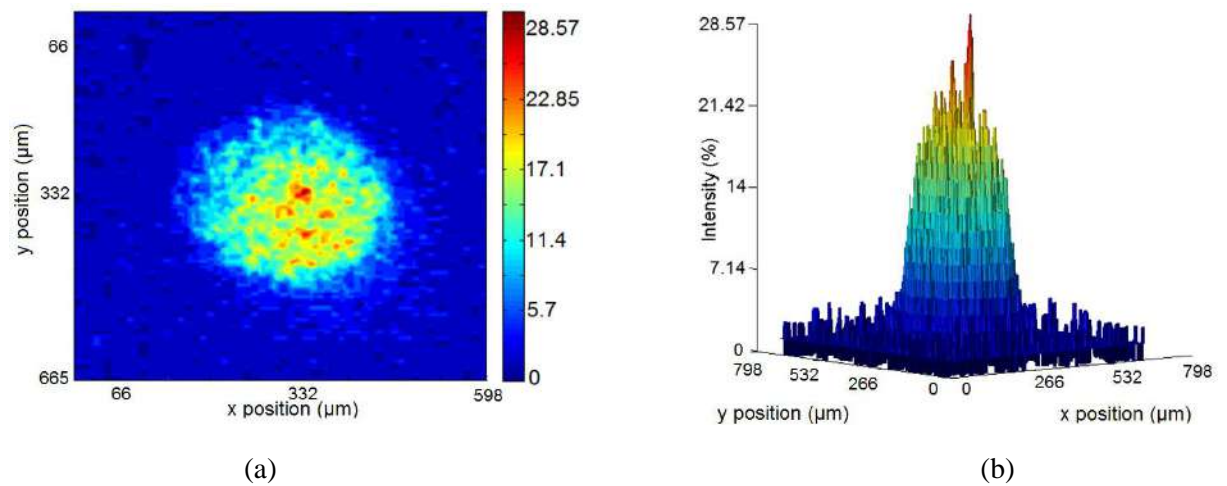


Figure 4. 14 : Profils expérimentaux 2D (a) et 3D (b) du spot laser réfléchi pour une eau W2.

Pour la dernière expérience faite avec une eau de type W3, les profils 2D et 3D du faisceau laser réfléchi sont donnés par la Figure 4.15. Dans ce cas, l’atténuation est beaucoup plus importante et résulte en la diminution de la puissance laser réfléchie. La puissance réfléchie est de $3,65 \times 10^4$ W et qui correspond à 17 % de la puissance laser émise. Cette valeur est pratiquement la même que celle obtenue par simulation ($3,72 \times 10^4$ W) dans le cas de l’eau W3.

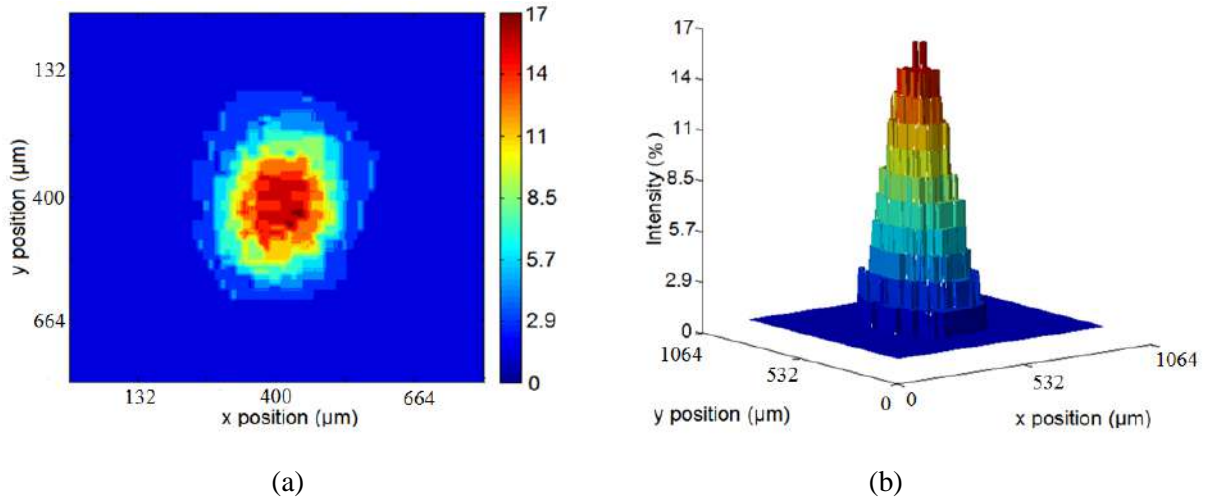


Figure 4. 15 : Profils expérimentaux 2D (a) et 3D (b) du spot laser réfléchi pour une eau W3.

En conclusion, les puissances laser réfléchies enregistrées avec la simulation et les expériences sont approximativement proches les unes des autres pour chaque type d'eau (W1, W2, W3). Cela permet de conclure que le modèle optique implémenté dans le logiciel ZEMAX reproduit bien les phénomènes physiques de propagation de la lumière dans l'eau.

4.4 Résultats de la simulation et de l'expérimentation du circuit de détection

Comme illustré par la Figure 4.16, le circuit de détection a été simulé à l'aide du logiciel de simulation électronique PSpice [63] afin de visualiser les signaux à chaque étage. Les photodiodes PIN et APD ont été représentées dans la simulation par deux générateurs de courant. La durée de la largeur d'impulsion a été fixée à 10 ns pour les deux générateurs. L'amplificateur rapide AD8009 est utilisé pour réaliser les différents étages d'amplification et le circuit discriminateur.

Les résultats de la simulation sont illustrés par les Figures 4.17 et 4.18. La Figure 4.17 représente les impulsions laser émises et reçues à travers les différents étages du circuit simulé. Sur la Figure 4.18, qui représente une vue élargie, sont données du bas vers le haut les formes des signaux à la sortie du premier et deuxième étage d'amplification. Le troisième signal est la sortie de l'étage de passage par zéro. Cet étage est formé par le circuit dérivateur RC. Le point de passage par zéro correspond à la valeur de crête du signal amplifié obtenu à la sortie du deuxième amplificateur. Et la quatrième courbe représente la forme du signal à la sortie du dernier amplificateur utilisé pour générer un signal de forme carré. Ce dernier signal correspond au signal START ou STOP, ce qui permet de déclencher ou d'arrêter le compteur de la portée.

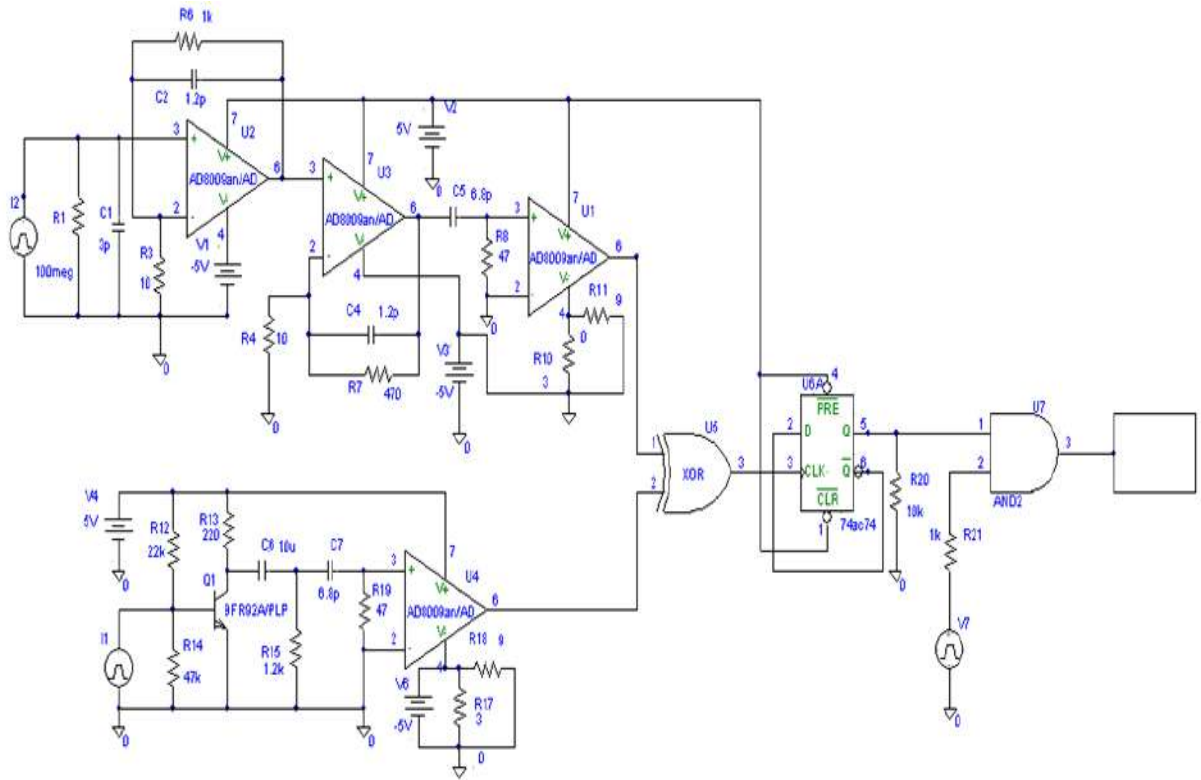


Figure 4. 16 : Circuit de détection simulé avec le logiciel de simulation électronique PSpice.

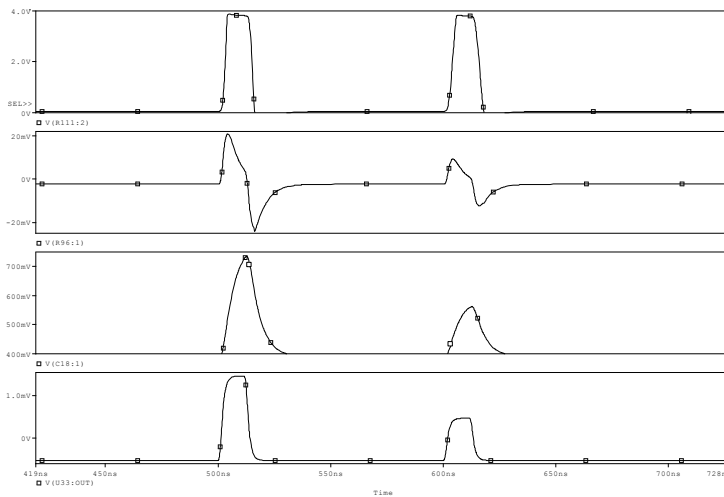


Figure 4. 17 : Les différents signaux obtenus à travers le circuit de détection.

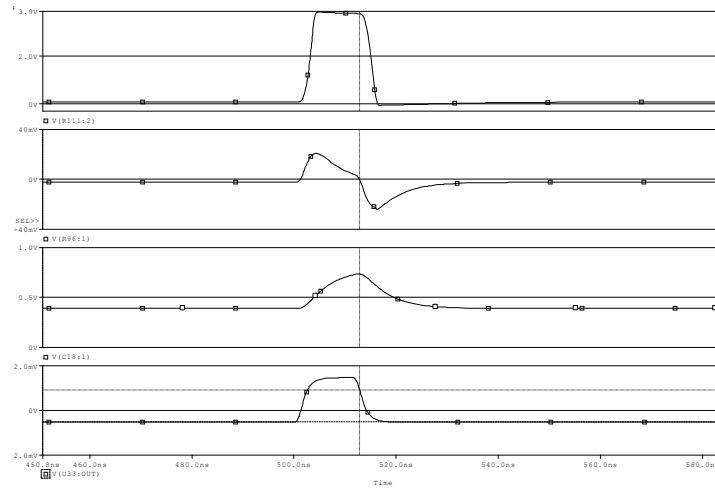


Figure 4. 18 : Vue élargie des signaux obtenus à chaque étage du circuit de détection.

Une partie du circuit simulé a été réalisée et testée expérimentalement. Pour les tests expérimentaux, la source laser Nd :YAG/Cr :YAG précédemment présentée a été utilisée et le dispositif est tel que représenté dans la Figure 3.19. La courbe inférieure (Ch1) de la Figure 4.19 représente la forme de l'impulsion laser émise. L'impulsion laser rétrodiffusée de l'objet placé dans le tube d'eau, est collectée par le télescope de réception. L'impulsion laser réfléchie est représentée par la courbe supérieure (Ch2) de la Figure 4.19. Il est à noter que le retard enregistré entre les deux impulsions (24,8 ns) correspond au temps aller-retour de l'impulsion laser (de la source laser vers l'objet et de l'objet vers le télescope de réception).

La forme du signal à la sortie du circuit dérivateur est illustrée dans la Figure 4.20(a). La courbe inférieure représente le signal à la sortie du deuxième amplificateur. La courbe supérieure correspond à la sortie du circuit de passage par zéro et où le point de tension nulle correspond à la valeur maximale du signal amplifié. La Figure 4.20(b) représente le résultat de simulation pour les mêmes étages. Il est remarqué une similarité entre la simulation et l'expérimentation où le point de passage par zéro du signal est le même.

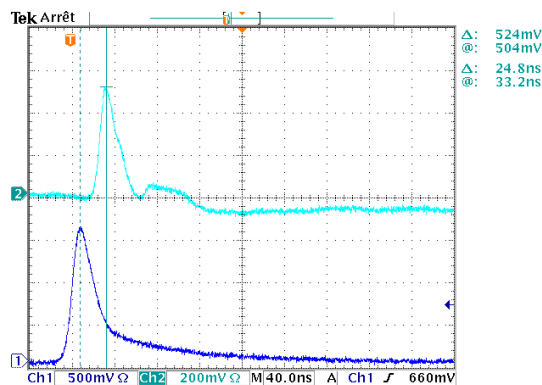


Figure 4. 19 : Impulsion laser émise (Ch1) and rétrodiffusée (Ch2).

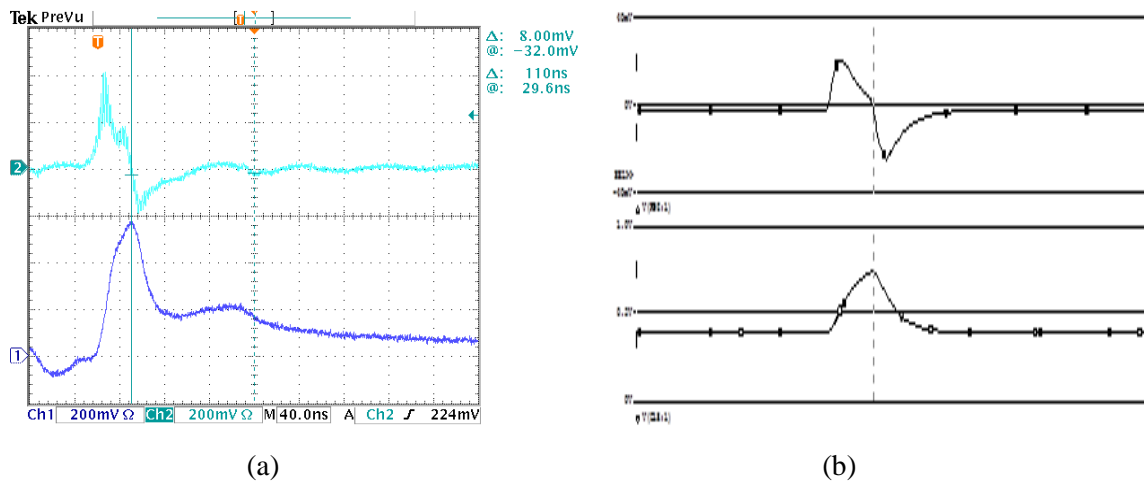


Figure 4. 20 : Résultats expérimental (a) et de simulation (b) des sorties du post-amplificateur (Ch1) et de l'étage dérivateur (Ch2).

Des essais ont été effectués avec une impulsion laser avec deux sommets (500 mV/div.), comme le montre la Figure 4.21. Le signal réfléchi de l'objet (Ch2) est retardé et il est remarqué une atténuation de son amplitude (100 mV/div.), qui est due à l'atténuation dans l'eau de la lumière laser.

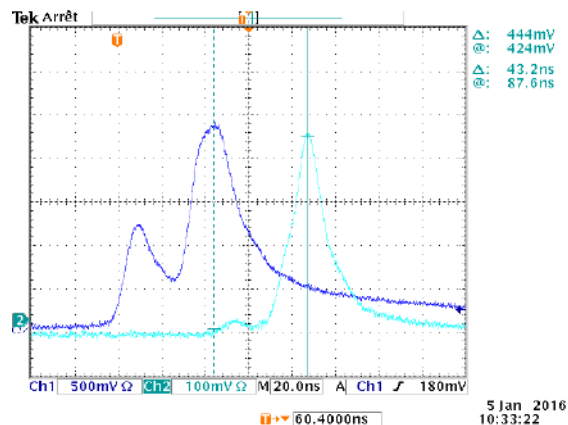


Figure 4. 21 : Réponse du circuit de détection à une impulsion laser avec deux pics.

4.5 Résultats de la reproduction des images d'objets immergés dans l'eau

Afin de reproduire les images d'objets immergés dans l'eau, plusieurs objets de différentes formes (cubes, cylindre et l'image d'un éléphant) ont été utilisés dans les expérimentations d'imagerie laser tels que donnés par la Figure 4.22. Les objets sont placés un par un dans le tube rempli d'eau de robinet dont le coefficient d'atténuation a été estimé à $0,130 \text{ m}^{-1}$ (Type d'eau W1 comme défini dans le tableau 3.1). Ce coefficient d'atténuation correspond approximativement à une eau de mer claire dont le coefficient est de $0,151 \text{ m}^{-1}$ comme

rapporté au tableau 1.2 [39]. Une séquence vidéo est enregistrée pour chaque objet lors de la mise en marche du laser.

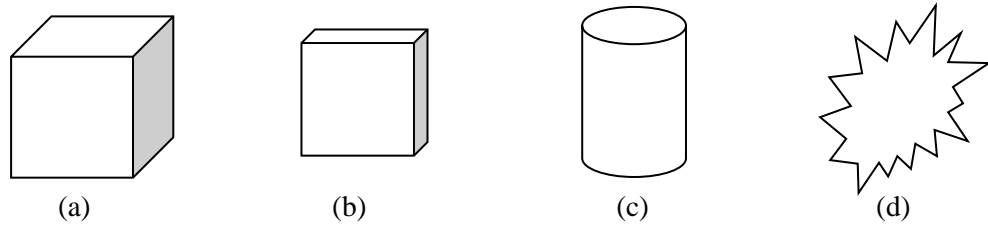


Figure 4. 22 : Objets utilisés dans l'expérimentation : (a) cube, (b) cube plus petit, (c) cylindre, (d) image gravée.

La première expérience est réalisée par l'utilisation d'une plaque métallique anodisée sur laquelle est gravé par laser CO₂ un éléphant comme représenté sur la Figure 4.23(a). Les dimensions de cette plaque sont de 80 x 100 mm. La séquence vidéo obtenue pour cette plaque est traitée par l'algorithme présenté dans le chapitre précédent. L'image enregistrée par la caméra CCD est donnée par la Figure 4.23(b) et où la couleur verte correspond à la longueur d'onde du laser (532 nm). L'image noir et blanc est illustrée par la Figure 4.23(c). La Figure 4.23(d) représente le profil 2D de l'image. Ce profil montre bien que le faisceau laser illumine toute la plaque métallique avec une saturation observée dans le milieu de la moitié supérieure de l'image qui correspond au point de l'impact. Cette saturation est due à la puissance élevée du laser. Cela amène à conclure que pour les courtes distances, il est préférable de réduire l'intensité du laser afin d'éviter la saturation.

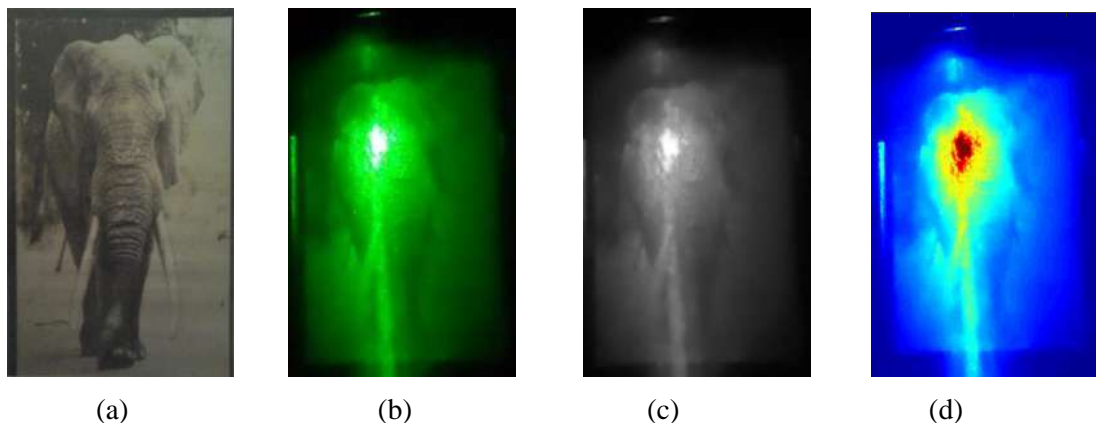


Figure 4. 23 : Photo d'un éléphant gravée sur une plaque (a), son image couleur (b), son image en noir et blanc (c) et son profil 2D (d) .

Le deuxième objet utilisé est un cylindre en téflon comme le montre la Figure 4.24(a). Ce cylindre fait 60 mm de diamètre et 65 mm de haut. Certaines de ses parties ont été recouvertes de rubans noirs. L'image obtenue par la caméra CCD pour cet objet est donnée par la Figure 4.24(b) où il est observé que sa partie supérieure est bien illuminée. Dans son profil 2D

(Figure 4.24(c)), le point d'impact du spot laser est bien visible sur sa partie supérieure. Une focalisation du spot laser au centre de l'objet aurait donné une meilleure illumination du cylindre.

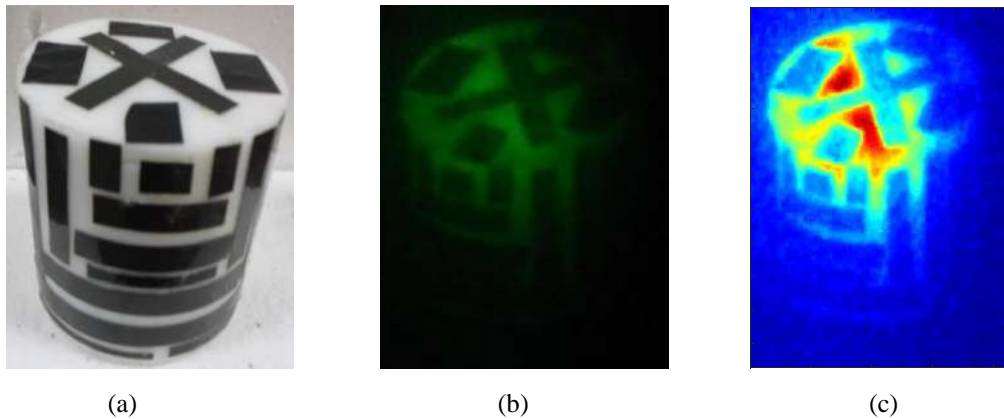


Figure 4. 24 : Objet de forme cylindrique (a), son image (b) et son profil 2D (c) sous l'eau.

La troisième expérience est réalisée avec un cube en téflon dont les dimensions sont 50 x 50 x 20 mm. Des rubans noirs ont été collés sur ce cube comme le montre la Figure 4.25(a). Dans cette expérience, le faisceau laser a été orienté vers le centre de l'objet. L'image obtenue de ce cube dans une eau de type W1 est donnée par la Figure 4.25(b). Comme le montre bien cette image, le cube est bien illuminé. La Figure 4.25(c) représente le profil 2D du cube.

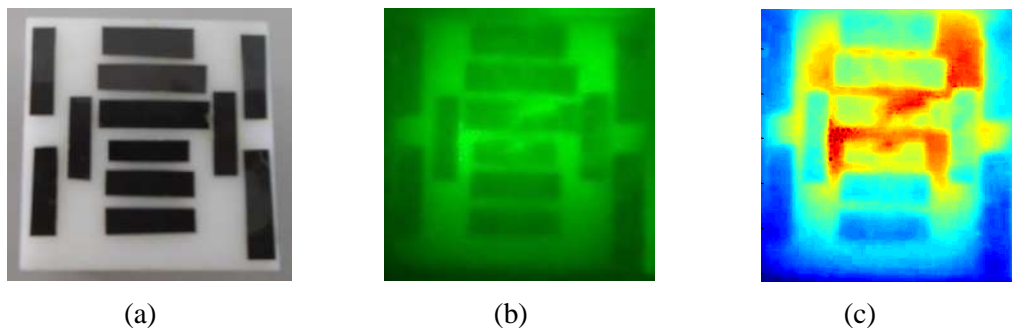


Figure 4. 25 : Le premier cube (a), son image (b) et son profil 2D (c) dans une eau claire.

Une autre expérience a été réalisée avec le même cube de la Figure 4.25(a) pour une eau de type W3 (eau avec sable) et où un mouvement de turbidité a été créé afin d'éviter la sédimentation rapide du sable dans le fond du tube. Cette eau a un coefficient d'atténuation de $0,580 \text{ m}^{-1}$, qui peut correspondre au coefficient d'atténuation le plus bas d'une eau turbide [33, 39]. La Figure 4.26(a) représente l'image obtenue du cube dans ce type d'eau. L'objet n'est pas bien éclairé par le faisceau laser comme dans l'eau précédente (W1). Le cube apparaît dans un milieu aquatique plus obscur (Figure 4.26(a)) par rapport à la précédente expérience (Figure 4.25(b)). Cela est dû à la présence des grains de sable dans l'eau qui ont diminué l'intensité du faisceau laser qui atteint la surface de l'objet. Donc augmenter le

coefficient d'atténuation de l'eau, c'est comme utilisé l'eau W1 et avoir un milieu de propagation plus long. Du fait que le coefficient d'atténuation est passé de $0,130 \text{ m}^{-1}$ à $0,580 \text{ m}^{-1}$ (un rapport de 4,46) dans un tube de 1,2 m de long, c'est comme si l'expérience a été faite dans un tube d'eau d'une longueur de $1,2 \text{ m} \times 4,46 = 5,35 \text{ m}$ avec un coefficient d'atténuation de $0,130 \text{ m}^{-1}$ selon la loi de Beer-Lambert donnée par l'équation (1.5). De cette expérience, même si l'intensité du laser a été atténuée, le cube reste bien illuminé et cela revient à la diffusion des particules de sable dans l'eau qui ont diffusé la lumière dans différentes directions du milieu aquatique.

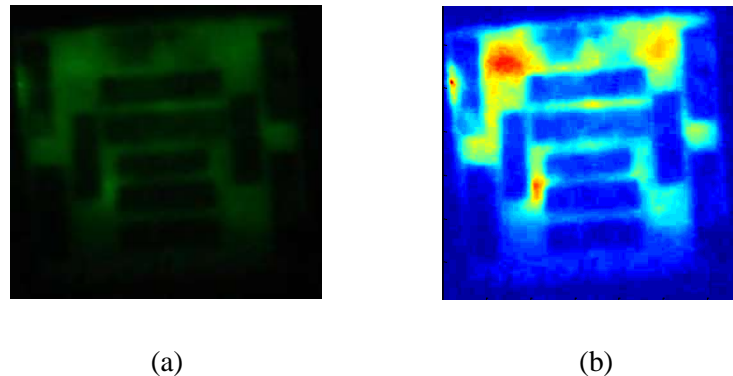


Figure 4. 26 : Image (a) et profil 2D (b) du cube de la Figure 4.25 dans une eau turbide.

La dernière expérience a été faite avec un autre cube de dimensions un peu plus grandes ($55 \times 60 \times 44 \text{ mm}$) que celui de l'expérience précédente comme représenté par la Figure 4.27(a). L'image obtenue de ce cube dans l'eau avec des grains de sable (Eau de type W3) est donnée par la Figure 4.27(b). Le cube apparaît dans un milieu obscur et dans le profil 2D (Figure 4.27(c)), il est possible d'observer la répartition de la lumière laser sur le cube.

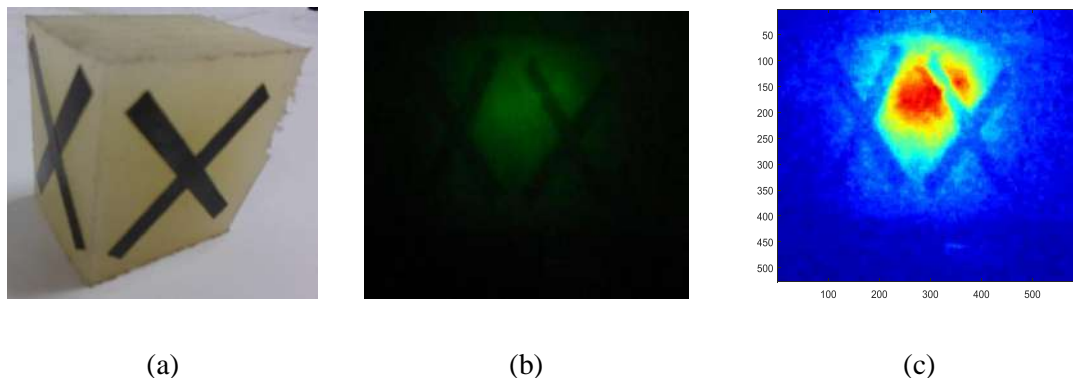


Figure 4. 27 : Cube de forme plus grande (a), son image (b) et son profil 2D (c).

L'adaptation de l'appareil photo Samsung ES95, qui n'est pas synchronisé avec les tirs laser, a permis de reproduire les images et les profils 2D de différents objets dans une eau claire

(W1) et une eau turbide (W3). Cette reproduction des images d'objets a été possible par le développement d'un algorithme de traitement des séquences vidéo enregistrées par l'appareil photo.

De ces différentes expériences d'imagerie, il est déduit que l'intensité du laser doit être prise en compte pour un bon système d'imagerie dans l'eau. Selon le type d'eau et si l'objet est éloigné de la source laser ou pas, il est conseillé d'ajuster l'énergie du laser. Si l'objet est proche, l'énergie du laser doit être diminuée pour éviter la saturation de son image. Compte tenu de ces paramètres, l'imagerie aquatique peut présenter une excellente reproduction de la vie aquatique même par l'utilisation d'une caméra ordinaire et non synchronisée avec les impulsions laser.

4.6 Comparaisons et discussions

Afin de situer le travail qui a été présenté dans le cadre de cette thèse, les travaux et achèvements effectués ailleurs dans le cadre des applications de la lumière laser dans l'eau sont rapportés. Effectivement, vu l'intérêt d'explorer les fonds marins, les chercheurs partout dans le monde ont essayé de contribuer à la télémétrie et l'imagerie laser dans l'eau en réalisant des prototypes de laboratoire et d'autres de grande nature.

Parmi les travaux réalisés, on cite le projet LUCIE (Laser Underwater Camera Image Enhancer) avec ses deux versions I [18] et II [22]. C'est un projet conduit par des chercheurs canadiens et où il était question de réaliser un système d'imagerie dans l'eau afin d'équiper des véhicules commandés à distance (ROV : Remotely Operated Vehicle). Leur système utilise une source laser Nd:YAG doublée et pompée par diode laser, dont la durée d'impulsion est de 8 ns avec une fréquence de répétition de 2 kHz. La caméra CCD utilisée enregistre 10 images par seconde. Ils sont arrivés à obtenir des profils 2D des objets utilisés.

Un autre système [25] a été mis au point par des chercheurs danois afin d'apporter une nouveauté par rapport au projet LUCIE. Cette nouveauté consiste par la reproduction de profil 3D des objets immergés dans l'eau. Leur système est constitué d'un laser 532 nm pulsé et d'une caméra CCD. Les tests ont été effectués au laboratoire avec un milieu aquatique reproduit dans un tube d'eau de 40 cm de diamètre et de 6 mètres de long. Une eau douce et une eau de mer ont été considérées pour effectuer les expérimentations. Le profil 3D de l'objet utilisé a été obtenue par l'enregistrement de 50 images. Les images obtenues permettent de déterminer la taille de l'objet.

En 2004, des chercheurs du Nanyang Technological University de Singapour, sont arrivés à obtenir des images d'objets dans une eau trouble dans le cadre de leur système appelé UWLI (UnderWater Lidar Imaging) [64]. Cette eau trouble a été reproduite au laboratoire dans un cube en plexiglas de 3 mètres de long et ayant une fenêtre de 1 m² de surface. La source est un laser Nd :YAG doublé avec une énergie de 160 mJ et une durée d'impulsion de 5 ns. La caméra utilisée est une ICCD.

En 2014, des chercheurs chinois sont arrivés à obtenir des profils 2D dans différents types d'eau avec différents coefficients d'atténuation [13]. Ils ont reproduit le milieu aquatique au laboratoire par l'utilisation d'un tube de 16 mètres de long et 40 cm de diamètre. Le laser émet à 532 nm avec une énergie de 160 mJ, une largeur d'impulsion de 6 ns et une fréquence de répétition de 20 Hz. La caméra utilisée est de type EMCCD (Electron Multiplying CCD Camera) avec zoom automatique. Cette caméra est déclenchable par le laser avec un retard réglable à partir de 5 ns. L'objet utilisé est en noir et blanc.

Le dernier système mis au point concerne un projet européen Horizon2020, connu sous l'acronyme d'UTOFIA (Underwater Time Of Flight Image Acquisition) [8, 9] dont la durée de réalisation a été de trois années (de février 2015 à février 2018). Ce projet, qui englobe plus de vingt chercheurs de sept pays européens, avait comme objectif de réaliser un système aquatique capable de reproduire les profils 2D et 3D ainsi que des séquences vidéo en temps réel de la vie sous-marine [14]. De plus, ce système peut fournir la distance qui le sépare de l'objet visualisé. Le prototype final est compact et étanche avec une source laser Q-switch 532 nm d'une énergie de 3,5 mJ, d'une durée d'impulsion de 1,8 ns et d'une fréquence de répétition de 1 kHz [24]. La caméra CCD utilisée est capable d'enregistrer de 10 à 20 images par seconde. Cette caméra est beaucoup plus performante comparée aux caméras des autres systèmes cités ci-dessus. Cela est dû au fait que dans une eau turbide, où la diffusion de la lumière par les particules suspendues dans l'eau est intense, cette caméra arrive à éliminer la lumière diffusée dans les deux premiers mètres et de voir plus loin. Le système a été testé en Espagne, en France et au Danemark. Dans le sud de l'Espagne, le système a été utilisé dans une ferme piscicole d'élevage de thon rouge afin de reproduire les images de l'élevage. Cela a permis aussi d'évaluer la quantité et le taux de croissance des poissons, du fait que le système permet de déterminer la taille des poissons. L'acquisition des images enregistrées par la caméra a été faite par le logiciel MATLAB. La portée maximale de ce système est de 12 mètres dans eau de très haute turbidité.

En comparant le travail effectué dans cette thèse, par rapport aux différents systèmes cités ci-dessus, on trouve que c'est la même source laser Nd :YAG doublée avec Q-switch qui est toujours utilisée. Malgré l'utilisation d'une caméra CCD ordinaire, nous sommes arrivés à démontrer la faisabilité de l'imagerie laser dans l'eau et les résultats obtenus sont plus au moins similaires aux résultats des autres systèmes. Certains prototypes sont hybrides, c'est-à-dire qu'ils permettent de faire, à la fois, de l'imagerie et de la télémétrie laser en milieux aquatiques. Pour ce qui est du prototype proposé dans cette thèse, il est facile d'avoir en réception un système d'imagerie à base de caméra et un photodétecteur pour déterminer la portée vers l'objet par l'intermédiaire du système électronique de détection proposé.

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, les résultats obtenus en télémétrie et en imagerie laser dans différents milieux aquatiques ont été présentés. La reproduction au laboratoire du milieu aquatique a permis de visualiser les profils des impulsions laser rétrodiffusées dans les trois types d'eau W1, W2 et W3 tels que définis dans le tableau 3.1. Pour chaque type d'eau, la puissance laser rétrodiffusée obtenue expérimentalement a été comparée avec celle obtenue par simulation. Pour ce qui est de l'imagerie laser, les expériences ont été faites avec la même source laser et pour les mêmes conditions que la télémétrie. Les images de différents objets immergés dans deux types d'eau (W1 et W2) ont été observées. Cela a été possible par l'utilisation d'une caméra CCD ordinaire associée à un programme développé sous MATLAB afin de traiter les séquences vidéo de la caméra. En plus, cette caméra a permis de visualiser les profils du faisceau laser en émission et en réception. Cela a rendu possible l'estimation de la puissance laser rétrodiffusée.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

Vu l'intérêt de la télémétrie et de l'imagerie laser en milieux aquatiques afin de permettre l'exploration des fonds marins et en raison la forte atténuation de la lumière laser dans des eaux de très hautes turbidités, cette thèse a fait ressortir les différents paramètres et éléments qui peuvent constituer un système de télémétrie et d'imagerie laser dans de tels milieux.

Les principes de la télémétrie et l'imagerie laser en milieu aquatique ont été présentés. Le choix de la technique de télémétrie laser dite à temps de vol TOF (Time-of-Flight) a été fait, parmi d'autres techniques, en raison de sa simplicité de mise en œuvre.

Les caractéristiques optiques de différents milieux marins ont été rapportées. Cela a permis de faire un choix de la longueur d'onde de propagation dans l'eau avec la plus faible atténuation possible. La longueur d'onde sélectionnée est dans le vert (532 nm), ce qui a fait ressortir une source laser Nd:YAG Q-switch à commutation passive (Cr:YAG comme absorbant saturable) avec cristal doubleur (KTP). Les caractéristiques de cette source sont une énergie de 4,3 mJ et une durée d'impulsion de 20 ns avec une fréquence de répétition de 1 Hz.

Afin de mettre au point un système de détection capable de répondre à la longueur d'onde du laser dans des conditions de propagation dans une eau turbide, une sélection des composants optoélectroniques a été faite. La photodiode à avalanche a été retenue comme étant le photodétecteur adéquat en association avec des amplificateurs opérationnels rapides. Une partie de ce système de détection a été réalisée et testée. Le choix des composants optoélectroniques a mené à l'évaluation du rapport signal sur bruit SNR du télémètre laser aquatique. Ce SNR a démontré les capacités du télémètre en termes de portée dans différents types d'eau. Dans le cas d'une eau turbide, la portée maximale pouvant être atteinte, avec une puissance laser émise de $2,15 \times 10^5$ W, est moins de 5 mètres. Par contre, dans le cas d'une eau claire, la portée maximale qui peut être atteinte est de 31 m à 42 mètres.

La même source laser a été utilisée en imagerie laser dans l'eau avec une caméra CCD en réception. Cette caméra CCD est ordinaire et ne peut pas être synchronisée avec le laser. Mais tout de même elle a été adaptée aux expérimentations d'imagerie par l'intermédiaire d'un algorithme de traitement des séquences vidéo. De cela, les images de différents objets immergés dans l'eau ont été reproduites. Cette caméra a été aussi utilisée pour la visualisation des profils 2D et 3D des impulsions laser émise et rétrodiffusée.

Le logiciel de simulation et d'analyse optique ZEMAX a été utilisé pour faire le design du télescope de réception du télémètre et l'observation de sa réponse dans les trois types d'eau

caractérisés (W1, W2 et W3) expérimentalement. Ce télescope a été réalisé et testé expérimentalement, ce qui a permis de comparer les puissances laser rétrodiffusées avec ceux de la simulation. Il est à noter que les coefficients d'atténuation ($0,130 \text{ m}^{-1}$, $0,343 \text{ m}^{-1}$ et $0,580 \text{ m}^{-1}$) des trois types d'eau (W1, W2 et W3) ont été déterminés de manière expérimentale par l'intermédiaire du tube contenant le milieu aquatique. Cela a été possible par la détermination d'une relation qui donne le coefficient d'atténuation de l'eau en fonction des différentes pertes, dues aux optiques du télescope et la fenêtre en verre du tube, que rencontre le faisceau laser lors de sa propagation.

Comme perspectives du travail accompli dans cette thèse, nous projetons l'association en un seul bloc de la partie imagerie et télémétrie en réception. Cela permettra d'avoir l'image de l'objet et sa portée à la fois. De plus, il sera proposé un prototype compact, mobile et étanche qui pourra être utilisé pour résoudre des cas réels tels que l'envasement des barrages d'eau dans notre pays et l'élevage piscicole des poissons du fait que des fermes d'élevage commencent à voir le jour en Algérie. Pour ce qui est de l'envasement des barrages d'eau, il est primordial de déterminer l'épaisseur de la couche d'envasement afin de procéder au drainage des barrages.

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

- [1] M. A. Ainslie, *Principles of sonar performance modelling*: Springer, 2010.
- [2] P. C. Etter, *Underwater acoustic modeling and simulation*: CRC Press, 2018.
- [3] A. V. Jelalian, *Laser radar systems*: Artech House, 1992.
- [4] V. Molebny, P. McManamon, O. Steinvall, T. Kobayashi, and W. Chen, "Laser radar: historical prospective—from the East to the West," *Optical Engineering*, vol. 56, pp. 031220-031220, 2017.
- [5] G. R. Osche, "Optical detection theory for laser applications," *Optical Detection Theory for Laser Applications*, by Gregory R. Osche, pp. 424. ISBN 0-471-22411-1. Wiley-VCH, July 2002., p. 424, 2002.
- [6] L. K. Rumbaugh, E. M. Bollt, W. D. Jemison, and Y. Li, "A 532 nm chaotic Lidar transmitter for high resolution underwater ranging and imaging," in *Oceans-San Diego, 2013*, pp. 1-6.
- [7] J. Szulwic, P. Burdziakowski, A. Janowski, M. Przyborski, P. Tysiąc, A. Wojtowicz, A. Kholodkov, K. Matysik, and M. Matysik, "Maritime laser scanning as the source for spatial data," *Polish Maritime Research*, vol. 22, pp. 9-14, 2015.
- [8] A. Driewer, I. Abrosimov, J. Alexander, M. Benger, M. O'Farrell, K. H. Haugholt, C. Softley, J. T. Thielemann, J. Thorstensen, and C. Yates, "UTOFIA: an underwater time-of-flight image acquisition system," in *Electro-Optical Remote Sensing XI*, 2017, p. 1043404.
- [9] P. Mariani, I. Quincoces, I. Galparsoro, J. Bald, G. Gabiña, A. Visser, S. Jónasdóttir, K. H. Haugholt, J. Thorstensen, and P. Risholm, "A new compact, cost-efficient concept for underwater range-gated imaging: the UTOFIA project," in *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 2017, p. 18169.
- [10] H. N. Burns, C. G. Christodoulou, and G. D. Boreman, "System design of a pulsed laser rangefinder," *Optical Engineering*, vol. 30, pp. 323-329, 1991.
- [11] M.-C. Amann, T. Bosch, M. Lescure, R. Myllyla, and M. Rioux, "Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement," *Optical Engineering*, vol. 40, pp. 10-19, 2001.
- [12] S. M. Nejad and S. Olyaei, "Comparison of TOF, FMCW and phase-shift laser range-finding methods by simulation and measurement," *Quart. J. Technol. Educ*, vol. 1, pp. 11-18, 2006.

- [13] H. Youwei, C. Fengmei, J. Weiqi, and Q. Su, "Underwater pulsed laser range-gated imaging model and its effect on image degradation and restoration," *Optical Engineering*, vol. 53, pp. 061608-061608, 2014.
- [14] A. Visser, "UTOFIA: Time-of-Flight camera for underwater applications," in *Sustain-ATV Conference 2016*, 2016.
- [15] S. Donati, *Electro-optical instrumentation: sensing and measuring with lasers*: Pearson Education, 2004.
- [16] T. D. Cole, "NEAR laser rangefinder: A tool for the mapping and topologic study of asteroid 433 Eros," *Johns Hopkins apl technical digest*, vol. 19, p. 143, 1998.
- [17] A. Waszkiel, "Measuring system for parallel moving ships," *Polish Maritime Research*, vol. 19, pp. 66-72, 2012.
- [18] G. R. Fournier, D. Bonnier, J. L. Forand, and P. W. Pace, "Range-gated underwater laser imaging system," *Optical Engineering*, vol. 32, pp. 2185-2190, 1993.
- [19] D. Juyal, "Laser sources for underwater applications," *Defense Science Journal*, vol. 34, pp. 57-70, 1984.
- [20] B. Cochenour, L. Mullen, and J. Muth, "A modulated pulse laser for underwater detection, ranging, imaging, and communications," in *Ocean Sensing and Monitoring IV*, 2012, p. 83720S.
- [21] J. Wojtanowski, Z. Mierczyk, and M. Zygmunt, "Laser remote sensing of underwater objects," in *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, and Large Water Regions 2008*, p. 71050F.
- [22] A. Weidemann, G. R. Fournier, L. Forand, and P. Mathieu, "In harbor underwater threat detection/identification using active imaging," in *Photonics for Port and Harbor Security*, 2005, pp. 59-71.
- [23] S. P. O'Connor, L. J. Mullen, and B. Cochenour, "Underwater modulated pulse laser imaging system," *Optical Engineering*, vol. 53, p. 051403, 2014.
- [24] E. Cametti, S. Dell'Acqua, P. Farinello, G. Piccinno, and G. Reali, "UTOFIA project: A novel MOPA laser source for a compact, cost-effective system for underwater range-gated imaging," 2016.
- [25] J. Busck, "Underwater 3-D optical imaging with a gated viewing laser radar," *Optical Engineering*, vol. 44, pp. 116001-116001-7, 2005.

- [26] K. Muljowidodo, M. A. Rasyid, N. SaptoAdi, and A. Budiyo, "Vision based distance measurement system using single laser pointer design for underwater vehicle," *Indian journal of marine science*, vol. 38, pp. 324-331, 2009.
- [27] M. Massot-Campos and G. Oliver-Codina, "Optical Sensors and Methods for Underwater 3D Reconstruction," *Sensors*, vol. 15, pp. 31525-31557, 2015.
- [28] D. M. Kocak, F. R. Dalglish, F. M. Caimi, and Y. Y. Schechner, "A focus on recent developments and trends in underwater imaging," *Marine Technology Society Journal*, vol. 42, pp. 52-67, 2008.
- [29] D.-M. He, "Underwater Laser-illuminated Range-gated Imaging scaled by 22.5 cm ns⁻¹ with serial targets," *Journal of Ocean University of China*, vol. 3, pp. 208-219, 2004.
- [30] C. D. Mobley, "Radiative transfer in the ocean," *Encyclopedia of ocean sciences*, vol. 4, pp. 2321-2330, 2001.
- [31] N. K. Højerslev, "Optical properties of sea water," University of Copenhagen, Department of Physical Oceanography, 1986.
- [32] C. F. Bohren and D. R. Huffman, *Absorption and scattering of light by small particles*: John Wiley & Sons, 2008.
- [33] H. U. Sverdrup, M. W. Johnson, and R. H. Fleming, *The Oceans: Their physics, chemistry, and general biology* vol. 7: Prentice-Hall New York, 1942.
- [34] L. Priour and S. Sathyendranath, "An optical classification of coastal and oceanic waters based on the specific spectral absorption curves of phytoplankton pigments, dissolved organic matter, and other particulate materials," *Limnology and Oceanography*, vol. 26, pp. 671-689, 1981.
- [35] A. Morel, "Optical properties of pure water and pure sea water," *Optical aspects of oceanography*, vol. 1, pp. 1-24, 1974.
- [36] R. C. Smith and K. S. Baker, "Optical properties of the clearest natural waters (200–800 nm)," *Applied optics*, vol. 20, pp. 177-184, 1981.
- [37] B. Wozniak and J. Dera, *Light absorption in sea water* vol. 33: Springer, 2007.
- [38] A. Murty, "A theoretical approach to the attenuation coefficient of light in sea water," *Indian Journal of Fisheries*, vol. 16, pp. 151-155, 1969.
- [39] C. D. Mobley, *Light and water: Radiative transfer in natural waters*: Academic press, 1994.

- [40] C. D. Mobley, "The optical properties of water," *Handbook of optics*, vol. 1, pp. 43.41-43.56, 1995.
- [41] M. Jonasz and G. Fournier, *Light Scattering by Particles in Water: Theoretical and Experimental Foundations: Theoretical and Experimental Foundations*: Academic Press, 2011.
- [42] O. Le Calvé, "Propriétés physiques du milieu marin," *Introduction à l'océanographie physique. Mai*, 2002.
- [43] A. Kilpelä and J. Kostamovaara, "Laser pulser for a time-of-flight laser radar," *Review of scientific instruments*, vol. 68, pp. 2253-2258, 1997.
- [44] F. Almabouada, K. Aiadi, and D. Louhibi, "Generation of modulated microchip laser pulses," in *18th International School on Quantum Electronics: Laser Physics and Applications*, 2015, p. 94471L.
- [45] W. Koechner, *Solid-state laser engineering* vol. 1: Springer, 2013.
- [46] R. Zheng and G. Wu, "Constant fraction discriminator in pulsed time-of-flight laser rangefinding," *Frontiers of Optoelectronics*, vol. 5, pp. 182-186, 2012.
- [47] D. Dupuy, M. Lescure, and H. Tap-Béteille, "Analysis of an avalanche photodiode used as an optoelectronic mixer for a frequency modulated continuous wave laser range finder," *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, vol. 4, p. S332, 2002.
- [48] A. Rogalski, *Infrared detectors*: CRC press, 2010.
- [49] F. Barnes, "RCA Electro-Optics Handbook," *RCA Corporation, Harrison, NJ*, 1974.
- [50] W. Kester, "Section 1 High speed operational amplifiers," in *High speed design techniques*, ed: Analog Device Inc., 1996, p. 18.
- [51] G. R. Osche, "Optical detection theory for laser applications," *Optical Detection Theory for Laser Applications*, by Gregory R. Osche, pp. 424. ISBN 0-471-22411-1. Wiley-VCH, July 2002., vol. 1.
- [52] M. J. Kidger, *Fundamental optical design* vol. 92: SPIE press Bellingham, WA, 2002.
- [53] F. Almabouada and K. Aiadi, "Experimental Study of a Flash-lamp Pumped Passively Q-Switched Nd: YAG Laser Using Cr⁴⁺: YAG Saturable Absorber," *International Journal of Engineering-Transactions B: Applications*, vol. 31, pp. 1870-1875, 2018.
- [54] J. H. Lowry, J. S. Mendlowitz, and N. Subramanian, "Optical characteristics of Teflon AF fluoroplastic materials," *Opt. Eng.*, vol. 31, pp. 1982-1985, 1992.
- [55] L. Radiant Zemax, "Zemax 13 Optical Design Program User's Manual," 2014.

- [56] C. Fan, Z. Ren, C. Ying, and B. Peng, "Practical research on the teaching of Optical Design," in *14th Conference on Education and Training in Optics and Photonics: ETOP 2017*, 2017, p. 104524F.
- [57] H. Lin, H. Wang, X. Zhu, G. Zhu, and L. Qi, "Design of homogeneous laser-line-beam generators," *Optical Engineering*, vol. 55, pp. 095106-095106, 2016.
- [58] Z. Zhang, Y. Xie, Q. Yin, and F. Kang, "Design and testing of infrared diffractive telescope imaging optical systems," *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 126, pp. 5740-5743, 2015.
- [59] J. M. Coelho, J. Freitas, and C. A. Williamson, "Optical eye simulator for laser dazzle events," *Applied optics*, vol. 55, pp. 2240-2251, 2016.
- [60] A. A. Campazas and M. X. A. Cid, "Non-sequential modeling of commercial dichroic beamsplitters using Zemax," in *SPIE Optical Systems Design*, 2015, pp. 96260C-96260C-9.
- [61] F. Almabouada, M. A. Abreu, J. M. Coelho, and K. E. Aiadi, "Experimental and simulation assessments of underwater light propagation," *Frontiers of Optoelectronics*, pp. 1-8, 2019.
- [62] V. Bratu, I. N. Popescu, E. V. Stoian, D. N. Ungureanu, C. O. Rusanescu, L. G. Toma, and A. C. Voicu, "Casting and Homogenization of AlCu₃. 3Mg1. 5Mn Alloy for Aircraft Industry," in *Advanced Materials Research*, 2015, pp. 44-50.
- [63] P. W. Tuinenga, *SPICE: a guide to circuit simulation and analysis using PSpice*: Prentice Hall PTR, 1988.
- [64] D.-M. He and G. G. Seet, "Underwater lidar imaging scaled by 22.5 cm/ns with serial targets," *Optical Engineering*, vol. 43, pp. 754-767, 2004.

Contribution au développement et l'optimisation d'un télémètre laser en milieu aquatique

Résumé :

La lumière laser est utilisée dans les milieux aquatiques (rivières et lacs) et marins (mers et océans) pour des applications de télémétrie et d'imagerie. Le point commun entre un télémètre et un système d'imagerie dans l'eau est son émetteur laser. La propagation d'un faisceau laser dans l'eau, contrairement à l'atmosphère, rencontre une atténuation beaucoup plus importante et où le coefficient d'atténuation de l'eau peut atteindre la valeur de $2,190 \text{ m}^{-1}$ pour une eau de mer turbide. Cela implique qu'un choix judicieux doit être fait sur le type de source laser et le système de détection du récepteur. Dans cette thèse, une attention particulière a été faite à cette source laser, au télescope de réception associé à son système de détection en télémétrie ; et au dispositif de réception du système d'imagerie laser dans l'eau. Tout en reproduisant l'environnement réel de propagation, des simulations ont été faites pour observer la réponse du télescope de réception dans trois différents types d'eau (W1, W2 et W3) dont les coefficients d'atténuation ont été déterminés expérimentalement ($0,130 \text{ m}^{-1}$, $0,343 \text{ m}^{-1}$ et $0,580 \text{ m}^{-1}$). L'énergie laser obtenue à la sortie du télescope est pratiquement la même pour l'expérimental que pour la simulation. Pour ce qui est de l'imagerie laser, plusieurs objets ont été immergés dans le milieu aquatique et l'utilisation d'une caméra CCD ordinaire, associée à un algorithme de traitement d'image qui lui a été développé, a permis de reproduire leurs images et profils 2D dans une eau obscure.

Mots clés : Télémétrie et imagerie laser dans l'eau, Système de détection, Caméra CCD, Logiciel ZEMAX.

Contribution to the development and optimization of a laser rangefinder in the aquatic environment

Abstract:

The laser light is used in aquatic (rivers and lakes) and marine (seas and oceans) environments for telemetry and imaging applications. The common point between a rangefinder and an imaging system in water is its laser emitter. Unlike the atmosphere, the propagation of a laser beam in water has a much greater attenuation and where the attenuation coefficient of water can reach the value of 2.190 m^{-1} in case of turbid harbor. This implies that a judicious choice must be made on the type of the laser source and the detection system of the receiver. In this thesis, particular attention was paid to this laser source, to the reception telescope associated with its detection system for the rangefinder part; and the receiving device of the laser imaging system in the water media. While reproducing the real propagation environment, simulations have been achieved to observe the response of the receiving telescope in three different types of water (W1, W2 et W3) whose the attenuation coefficients were determined experimentally (0.130 m^{-1} , 0.343 m^{-1} , and 0.580 m^{-1}). The laser energy obtained at the exit of the telescope is practically the same for the experimental one as for the simulation. In terms of laser imaging, several forms of objects have been immersed in the aquatic environment and the use of an ordinary CCD camera, combined with an image processing algorithm that has been developed for this application, allowed to reproduce their images and the 2D profiles in dark water.

Keywords: Laser range finder and imaging in water media, Detection system, CCD camera, ZEMAX software.

المساهمة في تطوير وتحسين تلمتر الليزر في البيئة المائية

ملخص :

يستخدم ضوء الليزر في البيئات المائية (الأنهار والبحيرات) والبحار (البحار والمحيطات) لأغراض القياس عن بعد والتقاط الصور. النقطة المشتركة بين جهاز تلمتر ونظام التصوير في الماء هو جهاز إرسال الليزر. على عكس الغلاف الجوي، فإن نشر شعاع الليزر في الماء له توهين أكبر بكثير وحيث يمكن أن يتفاوت معامل التوهين إلى $2,190 \text{ م}^{-1}$ (مياه البحر العكرة). هذا يعني أنه يجب إجراء اختيار جيد على نوع مصدر الليزر ونظام الكشف الذي يشكل جهاز الاستقبال. في هذه الأطروحة، تم إيلاء اهتمام خاص لمصدر الليزر هذا، إلى تلسكوب الاستقبال المرتبط بنظام الكشف عن النطاق الخاص به؛ وجهاز استقبال نظام التصوير بالليزر في الماء. أثناء استنساخ بيئة الانتشار الفعلية، قد أجريت محاكاة لملاحظة استجابة التلسكوب المستقبل في أنواع مختلفة من الماء (W1 و W2 و W3) تم تحديد معاملات التوهين الخاصة بها تجريبياً ($0,130 \text{ م}^{-1}$ و $0,343 \text{ م}^{-1}$ و $0,580 \text{ م}^{-1}$). نتائج المحاكاة والتجربة في اتفاق جيد. من حيث التصوير بالليزر، تم غمر العديد من أشكال الأجسام في البيئة المائية، وقد سمح استخدام كاميرا CCD عادية، مقترنة بخوارزمية معالجة الصور التي تم تطويرها، لإعادة إنتاج صورهم وملفات تعريف D2 في المياه المظلمة.

كلمات مفتاحية : القياس عن بعد والتصوير بالليزر في الماء؛ نظام الكشف؛ كاميرا CCD؛ برنامج ZEMAX.