



Université de Toulouse

MASTER 2 GEOMATIQUE

« Sciences Géomatiques en environneMent et Aménagement » (SIGMA)

<http://sigma.univ-toulouse.fr>

MEMOIRE DE RECHERCHE

Étude des facteurs contrôlant la profondeur maximale de mesure bathymétrique par LiDAR aéroporté

Baptiste Feldmann

Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes
-UMR 6118 Géosciences-



Maître de stage : Dimitri Lague
Tuteur-enseignant : Mathieu Fauvel

Septembre 2018

Résumé

L'étude des facteurs qui influencent la profondeur maximale de mesure bathymétrique constitue un enjeu majeur pour la compréhension des limites des levés LiDAR aéroportés topo-bathymétrique. La plateforme de recherche topo-bathymétrique Nantes-Rennes réalise depuis 2015 des campagnes de levés bathymétriques par LiDAR aéroporté. Les données collectées au cours des projets de recherches constituent un ensemble d'échantillons possédant des caractéristiques diverses et représentant trois types d'environnement aquatiques distincts : le domaine côtier, les rivières et les lacs. Le but de ce travail de recherche est d'identifier les principaux facteurs limitants la profondeur maximale de mesure et de quantifier leurs impacts. Une chaîne de traitements Matlab a été adaptée en Python. Elle permet la classification des nuages de points bruts. De plus, les positions des points bathymétriques sont corrigées des effets de réfraction.

La méthodologie utilisée pour ce projet s'appuie sur les travaux de [Guenther \(1985\)](#) qui décrit le comportement du faisceau laser dans l'eau, et [Abdallah et al. \(2012\)](#) qui propose un modèle physique de décomposition du signal laser (Wa-Lid). Différents facteurs limitants sont étudiés à partir d'échantillons collectés, selon une version simplifiée du modèle physique Wa-Lid. L'impact de la turbidité de l'eau est quantifié en analysant le coefficient d'atténuation diffus de l'eau traversé par le faisceau laser. La réflectance du fond est observée par le calcul du ratio d'intensité entre une surface sèche et une surface immergée. L'impact de la hauteur de vol est analysé à l'aide d'échantillons représentant la même zone à des altitudes différentes. Enfin, l'impact de l'angle d'émission est étudié à partir des gammes d'angles utilisées lors de différents vols. Ces analyses sont complétées par une étude du coût d'un levé LiDAR en fonction de la stratégie appliquée.

Les résultats obtenus sont qualifiés statistiquement dans le but de connaître la significativité de chaque critère. Enfin, Les observations sont comparées par rapport au modèle utilisé et aux travaux précédents.

Mots-clés : LiDAR aéroporté, bathymétrie, géomatique, Rennes, lasergrammétrie

Abstract

The study of the factors controlling the maximum depth of measurement forms a major issue for understanding the limits in LiDAR bathymetric surveys. Since 2015, the Nantes-Rennes topo-bathymetric research platform has been performing bathymetric surveys using airborne LiDAR. The data collected during research projects form a set of samples with different characteristics and representing three different types of aquatic environment: coastal environment, rivers and lakes. The purpose of this work is to identify the main limiting factors on maximum depth of measurement and to quantify their impact. A chain of Matlab treatments has been adapted in Python and allows the classification of raw points clouds. Moreover, the positions of bathymetric points are corrected for refractive effects.

The methodology established for this project is based on the work of [Guenther \(1985\)](#) which describes the behavior of laser beam in water, and [Abdallah et al. \(2012\)](#) which proposes a physical model of laser signal decomposition (Wa-Lid). Different limiting factors are studied from collected samples, according to a simplified version of Wa-Lid physical model. The impact of water turbidity is quantified by analyzing diffuse attenuation coefficient of the water passed through by the laser beam. The bottom reflectance is observed by compute intensity ratio between a dry surface and a submerged surface. The impact of flight height is analyzed using samples representing the same area but at different altitudes. Finally, impact of emission's angle is studied from the range of angles that are used during projects. These analyzes are complemented by a study of cost of a LiDAR survey according to strategy applied.

The results obtained are qualified statistically to know the significance of each criterion. Finally, observations are compared with the model used and previous work.

Key words: airborne LiDAR, bathymetry, geomatics, Rennes, lasergrammetry

Reference :

Abdallah, H., Baghdadi, N., Bailly, J. S., Pastol, Y., & Fabre, F. (2012). Wa-LiD: A new LiDAR simulator for waters. *IEEE Geoscience and remote sensing letters*, 9(4), 744-748.

Guenther, G. C. (1985). *Airborne laser hydrography: System design and performance factors*. NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION ROCKVILLE MD.

Remerciements :

Ce mémoire aura été un travail de longue haleine que je n'aurais pas pu mener à bien sans l'aide de plusieurs personnes que je souhaite remercier.

Je tiens tout d'abord à remercier mon maître de stage, Dimitri Lague pour sa disponibilité, ses réflexions et ses conseils avisés tout au long de ce stage. Il m'a permis de me familiariser avec les géosciences et plus particulièrement sur l'étude des données bathymétriques.

Je remercie le personnel de l'équipe de recherche Dynamique, Imagerie et Modélisation des Systèmes Environnementaux. L'équipe DIMENV dans laquelle j'ai effectué mon stage m'a accueilli chaleureusement. Je tiens à remercier l'ensemble du personnel ainsi que les doctorants pour leur bonne humeur et leur disponibilité au quotidien. Ils ont été des éléments importants pour travailler dans un environnement serein et une atmosphère amicale.

Je souhaite aussi remercier mes collègues de promo de ce Master II géomatique SIGMA pour leur aide tout au long de ce stage et de l'année qui vient de s'écouler. Cette année de spécialisation en géomatique m'a permis d'apprendre de nouvelles choses et d'aborder les thématiques de l'ingénieur géomètre-topographe sous un autre angle. Ce fut une année chargée et difficile, la solidarité entre les étudiants m'a permis d'aborder de la meilleure des manières ce stage de fin d'études. Ce mémoire est pour moi l'aboutissement d'une année riche en rencontre qui marquera aussi bien ma vie professionnelle que personnelle.

Enfin, je tiens aussi à partager ma gratitude à ma famille et mes amis pour leur soutien sans faille tout au long de mes études. A mes parents, mon frère et ma sœur, pour leur soutien dans les moments difficiles et pour les conseils qu'ils m'ont apportés. A mes grands-parents, pour m'avoir toujours soutenu tout au long de mes études. Ce stage et cette année de Master II SIGMA sont pour moi l'achèvement d'un projet initié il y a bientôt 10 ans. Durant tout ce temps, ma famille et mes amis m'ont toujours poussé à faire ce qui me passionne et ont su me dire les bons mots dans les moments de doute. Ils ont ainsi participé au bon déroulement de ce stage mais aussi au bon déroulement de toutes ces années d'études et je souhaite les remercier.

Liste des abréviations :

ALS : Aerial Laser Scanning (Laser scanner aérien)

CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique

DIMENV : Dynamique, Imagerie et Modélisation des systèmes Environnementaux

EPSG : European Petroleum Survey Group

FMS : Flight Management Suite (logiciel Optech pour la planification de vol)

FOV : Field Of View (angle de balayage LiDAR)

FWF : Full WaveForm (retour d'onde complet)

GNSS : Global Navigation Satellite System (système mondial de navigation par satellite)

GPS : Global Positioning System (système de positionnement par satellite, Etats-Unis)

IMU : Inertial Measurement Unit (Unité de Mesure Inertielle)

LiDAR : Light Detection And Ranging

MES : Matières En Suspension

MNT : Modèle Numérique de Terrain

NTU : Nephelometric Turbidity Unit (Unité de turbidité néphélogométrique)

OSUNA : Observatoire des Sciences de l'Univers de Nantes

OSUR : Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes

PPP : Precise Point Positioning (méthode de calcul de la position)

PRF : Pulse Repetition Frequency (Fréquence de tir des impulsions laser)

RTK : Real Time Kinematic (méthode de calcul de la position)

SBET : Smoothed Best Estimate of Trajectory (Fichier de trajectoire de l'avion)

SVM : Support Vector Machine

TLS : Terrestrial Laser Scanning (Laser scanner terrestre)

UMR : Unité Mixte de Recherche

Tables des matières

I. Introduction	6
II. Etat de l'art	8
II.1 Principes physiques	8
II.1.1 Système de mesure	8
II.1.2 Retour d'onde complet et échos discrets	10
II.1.3 Physique de la propagation du laser	10
II.2 Modèle d'intensité réfléchie au fond de la tranche d'eau	12
II.3 Facteurs impactant la profondeur atteinte et la qualité des levés topo-bathymétriques ...	14
II.3.1 Propriétés optiques de l'eau	15
II.3.2 Réflectance du fond.....	17
II.3.3 Séparabilité des échos de surface et de fond.....	19
II.3.4 Méthodes de traitement des données LiDAR bathymétrique	19
II.4 Conclusion sur l'état de l'art	21
III. Méthodes	22
III.1 Instrument.....	22
III.2 Le fichier de trajectoire	24
III.2.1 Présentation du fichier SBET	24
III.2.2 Traitements sur le fichier de trajectoire.....	25
III.2.3 Utilisation des données de trajectoire	26
III.3 Classification du nuage de points.....	27
III.3.1 Détection de la surface d'eau.....	28
III.3.2 Détection de la bathymétrie	29
III.4 Les données.....	33
III.5 Méthode d'analyse des données	35
III.5.1 Turbidité de l'eau :	36
III.5.2 Réflectance des surfaces :	38
III.5.3 Dépendance de l'intensité à la hauteur de vol :.....	38
III.5.4 Dépendance de l'intensité à l'angle d'émission :	39

IV. Résultats	39
IV.1 Classification.....	39
IV.2 Caractéristiques de l’environnement survolé	41
IV.2.1 Propriétés optiques de l’eau :	41
IV.2.2 Réflectance du fond :.....	48
IV.3 Caractéristiques du vol.....	49
IV.3.1 Hauteur de vol :.....	49
IV.3.2 Angle d’émission :.....	50
IV.3.3 Coût d’un levé LiDAR	51
V. Discussion	54
V.1 Caractéristiques de l’environnement survolé	54
V.1.1 Propriétés optiques de l’eau :	54
V.1.2 Réflectance du fond :.....	57
V.2 Caractéristiques du vol.....	57
V.2.1 Hauteur de vol :.....	57
V.2.2 Angle d’émission :.....	58
V.2.3 Coût d’un levé LiDAR :	59
VI. Conclusion et perspectives	60
VII. Références bibliographiques.....	61
VIII. Liste des figures.....	62
IX. Liste des tableaux.....	63
X. Liste des équations.....	63
XI. Annexes	64
Annexe 1 : Module Python pour le traitement du fichier SBET :	64
Annexe 2 : Tableau des ratios d’intensités :.....	68
Annexe 3 : Données utilisées sur l’étude de la hauteur de vol :	69
Annexe 4 : Autres échantillons :.....	71
Annexe 5 : Tableau récapitulatif des échantillons étudiés :.....	73

I. Introduction

Ce mémoire a pour but de présenter le travail effectué au cours du stage réalisé dans le cadre du Master 2 Géomatique SIGMA. Ce stage porte sur l'étude des facteurs contrôlant la profondeur maximale de mesure bathymétrique par LiDAR aéroporté dans différents environnements aquatiques (rivières, lacs, domaine côtier). Ce travail de recherche a été encadré par Dimitri Lague et réalisé à l'OSUR (dans l'antenne de l'Université de Rennes 1), dans l'UMR 6118 Géosciences Rennes, au sein de l'équipe DIMENV.

Les Observatoires des Sciences de l'Univers (OSU) sont un ensemble d'institutions territoriales reliées au CNRS. Ils abritent un certain nombre d'UMR qui ont pour but d'après la définition du CNRS, « d'organiser les moyens nécessaires à l'acquisition d'observations des systèmes astronomiques ou des composantes du système Terre ». Il y a en tout en France métropolitaine et en Outre-mer, 28 OSU. L'OSUR est basé à Rennes et regroupe en 2016, 260 chercheurs et enseignants-chercheurs, 181 doctorants, 140 ingénieurs, techniciens et personnels administratifs permanents et 91 autres personnels non-permanents. Cette institution est divisée en cinq UMR :

- UMR 6118 Géosciences Rennes
- UMR 6553 Ecosystèmes, Biodiversité, Evolution
- UMR 6566 Centre de recherche en archéologie, archéosciences et histoire
- UMR 6254 Littoral, Environnement, Télédétection et Géomatique
- UMR 6251 Institut de Physique de Rennes

L'UMR Géosciences Rennes dans lequel j'ai effectué ce stage, comprend 137 personnels permanents. Il est constitué notamment de cinq équipes de recherche :

- Biodiversité, Interactions, Préservations, Evolution
- Dynamique, Imagerie et Modélisation des systèmes Environnementaux
- Nano-BioGéochimie
- Paléoenvironnement, Paléomagnétisme, Dynamique des Bassins
- Tectonique, Terre, Temps, Traçage

L'équipe DIMENV regroupe actuellement 22 personnels permanents, 8 personnels non-permanents et 17 doctorants. Il s'agit d'une équipe constituée de spécialistes travaillant sur des thématiques diverses en géosciences. Principalement sur la datation des eaux souterraines, en géophysique, sur le transport sédimentaire et l'évolution des paysages, sur le transfert des fluides, en modélisation numérique des fractures et en télédétection.

Ce stage de fin d'études porte sur une problématique actuelle qui est l'étude des facteurs impactant la profondeur maximale de mesure bathymétrique avec l'instrument LiDAR aéroporté Optech Titan. Il s'agit d'un enjeu majeur pour la recherche en lasergrammétrie car la compréhension de ces facteurs permet d'une part, d'évaluer la faisabilité d'un vol bathymétrique et d'améliorer la cartographie des zones immergées et d'autre part, d'analyser la turbidité de l'eau des zones aquatiques survolées. Les données LiDAR topo-bathymétriques peuvent ainsi servir à de nombreux projets de recherche en géosciences, en hydrologie ou bien sur le transfert des sédiments. De plus, ces données peuvent aussi être utiles aux collectivités territoriales où le besoin de connaître l'évolution du trait de côte et des cours d'eau devient une problématique de plus en plus importante pour la gestion des risques et l'aménagement des territoires.

Ce travail de recherche sur l'analyse des données LiDAR bathymétriques a été effectué à l'aide d'un ensemble d'échantillons. Ces échantillons ont été acquis au cours de différents projets réalisés par la plateforme de recherche LiDAR topo-bathymétrique dans laquelle j'ai effectué ce stage. Cette plateforme de recherche est constituée de deux entités :

- La première, dirigée par Patrick Launeau spécialiste en imagerie hyperspectral, est située à l'OSUNA (Université de Nantes) au sein du laboratoire de Planétologie et de Géodynamique.
- La seconde dans laquelle j'ai effectué mon stage, dirigée par Dimitri Lague spécialiste en géomorphologie fluviale et en lasergrammétrie, est située à l'OSUR (Université Rennes 1) au sein de l'UMR 6118 Géosciences Rennes.

Cette plateforme de recherche a été créée en 2015 par l'acquisition d'un LiDAR aéroporté. L'objectif était alors de pouvoir acquérir des données pour l'étude géomorphologique du domaine côtier mais aussi des rivières dans le cadre de projets de recherche de Nantes et Rennes. Mais aussi, pour mettre à disposition auprès du secteur académique et privé l'instrument afin d'acquérir des données dans le cadre d'autres projets de recherche en France ou bien à l'étranger. Cette plateforme de recherche fonctionne en collaboration étroite avec la société de géomètres-experts GEOFIT. Il s'agit d'une société basée à Nantes spécialisée notamment en photogrammétrie et en lasergrammétrie, avec la capacité d'acquérir des données LiDAR aéroporté.

Le LiDAR bathymétrique est une technologie en plein expansion. Il s'agit d'un domaine de la lasergrammétrie qui existe depuis les années 1970 avec l'apparition des premiers systèmes pour l'étude des océans. Depuis, ses applications se sont diversifiées allant de la métrologie à la géophysique avec des systèmes satellitaires notamment ([Mallet et Bretar, 2009](#)). Le LiDAR aéroporté est aujourd'hui très utilisé dans la recherche en géosciences mais aussi par des sociétés privées afin de fournir une cartographie précise d'une zone survolée. La littérature actuelle dans le domaine du LiDAR bathymétrique se concentre sur l'étude du domaine côtier. La mise sur le marché il y a environ 5 ans de nouveaux instruments LiDAR dits topo-bathymétrique plus spécifiquement dédiés aux corridors fluviaux offre un champ nouveau pour cette technologie qui ne cesse de se renouveler aussi bien dans les capacités instrumentales que dans les capacités de calculs offertes par les logiciels de traitements.

Ce projet consiste donc à analyser les données collectées au cours des différents levés réalisés par la plateforme de recherche depuis 2015. A partir de ces nuages de points, un ensemble de traitements devra être mis en place afin d'étudier la variation de la profondeur maximale atteinte selon différents facteurs. L'enjeu est d'identifier ces facteurs à l'aide des travaux déjà effectués dans le domaine. Puis, ces différents facteurs seront analysés de manière empirique à partir des jeux de données collectées. Enfin, le but sera de quantifier l'influence de ces principaux facteurs et de comparer les résultats par rapport aux prédictions du modèle utilisé.

Ce travail de recherche va se dérouler en plusieurs étapes. Tout d'abord, une présentation de l'état de l'art du domaine d'étude avec une présentation des différents travaux réalisés précédemment. Une phase de présentation de la chaîne de traitement mise en place pour la classification des données et la préparation des échantillons. Une phase de présentation des résultats obtenus pour les méthodes d'analyses mises en place. Enfin, une phase d'analyse des résultats et de comparaison par rapport à la littérature afin de valider ou non les hypothèses et modèle utilisés.

II. Etat de l'art

II.1 Principes physiques

II.1.1 Système de mesure

Le principe du scanner laser aéroporté (ALS) est décrit par exemple dans l'article [Vallet \(2011\)](#) où l'auteur différencie notamment le fonctionnement du faisceau laser et les différents types de balayage, ainsi que le géoréférencement du nuage de points 3D.

II.1.1.1 Fonctionnement

Le principe du LiDAR est une technique de télédétection active qui se base sur une mesure de distance entre l'instrument et l'objet à partir d'un faisceau laser ([Mallet et Bretar, 2008](#)). Pour le LiDAR aéroporté, la technique de mesure de la distance se base sur la mesure du temps de vol d'une impulsion laser. C'est-à-dire que l'instrument émet un pulse en direction de l'objet visé et l'instrument mesure le temps de propagation aller-retour du pulse ([Mallet, 2010](#)).

La distance se calcule alors par la relation :

$$d = \frac{c \times t}{2}$$

Équation 1 : distance aller-retour parcourue par un pulse laser.

c : vitesse de la lumière dans l'air (en m.s⁻¹)

t : le temps de vol aller-retour (en s)

d : la distance entre l'instrument et l'objet (en m)

L'instrument émet donc des pulses à une certaine fréquence (entre 50 et 300 kHz) à l'aide d'un miroir qui permet de balayer selon plusieurs types : rotatif, oscillant ou elliptique (voir Figure 1).

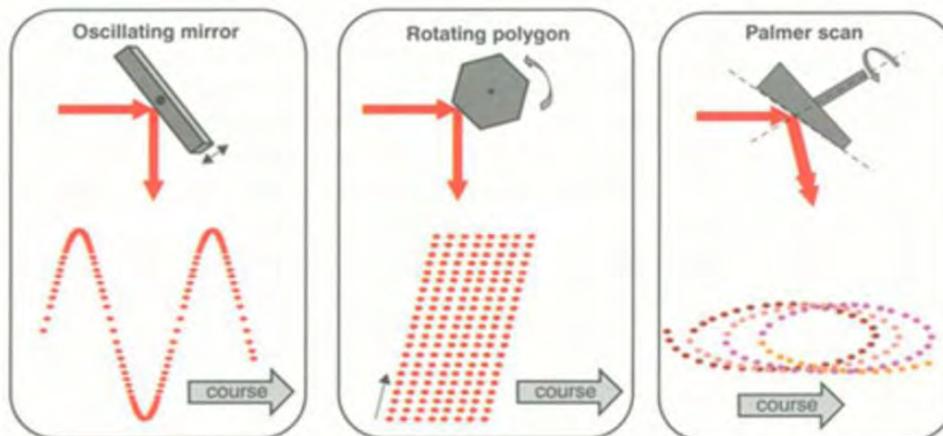


Figure 1 : Les types balayage. D'après Ba (2017)

La position relative (par rapport à l'instrument) du point est alors connu en coordonnées polaires à partir de la distance mesurée et de l'angle d'émission du pulse.

Chaque pulse émit (et détecté en retour) correspondra alors à un ou plusieurs points au sol. Grâce au déplacement de l'instrument embarqué dans un avion ainsi que du mouvement du miroir qui permet de balayer une grande surface au sol, on obtiendra un nuage de points qui représente la surface au sol que l'avion survole.

II.1.1.2 Géoréférencement

Dans le but de connaître la position des différents points dans un référentiel standardisé, il est nécessaire de procéder à un géoréférencement direct (voir Figure 2).

Cette étape est réalisée à l'aide d'un système composé de deux instruments :

- Un récepteur GNSS bi-fréquence : permet d'obtenir la position ainsi que la vitesse de l'instrument. Pour cela, plusieurs techniques existent comme par exemple le RTK avec un pivot positionné au sol, ou bien par PPP qui à l'avantage de ne pas demander d'avoir un pivot au sol
- Une centrale inertielle (IMU) : composée de trois accéléromètres et gyroscopes afin de mesurer en 3D l'accélération et la vitesse angulaire (roulis, tangage, lacet) au cours du temps à une fréquence variante entre 100 et 400 Hz (Vallet, 2011).

Les mesures GNSS ainsi que les mesures de l'IMU sont intégrées à l'aide d'un filtre de Kalman afin de fournir la position absolue de l'instrument et son orientation au cours du temps.

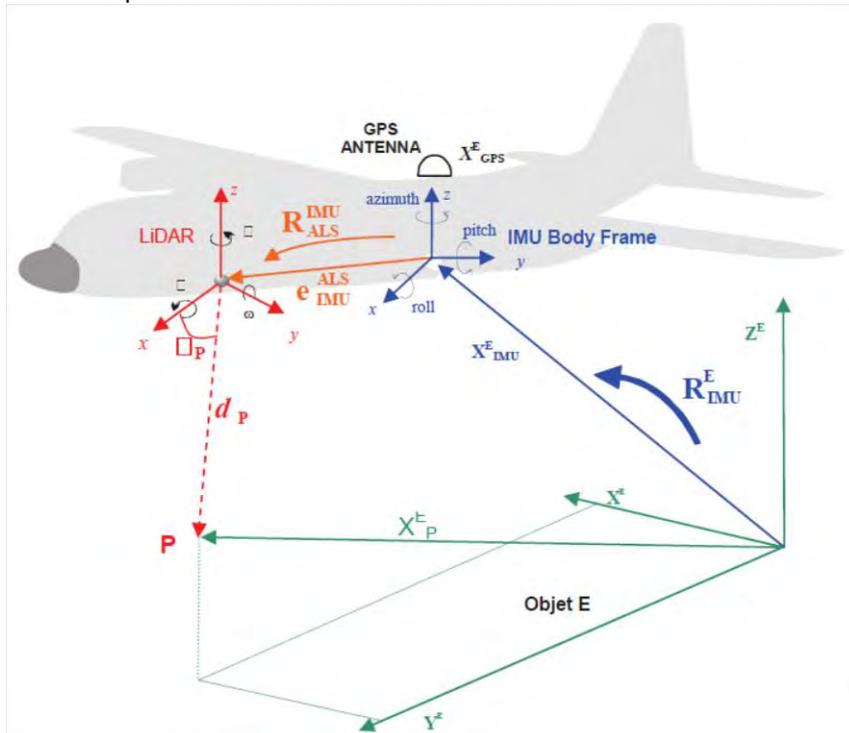


Figure 2 : Système de géoréférencement. D'après Vallet (2011)

On obtient alors la position absolue d'un point au sol à l'aide de la relation suivante :

$$X_P^E = X_{IMU}^E + R_{IMU}^E \times R_{ALS}^{IMU} \times (e_{IMU}^{ALS} + R(\alpha_P) \times d_P)$$

Équation 2 : géoréférencement des données LiDAR.

Avec :

X_P^E : Position du point P dans le référentiel terrain (Objet E) ;

X_{IMU}^E : Position du centre de navigation de l'IMU dans le repère E (donné par le récepteur GNSS par la relation suivante : $X_{IMU}^E = X_{GNSS}^E + R_{IMU}^E \times e_{IMU}^{GNSS}$) ;

R_{IMU}^E : Matrice de rotation entre le référentiel IMU et le référentiel terrain. Donnée à l'aide des mesures angulaires de l'IMU : roulis (roll), tangage (pitch) et lacet (azimut) ;

R_{ALS}^{IMU} : Matrice de rotation entre le référentiel IMU et l'instrument LiDAR (ALS) ;

e_{IMU}^{ALS} : Bras de levier entre la centrale inertielle et l'instrument LiDAR (ALS) ;

e_{IMU}^{GNSS} : Bras de levier entre la centrale inertielle et le récepteur GNSS ;

$R(\alpha_P)$: Vecteur de tir du faisceau laser au moment de l'émission du pulse (en fonction de l'angle de tir α_P) ;

d_P : Distance calculée par l'instrument par mesure du temps de vol aller-retour du pulse émit.

II.1.2 Retour d'onde complet et échos discrets

On a vu précédemment que la technique de laser scanner aéroporté (ALS) consiste en l'utilisation d'un faisceau laser pour mesurer une surface. Les premiers systèmes LiDAR développés consistaient en la détection d'un seul point dès que le signal retour dépassait un certain seuil d'intensité ([Mallet et Bretar, 2008](#)). Cette technique suppose alors que l'aire illuminée ne présente qu'une seule cible. Or dans beaucoup de cas, un certain nombre d'objets se trouveront sur le chemin de l'impulsion laser (végétation, bâtiments, surface d'eau, etc...) qui vont impacter le signal laser (par des effets de réflexion, rétrodiffusion et d'atténuation). Pour résoudre ces problèmes, d'autres systèmes LiDAR ont été développés et permettent de détecter plusieurs pics d'intensité dans le signal retour pour chaque impulsion ([Thiel et Wehr, 2004](#)). Enfin, une autre catégorie de système LiDAR enregistre la totalité du signal retour (le retour d'onde complet ou FWF). Cette dernière catégorie permet par exemple l'analyse fine de la végétation et de sa structure ([Blair et al., 1999](#)) mais aussi permet la mesure des fonds sous-marin ([Guenther, 1985](#)).

Ces deux derniers types de LiDAR constituent la majorité des systèmes utilisés actuellement ([Mallet et Bretar, 2008](#)). La différence entre le système « retour d'onde complet » et le système « échos discrets » peut s'illustrer à l'aide de la figure suivante :

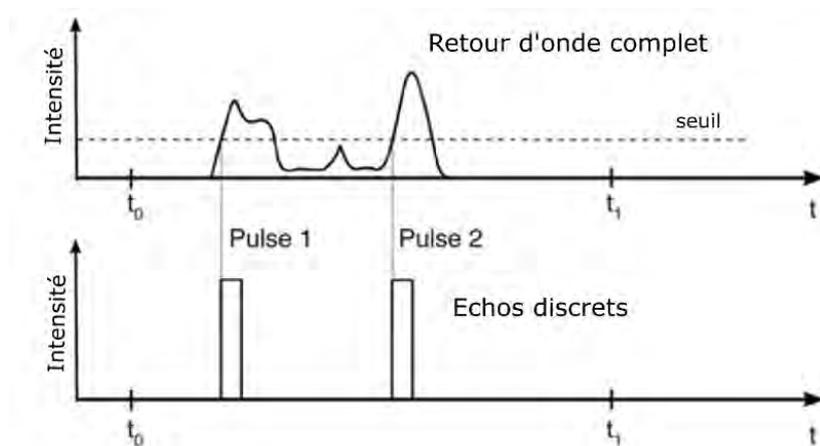


Figure 3 : Différence de réception d'une impulsion laser, entre le retour d'onde complet et les échos discrets. D'après Mallet et al. (2008).

Les échos discrets correspondent à la discrétisation du signal reçu par le capteur après seuillage sur l'intensité. C'est-à-dire que l'instrument détectera un point lorsque l'intensité du signal retour dépassera un certain seuil. Dans le cas d'un levé bathymétrique, la profondeur maximale de mesure correspondra à la profondeur à laquelle l'intensité réfléchie sera égale au seuil de détection de l'instrument.

Pour ce travail de fin d'études, on s'intéresse aux données LiDAR des échos discrets.

II.1.3 Physique de la propagation du laser

La technologie du scanner laser aéroporté est principalement utilisée dans des contextes topographiques en utilisant un faisceau laser avec des longueurs d'ondes dans le proche infrarouge (typiquement 1064 ou 1550 nm). Néanmoins, des systèmes LiDAR ont été développés aussi pour l'hydrographie ([Guenther, 1985](#)). Les LiDAR bathymétriques utilisent un faisceau laser avec une longueur d'onde entre 450 nm et 550 nm (bleu et vert) afin de pénétrer au mieux l'eau ([Jerlov, 1976](#)).

Lorsqu'une onde électro-magnétique se propage dans un milieu non-vidé, on observe une atténuation du signal par le milieu traversé. Cette baisse d'intensité dépendra de nombreux facteurs différents. Ainsi, dans l'article de *Kashani et al. (2015)*, les auteurs distinguent plusieurs classes de facteurs lorsqu'une impulsion laser se propage dans l'air :

- Selon les caractéristiques intrinsèques de l'instrument
- Selon les caractéristiques de la surface cible : sa réflectance et sa rugosité
- Selon les conditions de l'émission du pulse : la hauteur de vol et l'angle de tir par rapport à la verticale
- Selon les propriétés optiques de l'air : sa transmittance et son humidité

Dans un second temps, lorsque l'impulsion laser se propage dans l'eau, plusieurs effets sont observés qui viennent modifier l'intensité du signal ou bien modifier sa trajectoire (voir Figure 4) :

- Tout d'abord, au niveau de l'interface entre l'air et l'eau. Une partie du signal sera réfléchié et dépendra de l'état de la surface d'eau, c'est-à-dire, de sa rugosité. De plus, la différence d'indice de réfraction entre l'air et l'eau entrainera des effets de réfraction du faisceau laser.
- Ensuite, durant la traversée (aller et retour) de la colonne d'eau, on observe une atténuation/diffusion ainsi qu'une rétrodiffusion du signal qui dépendra du coefficient d'atténuation diffus (K_d) de l'eau traversée.
- Enfin, au niveau du fond, une partie du signal sera réfléchié par l'objet, son l'albédo et sa géométrie.

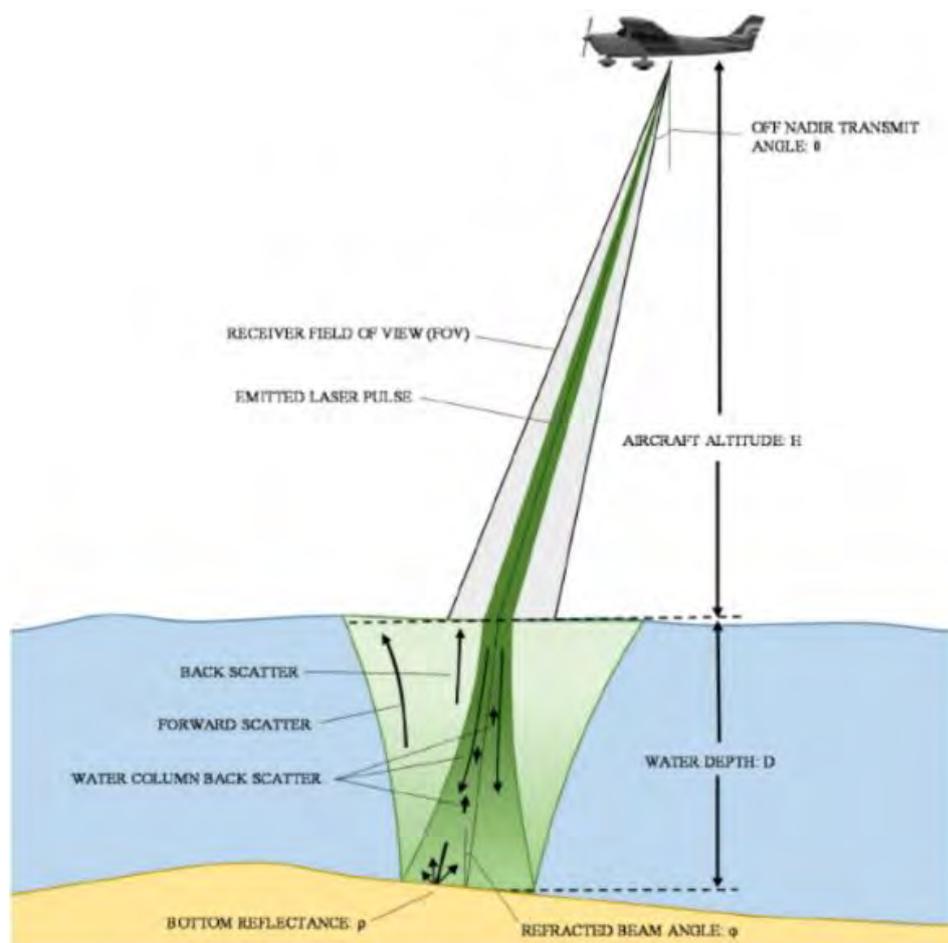


Figure 4 : Schéma de la propagation du laser dans l'eau. D'après *Kashani et al. (2015)*.

Dans le cas d'un levé bathymétrique, le signal LiDAR est principalement atténué à trois endroits différents : la surface d'eau, la colonne d'eau et le fond (*Mobley, 1994*). Dans chacun de ces trois cas, une partie du signal va être réfléchi (ou bien rétrodiffusé) en direction de l'avion et pourra être détectée par le capteur. Le système LiDAR va alors détecter plusieurs échos correspondant à chacune de ces trois réflexions (voir Figure 5).

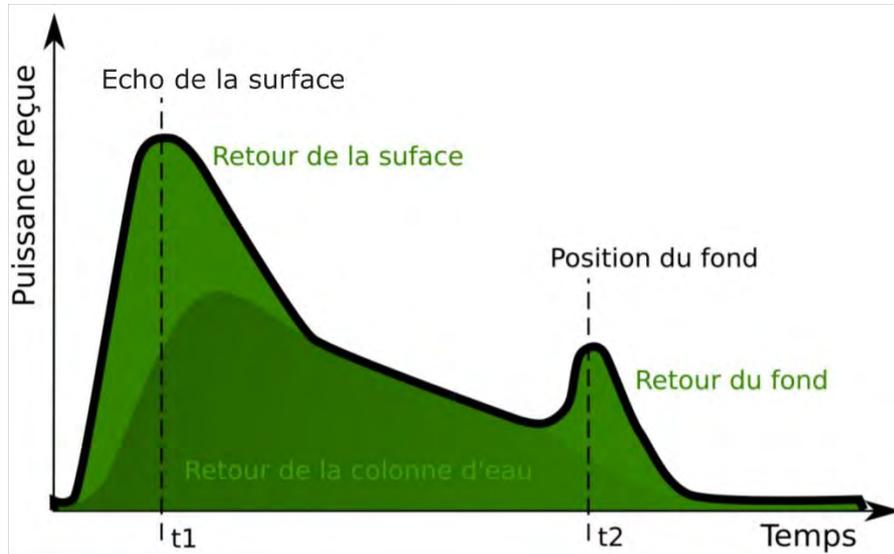


Figure 5 : Schéma du signal retour pour le LiDAR bathymétrique. D'après Allouis et al. (2010).

D'après la Figure 5, on remarque que la discrétisation de ce type de signal bathymétrique reçu par le capteur pourra contenir plusieurs pics pour chaque impulsion laser :

- Le premier point correspondra à la surface d'eau
- Un point correspondant à la rétrodiffusion de la colonne d'eau
- Enfin, un dernier point correspondant au fond.

Néanmoins, dans certains cas qui seront détaillés dans la suite de ce mémoire, il est possible que le signal retour soit trop faible pour pouvoir détecter soit le pic de la surface d'eau, soit la rétrodiffusion de la colonne d'eau soit le pic du fond ou bien les trois.

II.2 Modèle d'intensité réfléchi au fond de la tranche d'eau

Dans le cadre de ce travail de fin d'études, on s'intéresse à l'intensité mesurée par l'instrument pour l'écho discret correspondant au fond. Dans l'article *Abdallah et al. (2012)*, les auteurs proposent un modèle physique (Wa-LID) qui permet de modéliser l'intensité retour correspondant au pic du fond bathymétrique. Ce modèle prend en compte différents facteurs impactant la propagation du laser dans l'air et dans l'eau.

Ce modèle s'écrit sous la forme suivante :

$$P_b = \frac{P_e T_{atm}^2 A_R \eta_e \eta_R F (1 - L_S)^2 R_b}{\pi \left(\frac{n_w H + Z}{\cos \theta} \right)^2} e^{\frac{-2K_d Z}{\cos \theta_w}}$$

Équation 3 : Modèle physique Wa-Lid : relation d'intensité pour l'écho du fond.

Avec :

P_b : la puissance reçue par le capteur issu du fond de l'eau

P_e : la puissance émise par le système LiDAR

T_{atm} : facteur de perte atmosphérique

A_R : aire d'ouverture (en m^2)

η_e et η_R : respectivement efficacité optique de l'émission et de la réception

F : facteur de perte lié à l'angle de balayage

L_S : facteur de perte lié au passage du laser à travers la surface d'eau

R_b : réflectance de la surface cible au fond de l'eau

H : altitude de vol (en m)

Z : profondeur d'eau (en m)

n_w : indice de réfraction de l'eau

θ et θ_w : respectivement angle d'incidence et angle réfracté (en rad)

K_d : coefficient d'atténuation diffus (en m^{-1})

On remarque pour ce modèle physique, que les variables peuvent être classées selon leurs natures et leurs influences :

- P_e , A_R , η_e et η_R : ces variables correspondent aux paramètres intrinsèques de l'instrument et sont considérées pour ce travail de recherche comme constantes lorsque le même instrument est utilisé pour chaque levé LiDAR
- T_{atm} et n_w : ces variables correspondent à des paramètres optiques de l'environnement survolé (respectivement l'air et l'eau). Ainsi, ces variables sont considérées pour ce travail de recherche comme constantes en posant l'hypothèse que lors d'un levé LiDAR, les propriétés optiques de l'air et le coefficient de réfraction de l'eau vont relativement peu changer au cours du temps et d'un levé LiDAR à l'autre.
- F , H et θ : ces variables correspondent aux paramètres de l'instrument propre à chaque levé LiDAR. Ces variables sont définies lors de la préparation du plan de vol. Elles définissent les conditions d'émission du pulse laser et seront étudiés par la suite.
- L_S , R_b , Z et K_d : ces variables correspondent aux propriétés optiques de l'eau et de la réflectance du fond (pour le paramètre R_b). Ces variables ont fait l'objet de plusieurs articles qui seront détaillés par la suite.

Dans l'article de [Abdallah et al. \(2012\)](#), le modèle physique Wa-LID qui est présenté consiste en un simulateur LiDAR pour des lasers entre 300 nm et 1500 nm de longueur d'onde. Cette méthode prend en compte les caractéristiques de l'instrument, les propriétés optiques de l'air et de l'eau ainsi que les caractéristiques de l'objet visé. Ce simulateur se base sur le principe de la décomposition de la puissance du signal reçue en une somme de puissance liée au comportement du faisceau laser sur les différents milieux et interfaces rencontrés : la réflexion de la surface d'eau, la rétro-diffusion de la colonne d'eau (qui prend en compte les effets d'atténuation selon les propriétés de l'eau), le fond de la rivière, la faible diffusion liée à la colonne d'air et le bruit résiduel.

Cette méthode demande donc un certain nombre de paramètres pour prendre en compte à la fois les caractéristiques intrinsèques du capteur mais aussi les caractéristiques du milieu (turbidité de l'eau, hauteur d'eau traversée, etc...) et du vol effectué (hauteur de vol, cadence d'émission, angle de balayage, puissance émise, etc...).

Pour tester la méthode, les auteurs vont tout d'abord analyser les résultats de leur simulateur. Pour cela, l'intensité des différents pics reçus par le simulateur va être comparée pour 3 longueurs d'ondes (350 nm, 532 nm et 1064 nm).

Ensuite, les auteurs vont comparer le rapport signal sur bruit (i.e le rapport entre l'amplitude d'un pic et l'écart-type du bruit détecté) pour les résultats de leur simulateur avec deux LiDAR existant :

- le LiDAR aéroporté topo-bathymétrique Leica-HawkEye
- le LiDAR satellitaire bathymétrique GLAS

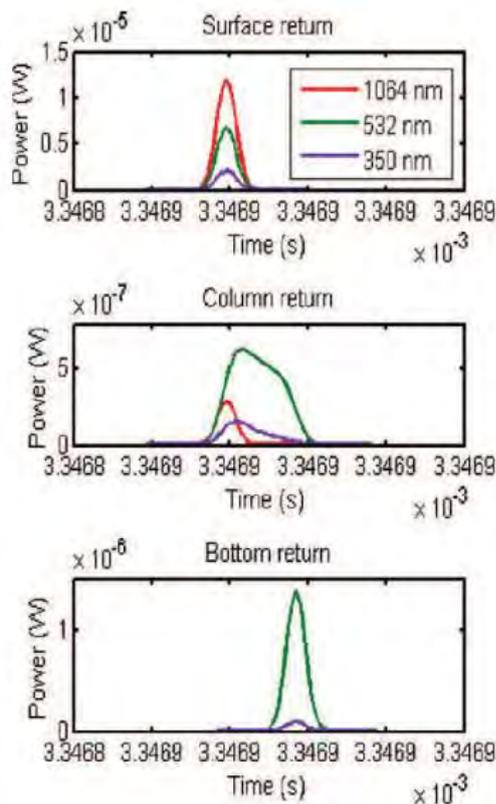


Figure 6 : signal retour LiDAR simulée. D'après Abdallah et al. (2012).

Les résultats pour leur simulateur (voir Figure 6) montrent tout d'abord que pour la détection de la surface d'eau, la longueur d'onde proche infrarouge est la plus adaptée car cette longueur d'onde permet d'avoir le pic d'intensité le plus élevé. Ensuite, pour la rétro-diffusion de la colonne d'eau, le canal vert (532 nm) présente l'intensité retour la plus importante. Néanmoins, c'est aussi le canal vert qui permet de détecter l'écho du fond le plus aisément.

On remarque donc, pour les levés LiDAR bathymétriques, il est utile d'utiliser un système avec deux canaux :

- Un canal proche infrarouge (1064 nm) afin de pouvoir détecter la surface d'eau
- Un canal vert (532 nm) afin de pouvoir détecter le fond bathymétrique

Ensuite, la comparaison des résultats entre ce simulateur et des système LiDAR existant montrent tout d'abord que le canal infrarouge (1064 nm) est influencé par la rugosité de la surface d'eau. Tandis que, le canal vert (532 nm) est influencé par le taux de particules en suspension (MES) et surtout par la réflectance du fond de rivière qui joue un rôle important dans l'amplitude enregistrée par le capteur pour cet écho.

De plus, l'étude du rapport signal/bruit montre que globalement, le simulateur fourni des résultats qui sont proches de la réalité par rapport aux tests sur la capacité du simulateur à recréer un LiDAR en connaissant les caractéristiques du capteur ainsi qu'en paramétrant les caractéristiques du vol et de la rivière étudiée. Toutefois, ce modèle a été assez peu testé et sur peu d'appareils différents, il serait donc intéressant de pouvoir le tester pour ce travail de fin d'études.

II.3 Facteurs impactant la profondeur atteinte et la qualité des levés topo-bathymétriques

Dans le manuel « Airborne laser hydrography » de [Guenther \(1985\)](#), l'auteur note que le type d'environnement traversé par l'impulsion laser impacte l'intensité de l'écho retour qui sera reçu par le capteur. Dans le cas d'un levé bathymétrique, cette atténuation va alors directement impacter la profondeur maximale mesurée. Cette baisse d'intensité liée à la propagation du pulse laser dans l'air et dans l'eau va dépendre de plusieurs facteurs comme les caractéristiques de l'instrument, des conditions d'émission, de l'environnement traversé ou encore de la géométrie de l'objet ([Kashani et al., 2015](#)). Néanmoins, lors d'un levé LiDAR bathymétrique aéroporté, l'intensité du pulse laser sera le plus atténuée au niveau de sa traversé dans l'eau ([Guenther et al., 2000](#)). C'est pourquoi, les sous-parties suivantes se concentrent sur les travaux concernant les propriétés optiques de l'eau et l'impact de la réflectance du fond. Enfin, un dernier paragraphe concernera la capacité de l'instrument pour séparer les échos de surface et du fond notamment dans le cas de faible profondeur d'eau car, il s'agit aujourd'hui d'un verrou technique qui fait l'objet de plusieurs articles qui seront cités par la suite.

II.3.1 Propriétés optiques de l'eau

Dans l'article de [Guenther et al. \(2000\)](#), les auteurs indiquent que la turbidité de l'eau constitue le facteur le plus limitant pour la profondeur maximale mesurée.

La turbidité de l'eau se définit comme l'atténuation de la lumière par deux effets : la diffusion et l'absorption dans l'eau. Ces deux effets seront impactés par notamment, le taux de matières en suspension d'origine organique ou minérale ([McCarthy et al., 1974](#)).

La grandeur physique « K_d » utilisée dans le modèle Wa-Lid ([Abdallah et al., 2012](#)), permet d'approcher cette notion de turbidité en se définissant d'après [Guenther et al. \(2000\)](#) comme étant le « facteur de diminution exponentiel de l'irradiance d'une onde lumineuse incidente à travers une colonne d'eau, pour une longueur d'onde donnée ». Dans l'article [Abdallah et al. \(2012\)](#), on remarque bien l'importance de cette grandeur dans le modèle Wa-LID, puisqu'elle impacte l'intensité retour de façon exponentielle.

Toutefois, ce coefficient d'atténuation diffus correspond à une propriété optique apparente de l'eau. C'est-à-dire que la grandeur « K_d » va dépendre du milieu mais aussi de la « structure directionnelle du champ de lumière ambiant » ([Mobley, 2001](#)) contrairement aux propriétés optiques inhérentes de l'eau qui eux ne dépendent que du milieu étudié.

Ainsi, dans l'article [Mobley \(2001\)](#), l'auteur explique que même si le coefficient d'atténuation diffus est corrélé au coefficient d'absorption de l'eau, il constitue malgré tout, un bon indicateur de l'état de la colonne d'eau traversée par le faisceau laser. Mais, dans l'article [Devlin et al. \(2008\)](#), les auteurs qualifient les différentes sources d'influence du coefficient d'atténuation diffus avec l'équivalent en MES (voir Figure 7).

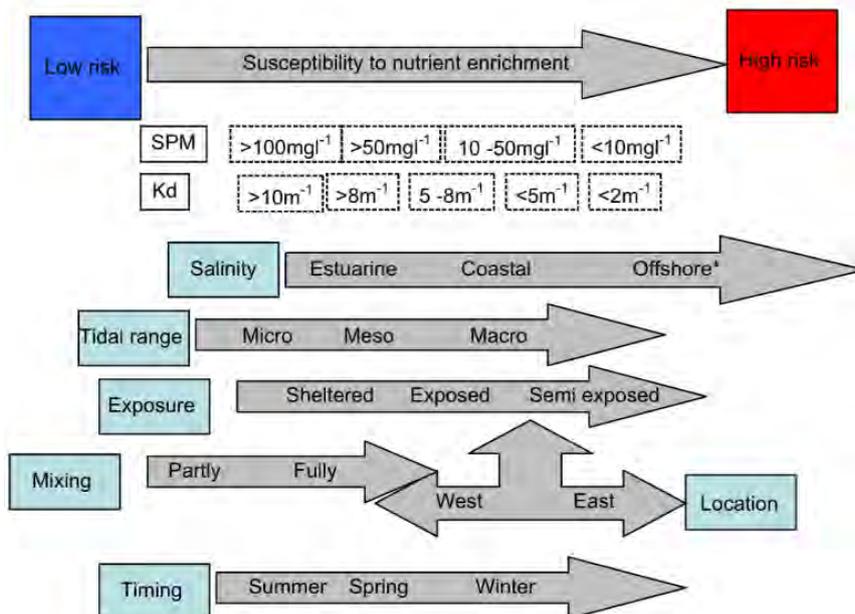


Figure 7 : Diagramme des différents facteurs d'influences du K_d . D'après Devlin et al. (2008).

La figure ci-dessus montre bien que le coefficient « K_d » va dépendre de beaucoup de facteurs différents comme par exemple la saison et le type de marée (pour les zones marines).

L'enjeu ici est donc de pouvoir quantifier ce coefficient d'atténuation diffus à un instant temps donné.

Pour cela, plusieurs techniques existent :

a) La mesure de MES :

Cette technique permet de connaître la quantité de particules en suspension. Cette méthode consiste à filtrer l'eau afin de garder toutes les particules de taille supérieure à un seuil donné. On calcule ensuite le rapport entre la « masse sèche » (i.e la masse des particules retenue par le filtrage) et le volume d'eau filtré. En connaissant le taux de MES, il est possible d'estimer la turbidité de l'eau et le coefficient d'atténuation diffus. Néanmoins, cette méthode permet de connaître avec précision le taux de MES dans l'eau mais, cette technique reste assez longue et difficile à mettre en place puisqu'on ne connaît pas dans l'instant le taux de MES.

b) Le disque de Secchi :

Cette technique permet d'évaluer de façon qualitative la turbidité de l'eau. Cette méthode se base sur la mesure de la profondeur pour laquelle un disque noir et blanc (voir Figure 8) plongé dans l'eau n'est plus visible à l'œil nu ([Tyler, 1968](#)). Néanmoins, la profondeur de Secchi ne constitue pas un bon indicateur de la performance d'un levé LiDAR bathymétrique. Car, le lien que l'on peut considérer entre cette profondeur et le coefficient d'atténuation diffus (K_d) dépendra du rapport entre l'absorption et la diffusion d'un milieu aquatique qui pourra changer spatialement et temporellement ([Gordon et Wouters, 1978](#)). De plus, cette technique va dépendre fortement de l'opérateur mais aussi du moment de la journée où la mesure sera effectuée. Toutefois, dans l'article [Devlin et al. \(2008\)](#), les auteurs présentent des relations empiriques afin de prédire la valeur du coefficient d'atténuation diffus à partir des mesures en MES et des profondeurs de Secchi pour des environnements côtiers. Les prédictions sont comparées aux vraies valeurs puis, qualifiées statistiquement en calculant la valeur de la taille d'effet (D-statistic de Cohen). Les résultats montrent qu'en moyenne, les relations empiriques permettent de prédire les valeurs de « K_d » relativement correctement avec une taille d'effet de l'ordre de 25%. Mais, pour des environnements où la turbidité est hétérogène (embouchure, rivière, zone de confluence, etc...) l'erreur sur la prédiction sera plus importante.

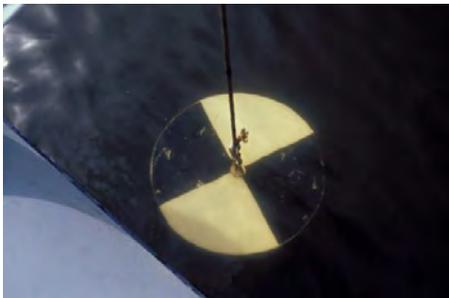


Figure 8 : Disque de Secchi. Image Association du lac du Missionnaire

c) La mesure de transmissiométrie :

Cette technique permet de mesurer l'atténuation d'un faisceau laser à travers un fluide. Le facteur de transmission ainsi mesuré permet de déduire le coefficient d'atténuation diffus pour l'eau traversée. Cette technique a l'avantage de pouvoir réaliser l'expérience pour une certaine longueur d'onde et ainsi pouvoir mieux appréhender le comportement du LiDAR dans le canal du 532 nm. Néanmoins, cette technique est aussi difficile à mettre en œuvre car elle nécessite un matériel adapté.

d) La mesure néphélogéométrique :

Cette technique permet de mesurer le taux de particules en suspension dans un milieu donné. Ce taux correspondant à la turbidité de l'eau permet d'estimer l'atténuation de la lumière dans ce milieu. La méthode consiste à mesurer l'intensité de la lumière dispersée à un angle de 90° par rapport au trajet de la lumière incidente pour une longueur d'onde donnée. Le coefficient de diffusion totale ainsi mesuré permettra de connaître la turbidité en NTU (voir Figure 9).

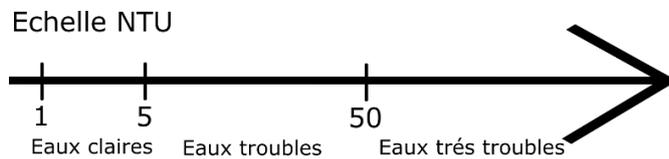


Figure 9 : Echelle de mesure NTU

II.3.2 Réflectance du fond

En télédétection, la réflectance d'une surface est une donnée primordiale afin de caractériser cette surface. Il est donc important d'avoir une calibration des données afin d'avoir des intensités proportionnelles à la réflectance de la surface étudiée.

Dans le cas d'un levé LiDAR bathymétrique, la connaissance de la réflectance du fond permet d'anticiper le comportement du faisceau laser et de l'intensité captée par l'instrument et ainsi estimer la profondeur maximale de mesure. Ainsi, dans le modèle Wa-LID ([Abdallah et al., 2012](#)), la réflectance du fond impacte l'intensité du signal retour de façon linéaire. D'un point de vue mathématique, on peut dire que cette variable est donc moins importante que le coefficient d'atténuation diffus qui lui impacte l'intensité de façon exponentielle. Néanmoins, il s'agit tout de même d'un paramètre important à prendre en compte qui impacte l'intensité du pulse laser significativement ([Guenther et al., 2000](#)). Cette réflectance s'exprime comme l'albédo de la surface au fond de la colonne d'eau et va donc varier selon le type d'environnement survolé (i.e en bathymétrie : sable, vase, rocher et en topographie : végétation, bâtiment, route, etc...).

De nombreux travaux ont été réalisés pour l'étude de cette réflectance du fond dans le cas d'un levé LiDAR bathymétrique. D'autres, présentent des travaux sur les méthodes de calibration de l'intensité des points LiDAR selon les différentes surfaces survolées.

Ainsi, dans l'article de [Wang et al. \(2007\)](#), les auteurs proposent une méthode pour classifier les types de surface au fond de l'eau selon l'intensité du signal reçu (l'amplitude) pour des environnements côtiers. Pour cela, les auteurs prennent en compte plusieurs facteurs afin de normaliser l'intensité de chaque point dans les données LiDAR bathymétrique (laser vert à une longueur d'onde de 532 nm). Le coefficient d'atténuation diffus de la colonne d'eau ainsi que la pente de la surface au fond et l'angle d'incidence sont notamment utilisés. Les auteurs testent leur méthode sur le site de Egmont Key en Floride sur des fonds composés majoritairement de sable et d'algues. Les résultats montrent que la normalisation de l'intensité du pic correspondant au fond bathymétrique permet de distinguer les fonds composés de sable et d'algues selon leurs réflectances. Toutefois, les auteurs indiquent les limites de leur méthode car, ils supposent que le coefficient d'atténuation diffus est constant, et que la surface d'eau est plane. Ce qui dans la réalité n'est pas toujours le cas.

Dans l'article de [Vain et al. \(2009\)](#), les auteurs présentent cette-fois une méthode de calibration de l'intensité pour des données ALS selon les différentes réflectances que l'on peut trouver dans des environnements urbains. Pour cela, les auteurs utilisent différents instruments (mais uniquement avec un laser infrarouge, à 1064 nm de longueur d'onde) pour différentes altitudes et sur différentes surfaces au sol. Afin d'étudier les données, les auteurs procèdent à une normalisation des intensités par la prise en compte de l'angle d'incidence (en faisant l'hypothèse d'une surface au sol plane), la hauteur de vol, les effets atmosphériques (la transmittance de l'air) et l'atténuation de l'intensité liée au PRF. Les résultats montrent que globalement pour tous les instruments LiDAR, afin de réaliser une calibration de l'intensité de qualité, il est nécessaire d'utiliser une surface ayant une structure homogène et une faible rugosité (e.g les routes).

Enfin, dans l'article de [Kaasalainen et al. \(2008\)](#), les auteurs présentent une méthode de calibration empirique de l'intensité dans le cas d'un levé terrestre (TLS) pour plusieurs instruments (pour un laser Nd :YAG à 1064 nm et les instruments FARO et SuperK). Les données obtenues sont ensuite comparées avec des données ALS (pour les instruments « Topeye » et « Optech ») pour les mêmes surfaces où pour certaines, les réflectances sont connues (cible de A à H pour des réflectances respectifs de : 70%, 50%, 40%, 26%, 20%, 16%, 8% et 5%) et d'autres non (sable et gravier). Les valeurs sont ensuite comparées par rapport à la réflectance la plus importante « Tarp A » (voir Tableau 1).

Sample	Lab: 1064nm Nd:YAG	Lab: 785nm FARO	Lab: 785nm SuperK	Espoo: 1064nm Topeye	Sjökulla: 1064nm Optech
Tarp A	1	1	1	1	1
Tarp B	0.73	0.89	0.76	0.71	0.69
Tarp C	0.59	0.63			0.60
Tarp D	0.37	0.42	0.40		0.37
Tarp E	0.30	0.34			0.31
Tarp F	0.23	0.25		0.38	0.24
Tarp G	0.11	0.13		0.14	0.12
Tarp H	0.07	0.06			0.10
Sand*	0.22	0.22		0.39	
Gravel*	0.23	0.30		0.38	
Sand**	0.25			0.40	

Tableau 1 : comparaison des intensités calibrées par rapport à la cible ayant la plus grande réflectance (Tarp A). Les marques "*" et "**" indiquent des angles d'émission respectivement <13° et >20°. D'après Kaasalainen et al. (2008).

On remarque tout d'abord que mêmes si les données ALS sont corrigées des effets atmosphériques, les rapports sont inférieurs à ceux issus de données TLS. Enfin, on remarque que les changements de granulométrie ou bien d'angle d'émission ne vont pas impacter les valeurs de façon significatives. Dans cet article, les auteurs indiquent néanmoins que, afin de réaliser une calibration des intensités la plus précise possible il est impératif de connaître avec précision les propriétés optiques de l'environnement traversé ou bien de la géométrie de l'objet visé.

Même si cette étude a été réalisée pour des surfaces émergées, les résultats permettent d'avoir une première idée du comportement du faisceau laser dans l'eau.

II.3.3 Séparabilité des échos de surface et de fond

On a vu précédemment que lors d'une campagne de levé LiDAR bathymétrique, les données issues du canal vert comporte plusieurs échos pour une même impulsion laser (voir partie II.1.3) : un pic d'intensité pour la surface d'eau, pour la colonne d'eau et enfin pour le fond. L'enjeu du traitement des données consiste à filtrer ces données afin de garder uniquement les points du fond bathymétrique.

Pour réaliser cette opération, il est possible de s'aider des données du canal infrarouge qui dans des zones aquatiques modélisent la surface d'eau plus précisément que le canal vert car pour le laser infrarouge il n'y aucune pénétration dans l'eau. En connaissant la position relativement précise de la surface d'eau, la séparation des échos de surface et du fond pour le canal vert est alors facilité ([Guenther et al., 2000](#)).

Mais, plus la profondeur diminue, plus les pics d'intensité seront rapprochés dans le temps et plus il sera difficile de les distinguer de façon automatique. Ainsi, dans l'article de [Pan et al. \(2015\)](#), les auteurs font le constat que lorsque la profondeur devient faible (< 1m) alors, les pics d'intensité dans le signal reçu sont très rapprochés et cela devient difficile pour l'instrument de différencier les échos entre eux. De plus, la difficulté à séparer les échos s'agrandie lorsque la turbidité augmente (>10 NTU) car le faisceau laser subit un effet « d'étalement du signal » ([Wang et al., 2007](#)), mais comme la profondeur est faible, le signal retour comportera toujours un pic d'intensité pour le fond.

D'une autre manière, dans l'article de [Saylam et al. \(2017\)](#), les auteurs montrent que dans le cas d'une étendue d'eau claire où la surface est calme sans vaguelettes, le pic d'intensité correspondant à la surface d'eau dans le canal vert se situera à plusieurs dizaines de centimètre en-dessous de la véritable position de la surface d'eau. Dans ce cas, pour des faibles profondeurs, les différents échos seront donc encore plus rapprochés entre eux.

En conclusion, les auteurs indiquent que pour améliorer la séparabilité des échos dans le signal du canal vert, la surface d'eau doit être assez rugueuse et la turbidité assez importante afin d'avoir un pic d'intensité de la surface qui soit bien identifiable. Mais, la turbidité doit être assez faible (<10 NTU) pour que l'écho du fond soit identifiable et que la rétrodiffusion dû à la colonne d'eau soit la plus faible possible.

On remarque ici que la question de la séparabilité des échos est un enjeu majeur dans le traitement des données bathymétriques et notamment pour les faibles profondeurs. Différentes techniques existent, qui sont plus ou moins difficiles à mettre en œuvre et qui sont détaillées dans la partie suivante.

II.3.4 Méthodes de traitement des données LiDAR bathymétrique

Le traitement des données LiDAR est une étape importante pour réaliser une analyse des données. Cette étape permet de séparer les différents types de points selon leur nature (i.e végétation, route, eau, etc...) ou bien selon leur position dans l'espace (écho de surface, rétrodiffusion de la colonne d'eau et écho de fond) pour les différents canaux (typiquement vert et infrarouge).

De nombreux travaux présentent des méthodes innovantes afin de traiter et classifier ces données le mieux possible.

Ainsi, on a vu que dans l'article de [Abdallah et al. \(2012\)](#), le modèle physique Wa-LID permet de simuler le comportement du laser et les différents échos qui seront retournés vers le capteur. Ce modèle permet de décomposer le signal du canal vert afin de différencier les intensités de chaque écho (surface, colonne d'eau et fond) selon une équation précise faisant intervenir de nombreux facteurs.

Mais, il existe des approches différentes. Par exemple, dans l'article de [Abady et al. \(2014\)](#), les auteurs présentent une méthode pour décomposer les différents échos en se basant sur un modèle de mélange Gaussien. Ce modèle part du principe que le signal reçu par le capteur peut être décomposé en une somme de plusieurs courbes gaussiennes ([Guenther et al. ; 2000](#)). De manière générale, c'est une loi normale qui est utilisée pour reproduire la forme du signal reçu en intensité en fonction du temps (voir Figure 10).

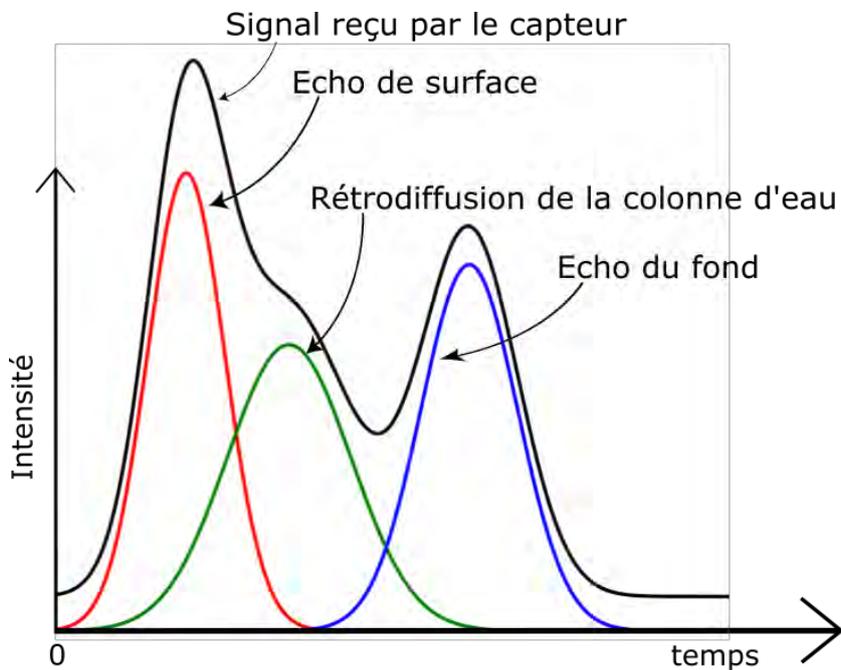


Figure 10 : schéma du signal retour décomposé en une somme de courbes gaussiennes.

D'autres méthodes se basent elles sur l'analyse du retour d'onde complet brut (i.e sans discrétisation automatique du signal par l'instrument). Ainsi, dans l'article de [Saylam et al. \(2017\)](#), les auteurs conçoivent un script pour détecter par eux-mêmes les pics d'intensité sur le signal retour. Pour cela, ils définissent un pic comme étant un maximum local (avec une pente positive avant et une pente négative après le maximum). Cette définition rend nécessaire le lissage du signal afin de supprimer le bruit résiduel est de pouvoir détecter les pics d'intensité correctement.

Enfin, des méthodes plus complexes ont aussi été développées :

- En utilisant par exemple, la déconvolution du signal, la transformée en ondelettes continues ou bien par un modèle d'espérance-maximisation ([Pan et al., 2015](#))
- Par l'utilisation de plusieurs méthodes de déconvolution (Richardson-Lucy, filtre de Wiener) ou bien en passant par l'estimation des paramètres du signal par les moindres carrés ([Wu et al., 2011](#)).

II.4 Conclusion sur l'état de l'art

L'état de l'art du domaine de recherche montre plusieurs aspects importants dans le cas des levés bathymétriques. Tout d'abord, les articles étudiés montrent l'importance de posséder deux canaux (infrarouge et vert) afin d'étudier le fond bathymétrique correctement. En effet, le canal vert pénètre l'eau et permet de cartographier le fond bathymétrique. Le canal infrarouge ne pénètre pas l'eau et permet alors de positionner la surface d'eau relativement correctement afin de connaître les zones immergées.

Ensuite, on a vu que la propagation du laser dans l'eau va entraîner une réflexion de l'impulsion laser à différents endroits (voir partie II.1.3). En effet, les échos correspondant à la surface d'eau et à la colonne d'eau vont engendrer pour les données du canal vert, un grand nombre de points qui ne sont pas toujours utiles dans le cadre de ce travail de recherche. Cet aspect rend alors nécessaire la mise en place d'une chaîne de traitement afin de classifier le nuage de points LiDAR.

Enfin, l'état de l'art du domaine montre que la profondeur maximale de mesure bathymétrique est très liée à la notion d'intensité du signal retour. On a vu que pour des données LiDAR discrétisées (voir partie II.1.2), l'instrument détectera un point tant que le pic d'intensité du signal retour dépasse un certain seuil propre à l'instrument. Ce qui veut dire que, la profondeur maximale de mesure correspondra à la profondeur à laquelle le pic d'intensité de l'écho du fond sera égal au seuil de détection de l'instrument. On peut donc dire qu'étudier la profondeur maximale de mesure bathymétrique revient à étudier l'intensité de l'écho du fond.

De plus, les articles étudiés dans cette partie montrent que cette intensité de l'écho du fond va dépendre de nombreux facteurs propres à l'instrument (hauteur de vol, puissance émise, angle d'émission, etc...) ou bien liés à l'environnement survolé (turbidité de l'eau, réflectance du fond, etc...). La suite de ce mémoire consiste donc à présenter les analyses mises en place sur les données collectées afin d'étudier les facteurs qui influencent l'intensité de l'écho du fond et donc les facteurs qui influencent la profondeur maximale de mesure bathymétrique.

III. Méthodes

III.1 Instrument

Pour ce travail de recherche, les données utilisées ont été acquises à l'aide d'un système LiDAR de la société Teledyne-Optech. L'instrument Optech-Titan a été acquis conjointement en 2015 par un financement des régions Pays-de-la-Loire et Bretagne (voir Figure 11). Il a la particularité d'utiliser deux canaux laser (vert et infrarouge) ce qui lui permet de pouvoir réaliser des levés aussi bien topographique que bathymétrique. Il est donc parfaitement adapté à l'environnement fluvial mais aussi côtier. De plus, cet instrument est équipé d'un numériseur, ce qui lui permet d'enregistrer le retour d'onde complet (FWF) et donc de fournir plus d'informations pour l'utilisateur.



Figure 11 : LiDAR Optech Titan. Image Teledyne-Optech.

Ses caractéristiques sont indiquées dans les spécifications du constructeur et, sont résumées par le tableau suivant :

Paramètres	Spécifications
Canal 2	$\lambda = 1064$ nm (infrarouge)
Canal 3	$\lambda = 532$ nm (vert)
FOV max.	$\pm 30^\circ$
Type de balayage	Oscillant
Divergence du faisceau laser	Canal 2 : 0.35 mrad Canal 3 : 0.7 mrad
Altitude de vol	Topographique : 300 à 1500 m (Canal 2) Bathymétrique : 300 à 600 m (Canal 3)
Fréquence d'émission (PRF)	50 à 300 kHz
Fréquence de balayage	1 à 210 Hz
Précision horizontale	Hauteur/7500 (en m) ; 1σ
Précision verticale	5-10 cm ; 1σ
Précision distance laser	8 mm ; 1σ

Tableau 2 : Description des caractéristiques du LiDAR Optech-Titan.

Lors d'une campagne de levé LiDAR, le processus d'acquisition mis en œuvre consiste en une succession d'opérations réalisées par l'instrument ou bien en post-traitement :

- Tout d'abord, la partie émettrice, va envoyer à intervalle régulier une impulsion laser selon un angle d'émission qui va varier (afin de balayer la surface survolée)
- Ensuite, pour chaque impulsion, le capteur va enregistrer l'intensité du signal retour qui sera reçu par l'instrument en fonction du temps écoulé
- Durant cette opération, le capteur réalise une discrétisation du signal reçu pour un certain seuil, afin de garder uniquement les pics d'intensité les plus importants dans le signal.
- Pour chaque pic d'intensité, l'instrument enregistre la distance laser parcourue par l'impulsion, l'angle d'émission et le temps GPS de l'émission du pulse laser
- En parallèle, la partie géoréférencement va enregistrer à intervalle régulier, la position relative de l'appareil ainsi que son orientation dans l'espace à l'aide d'un récepteur GNSS et d'une centrale inertielle
- Les données du récepteur GNSS et de la centrale inertielle sont ensuite intégrées dans un filtre de Kalman afin de corriger les positions relatives de l'appareil par rapport aux mouvements de l'avion (roulis, tangage, lacet) durant le vol.
- En post-traitement, les données de positions corrigées sont traitées afin de calculer les coordonnées géographiques de l'appareil durant le vol pour une fréquence dans ce cas de 200 Hz. Ces données sont ensuite enregistrées dans un fichier de trajectoire « SBET »)
- Enfin, à partir de la position de l'appareil (coordonnées et temps GPS) et des paramètres de chaque écho discrétisé (distance laser, angle et temps GPS), il est possible de calculer en post-traitement les coordonnées dans un référentiel donné du nuage de points obtenus.

Ce processus d'acquisition peut être résumé par le schéma suivant :

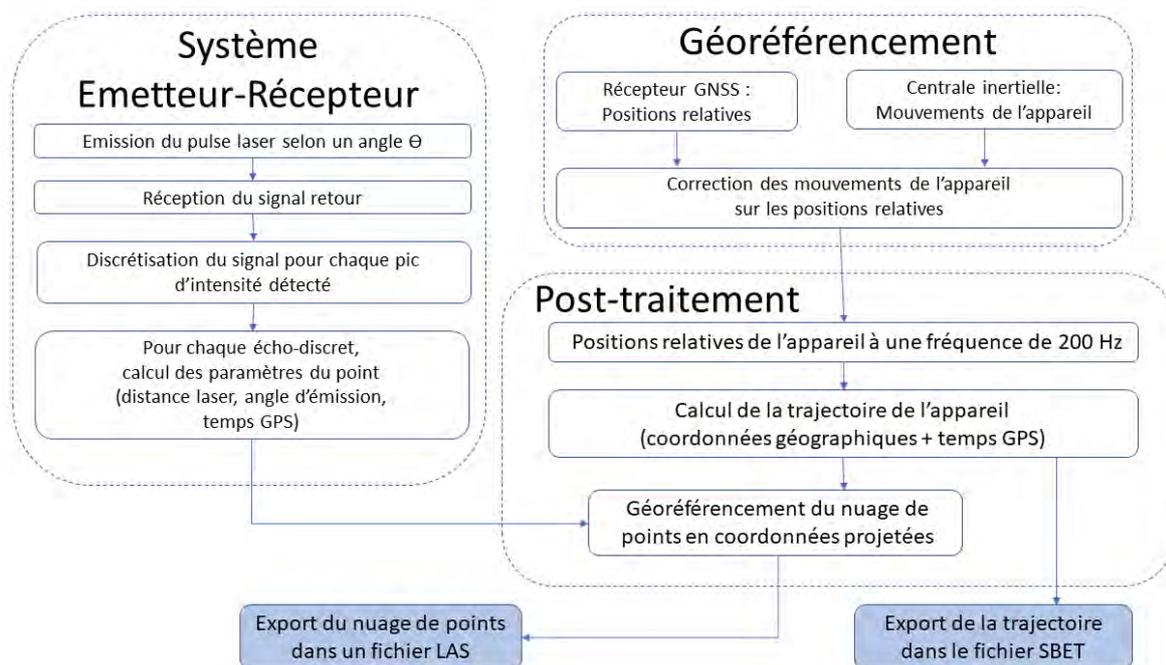


Figure 12 : Schéma simplifié de l'acquisition des données LiDAR.

III.2 Le fichier de trajectoire

III.2.1 Présentation du fichier SBET

Le nuage de points géoréférencé en post-traitement contient plusieurs informations dont : les coordonnées projetées, le temps GPS d'émission du pulse laser et la valeur d'intensité. Afin d'obtenir plus d'information sur ce nuage de points, il est possible d'utiliser le fichier de trajectoire de l'appareil durant le vol. En effet, en connaissant les coordonnées de l'instrument au moment de l'émission du pulse laser, alors, il est possible de calculer la hauteur de vol, l'angle exacte d'émission du tir laser ou bien la distance parcourue par l'impulsion.

Lors du post-traitement des données LiDAR, la trajectoire de l'appareil est enregistrée dans un fichier nommé « SBET ». Ce fichier contient pour chaque enregistrement (à une fréquence de 200 Hz), plusieurs informations sur la trajectoire de l'appareil dont notamment les coordonnées géographiques, la hauteur ainsi que le temps GPS de chaque enregistrement.

Ces données supplémentaires permettent par exemple de pouvoir corriger les points bathymétriques des effets de réfraction, mais aussi de pouvoir réaliser des analyses statistiques plus fines sur les différents nuages de points, en recalculant l'angle d'incidence sur la surface ou la distance parcourue par le tir laser.

Ce fichier de trajectoire, se présente sous la forme d'un fichier binaire « .out » avec pour chaque enregistrement, 17 champs de 8 octets chacun :

#	Description	Unité
1	Temps GPS	s
2	Latitude	rad
3	Longitude	rad
4	Altitude	m
5	Vitesse dans l'axe X (Est-Ouest)	m/s
6	Vitesse dans l'axe Y (Nord-Sud)	m/s
7	Vitesse dans l'axe Z (verticale)	m/s
8	Roulis	rad
9	Tangage	rad
10	Lacet	rad
11	Angle du système d'axes par rapport au Nord	rad
12	Accélération sur l'axe X	m/s ²
13	Accélération sur l'axe Y	m/s ²
14	Accélération sur l'axe Z	m/s ²
15	Vitesse angulaire autour de l'axe X	rad/s
16	Vitesse angulaire autour de l'axe Y	rad/s
17	Vitesse angulaire autour de l'axe Z	rad/s

Tableau 3 : Description des champs contenus dans un fichier SBET.

Ce fichier binaire ne peut pas être utilisé directement et doit subir un certain nombre de traitement. Tout d'abord, car il s'agit de coordonnées géographiques alors que le nuage de points est en coordonnées projetées. Mais aussi, car dans une grande partie des projets réalisés, le champ n°4 « altitude » indiquée dans le fichier SBET correspond dans la pratique, à une hauteur ellipsoïdale tandis que le nuage de points contient des altitudes. Le fichier SBET doit donc subir plusieurs opérations afin de remédier à ces différents problèmes.

III.2.2 Traitements sur le fichier de trajectoire

Pour ce mémoire de fin d'études, un script Python a été développé afin de réaliser ces différents traitements sur le fichier SBET. Ce script utilise des fonctions issues d'un module créé dans le cadre de ce stage (voir Annexe 1). Il réalise les opérations suivantes :

1. Tout d'abord la lecture du fichier binaire, qui est possible en Python en spécifiant la longueur de chaque ligne (136 octets) ainsi que la longueur de chaque attribut (8 octets).
2. Ensuite, les données lues sont filtrées afin de garder uniquement les colonnes n°1, 2, 3, 4 (voir Tableau 3). La colonne n°4 « Altitude » est sélectionnée pour convertir les hauteurs en altitudes. Pour réaliser ce calcul, le script utilise une grille de conversion altimétrique contenant les valeurs de l'ondulation du géoïde à un pas régulier (voir Figure 13). Pour chaque point, une interpolation bilinéaire est effectuée sur cette grille afin d'obtenir la valeur locale de l'ondulation. Ensuite, la relation suivante est appliquée :

$$H = he - N$$

Équation 4 : relation entre hauteur ellipsoïdale et altitude.

Avec, H : l'altitude (m) ; he : la hauteur ellipsoïdale (m) ; N : l'ondulation du géoïde (m)

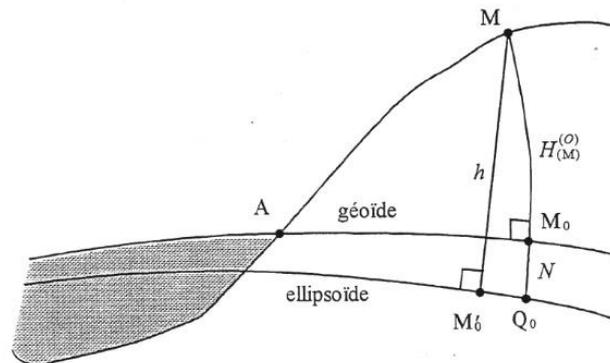


Figure 13 : Différence entre hauteur ellipsoïdale et altitude. (image IGN)

Pour les projets réalisés en France métropolitaine, la grille de conversion utilisée est la RAF09, qui permet de se rattacher dans le système altimétrique légal NGF-IGN69. Toutefois, pour d'autres projets réalisés hors France métropolitaine, le script prévoit la possibilité d'utiliser d'autres grilles de conversion altimétrique qui peuvent être tout aussi bien utilisées pour cette étape (e.g une grille de conversion donnant l'ondulation pour le géoïde mondial EGM08).

3. Le script procède à une projection des coordonnées géographiques (pour les champs n°2 et 3 du Tableau 3). Pour cela, le script utilise la bibliothèque *PyProj*. Elle permet de réaliser des conversions de coordonnées à partir des codes EPSG de chaque système. L'utilisation des codes EPSG se justifie par la volonté de standardiser la conversion des coordonnées et d'utiliser à chaque fois les mêmes paramètres pour les mêmes transformations et que cela soit plus pratique à utiliser. Toutefois, il est important d'utiliser des codes EPSG qui correspondent au même système de référence. Ainsi, pour les projets réalisés en France métropolitaine, les coordonnées géographiques de départ sont dans le système ETRS89 – epoch 2009 (code EPSG : 4171), les coordonnées projetées sont dans le système RGF93 – Lambert 93 (code EPSG : 2154). Pour la majorité des projets hors France métropolitaine, les coordonnées de départ sont dans le système WGS84 (code EPSG : 4326), elles sont alors projetées en UTM dans le fuseau correspondant (e.g la projection UTM-34N à un code EPSG correspondant : 32634).

4. Enfin, à partir de ces opérations, un tableau des données modifiées est créé. Il contient les coordonnées projetées (E,N), les altitudes (H) ainsi que le temps GPS de chaque point. Ce tableau est renvoyé à l'utilisateur qui a la possibilité de le sauvegarder dans un fichier Python compressé (au format « .npz ») afin de le réutiliser plus rapidement s'il est amené à réutiliser les données du fichier SBET correspondant.

Ce processus de traitement peut être résumé par le schéma suivant :

Script Python pour le traitement du fichier SBET

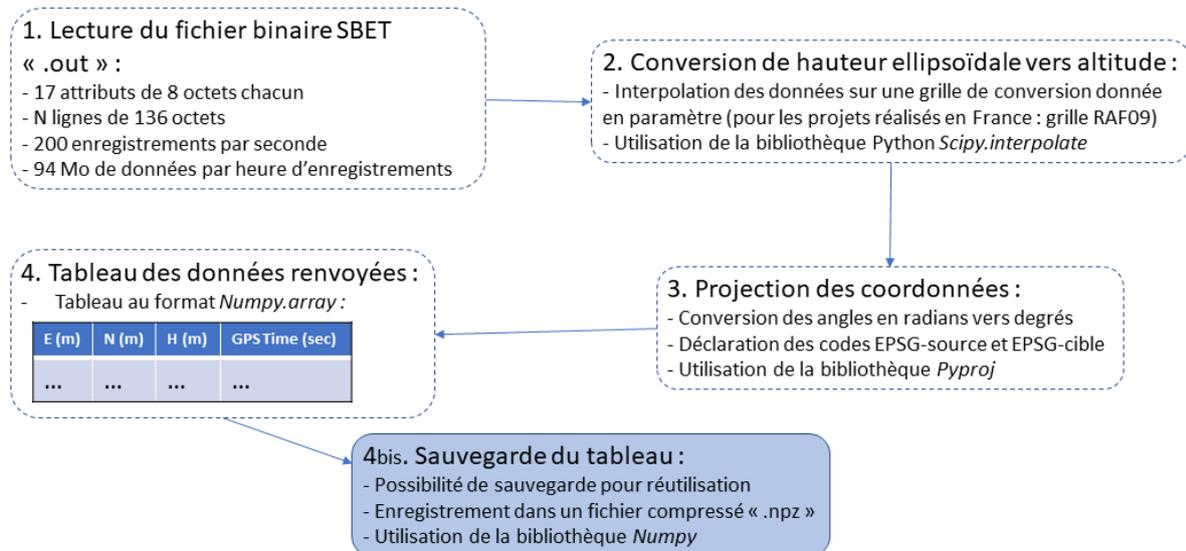


Figure 14 : schéma de fonctionnement pour les traitements appliqués au fichier SBET.

Ce script fonctionne relativement rapidement. Ainsi pour donner un ordre d'idée du temps de calcul, pour un ordinateur portable récent (2018) avec un processeur Intel Core i7-8550U, ce script Python met une vingtaine de secondes pour traiter 2 millions de points. Cela équivaut à environ 2 heures et 45 minutes de temps de vol pour une fréquence d'enregistrements de 200 Hz.

III.2.3 Utilisation des données de trajectoire

Une fois que le fichier contenant la trajectoire de l'appareil a été traité, il est possible de calculer différents attributs supplémentaires sur le nuage de points.

Ces informations supplémentaires sont calculées en retrouvant pour chaque point du nuage, le moment de l'émission du pulse laser et donc la configuration du tir à ce moment-là. Pour cela, on utilise le temps GPS pour faire la jointure entre les données de la trajectoire et le nuage de points. Comme la fréquence d'émission du pulse laser (entre 50 et 300 kHz) est différente de la fréquence de géoréférencement (200 Hz), on effectue au préalable, une interpolation linéaire des données de la trajectoire de l'appareil afin que les deux temps GPS correspondent parfaitement.

On obtient donc pour chaque point du nuage, les coordonnées de l'appareil lors de l'émission du pulse laser. Il est alors possible de calculer deux informations essentielles :

- La hauteur de vol : par la soustraction de l'altitude de l'appareil et de celle du point
- L'angle d'émission par rapport à la verticale à l'aide de la formule suivante :

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{Z_{sys} - Z_{pt}}{\sqrt{(X_{sys} - X_{pt})^2 + (Y_{sys} - Y_{pt})^2 + (Z_{sys} - Z_{pt})^2}} \right)$$

Équation 5 : Calcul de l'angle d'émission du pulse laser.

Avec :

X_{sys} ; Y_{sys} ; Z_{sys} : coordonnées du système émetteur à l'instant GPS t (en m)

X_{pt} ; Y_{pt} ; Z_{pt} : coordonnées du point au sol à l'instant GPS t (en m)

θ : angle d'émission du pulse laser (en rad)

Ces données seront utilisées par la suite, pour des analyses statistiques sur le nuage de points. Mais aussi, lors de la phase de correction de la position des points (voir partie III.3.2.5) suite à la réfraction du faisceau laser au niveau du dioptre entre l'air et l'eau.

III.3 Classification du nuage de points

Lors d'une campagne de levé LiDAR bathymétrique, l'appareil est amené à survoler des surfaces autre que de l'eau et ce pour plusieurs raisons. Tout d'abord car, comme on peut l'imaginer, l'avion ne peut pas survoler exactement toutes les surfaces immergées. Mais aussi car, lors du post-traitement des données, il est nécessaire d'avoir sur le nuage de points des zones émergées afin de pouvoir réaliser un recalage des différentes lignes de vol le mieux possible. De plus, comme vu précédemment (voir partie II.1.3), le nuage de points issu d'un levé bathymétrique contiendra des points correspondant au fond bathymétrique mais aussi, à la surface d'eau et quelquefois, à la rétrodiffusion de la colonne d'eau.

Ces particularités vont produire un nuage de points hétérogènes au niveau de la nature des surfaces survolées. Il est donc nécessaire de classifier chaque nuage de points afin de séparer les groupes de points de nature différente. Pour ce travail de recherche, on ne s'intéresse qu'aux données bathymétriques. C'est-à-dire, la surface d'eau représentée par les données du Canal infrarouge (pour calculer la profondeur) et le fond bathymétrique représenté par les points du Canal vert. Néanmoins, dans d'autres cas, les données topographiques peuvent s'avérer utiles comme par exemple lors d'un projet d'étude sur les crues d'un cours d'eau.

Pour réaliser cette classification, le processus s'appuie sur les deux nuages de points acquis par le système LiDAR pour les deux canaux : canal 2 (C2) pour la bande infrarouge ($\lambda = 1064$ nm) et canal 3 (C3) pour la bande verte ($\lambda = 532$ nm) qui permet de pénétrer les surfaces d'eau. Cette classification se déroule en deux temps :

- Tout d'abord une détection de la surface d'eau, caractérisée notamment par les données du canal infrarouge ;
- Ensuite, une détection du fond bathymétrique à partir du nuage de points des surfaces d'eau calculé précédemment.

L'algorithme de ce processus de classification existait sous la forme d'un script Matlab développé par D. Lague. Pour ce travail de recherche, ce script a été implémenté en langage Python.

Ce nouveau script utilise selon les usages, des bibliothèques Python (tels que Numpy, Scipy, etc...) ou bien des logiciels de traitements LiDAR (tels que CloudCompare ou bien Lastools) appelés en ligne de commande à l'aide du module interne au langage : Subprocess.

Pour cette partie III.3, afin de ne pas divulguer l'ensemble du processus de classification qui revêt des enjeux commerciaux, les descriptions suivantes sont simplifiées en présentant les grandes étapes de calcul.

III.3.1 Détection de la surface d'eau

La première étape du traitement sur les données LiDAR consiste à sélectionner les points correspondant à la surface d'eau sur le canal infrarouge. Il s'agit d'une étape primordiale car elle permet ensuite de déduire facilement l'emplacement des étendues d'eau et donc des points correspondant à la bathymétrie. De plus, ce groupe de points permettra aussi de pouvoir calculer par la suite les profondeurs par soustraction d'altitude en faisant l'hypothèse que la surface d'eau obtenue est plane.

Au préalable, les nuages de points des canaux C2 et C3 sont sous-échantillonnés en gardant l'altitude du point le plus bas (voir Figure 15). Cette opération possède deux avantages :

- Supprimer la majeure partie des points correspondant à la végétation et avoir un nuage de points représentant mieux le terrain naturel ;
- Supprimer les points représentant la surface d'eau ou bien la colonne d'eau pour le nuage du Canal 3.

Ce sous-échantillonnage est réalisé à l'aide de la commande « *lasthin* » du logiciel Lastools.

Principe de fonctionnement du sous-échantillonnage en gardant le point le plus bas

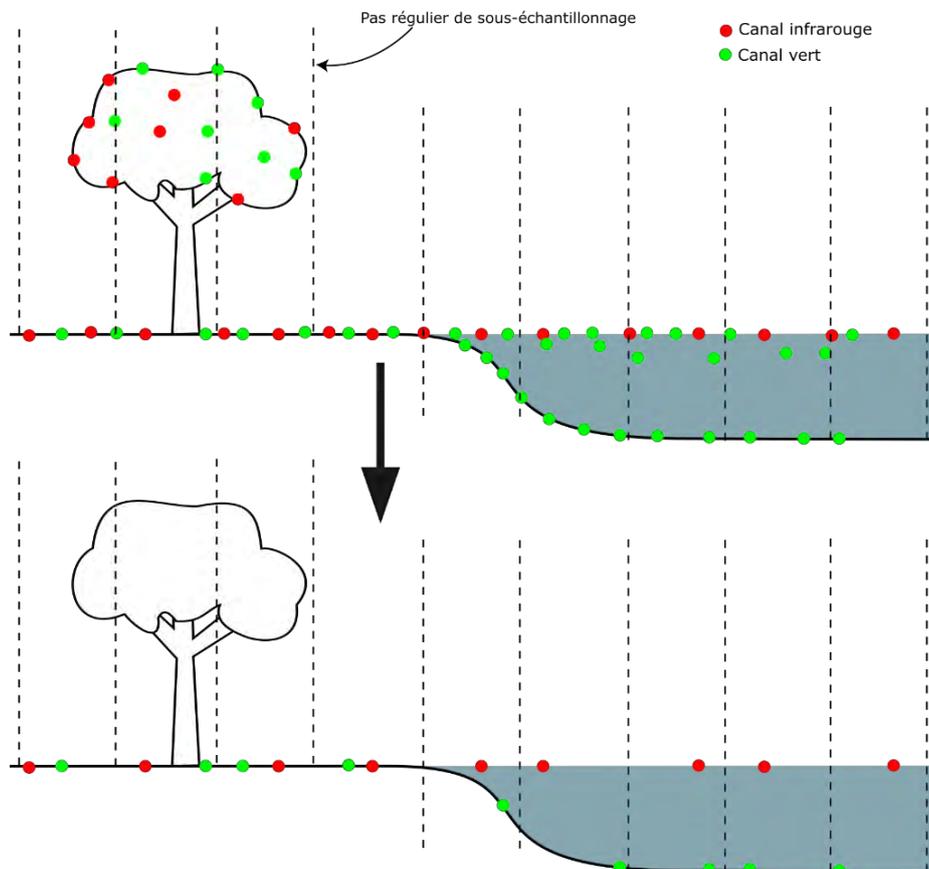


Figure 15 : schéma de fonctionnement du sous-échantillonnage.

La détection de la surface d'eau se base sur le principe qu'au niveau d'une étendue d'eau, les points sous-échantillonnés issus du canal infrarouge (C2) se trouveront en surface tandis que pour les données du canal vert (C3), les points se trouveront au fond. Afin de détecter ces différents endroits, il suffit alors de calculer les distances verticales entre les nuages de points du Canal 2 et du Canal 3 et ensuite, réaliser un seuillage sur cette distance sur le nuage C2 afin de garder les points de surface (voir Figure 16).

Principe de fonctionnement de la détection de surface, par calcul de distance verticale entre les points des canaux infrarouge et vert

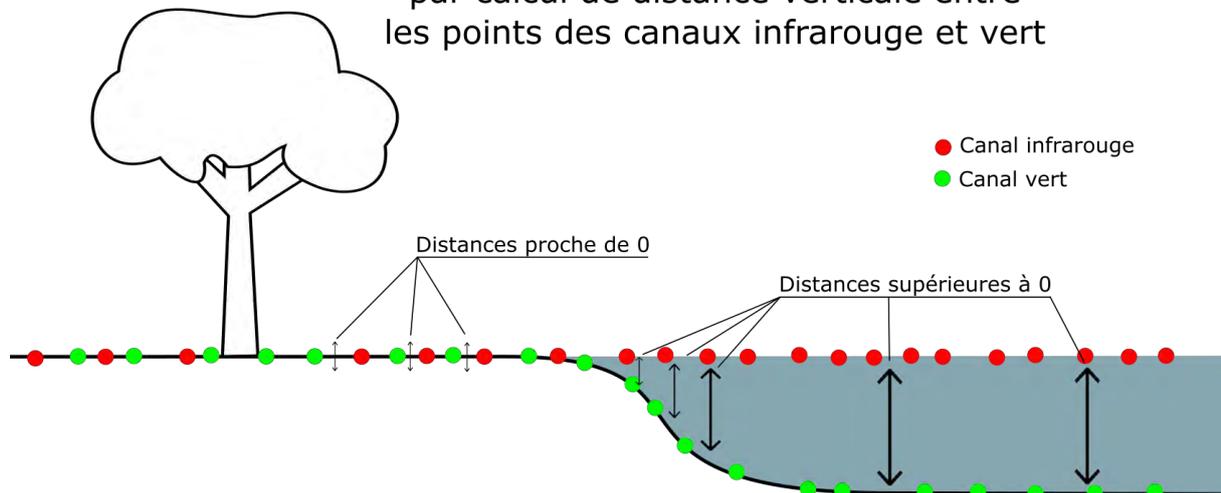


Figure 16 : schéma de fonctionnement de la détection de surface.

Des contraintes supplémentaires s'ajoutent à cette étape, liées à l'intensité des échos et les caractéristiques géométriques de la surface. Cette étape est la plus importante et la plus délicate, qui nécessite une adaptation des paramètres en fonction de l'environnement aquatique (lac, rivière, domaine côtier).

Ce calcul de distance verticale entre les deux nuages de points est réalisé à l'aide de la fonction « *Cloud2Cloud* » sur CloudCompare en spécifiant que la fonction doit retourner les distances pour la composante verticale.

III.3.2 Détection de la bathymétrie

La seconde étape du traitement des données consiste en la détection du fond bathymétrique. Pour cela, ce processus permet de sélectionner les points issus du canal vert (C3) qui correspondent au fond bathymétrique.

Cette détection utilise les données de la surface d'eau du Canal 2 préalablement sélectionnées ainsi que les données sous-échantillonnées du Canal 3. Cette partie se réalise en plusieurs étapes :

III.3.2.1 Classification approximative :

Cette première étape permet de classifier grossièrement les données sous-échantillonnées du Canal 3 (voir Figure 17). Tout d'abord, la fonction « *Cloud2Cloud* » de CloudCompare est utilisée afin de calculer la distance verticale entre les données du Canal 3 et la surface d'eau du Canal 2. Ensuite, un seuillage est réalisé sur cette distance afin de séparer les données du Canal 3 en 3 classes selon les conditions suivantes :

$$\begin{cases} \text{si } d_{pt} < -\sigma \text{ alors } pt \in \text{classe A} \\ \text{si } d_{pt} > \sigma \text{ alors } pt \in \text{classe B} \\ \text{si } d_{pt} \in [-\sigma; \sigma] \text{ alors } pt \in \text{classe C} \end{cases}$$

Équation 6 : conditions sur la 1^{ère} classification sur les données du Canal 3.

Avec : d_{pt} : la distance verticale au point « pt » (en m) dans le sens +Z; σ : seuil de classification dans l'ensemble \mathbb{R}^+ ; classes A, B, C : respectivement les classes « immergée », « émergée », et « indifférenciée ».

En effet, lorsque la distance verticale est négative significativement, alors le point correspond à une surface immergée. De la même manière, lorsque la distance verticale est positive significativement, alors le point correspond à une surface émergée, c'est-à-dire de la topographie. Pour les points non classés, une nouvelle classification plus fine doit être réalisée.

Le seuil « σ » constitue un paramètre important pour cette étape. La valeur de ce seuil va varier selon l'environnement survolé (i.e dans des environnements côtier ou bien fluvial).

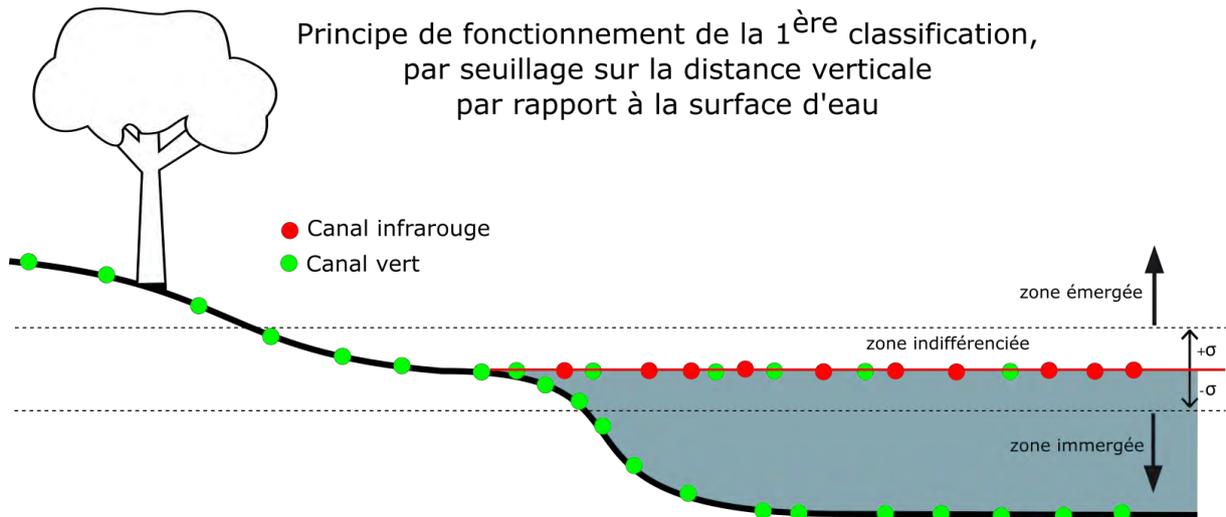


Figure 17 : schéma de fonctionnement de la 1^{ère} classification.

III.3.2.2 Classification fine :

Pour cette deuxième étape, les données du Canal 3 de la classe « C » calculées précédemment sont réutilisées afin de les classer plus finement. En effet, pour cette étape, on cherche à catégoriser les données selon 3 classes : n°1 fond bathymétrique, n°2 émergée, et n°3 surface d'eau.

Pour cela, une classification supervisée est mise en place en utilisant un algorithme de type SVM sous Python (bibliothèque *Scikit-Learn*). Cette classification s'appuie sur 3 champs (voir Tableau 4) : la distance verticale à la surface d'eau du Canal 2, la distance horizontale à la classe B « émergée » de l'étape précédente et la valeur d'intensité de chaque point (voir Figure 18).

Tableau 4 : comportement des attributs pour la 2^{ème} classification.

Champs\Classes	1 : Fond	2 : Emergée	3 : Surface d'eau
D_{vert} à la surface d'eau C2	Négative	Positive	Proche de 0
D_{plane} à la classe B	Augmente avec la profondeur	Proche de 0	Variable
Intensité	Faible et décroît avec la profondeur	Forte et reste constante	Moyenne et reste constante

La distance verticale permet de classer grossièrement les données, du Canal 3. Mais, pour des faibles profondeurs, il est plus difficile de distinguer ce qui correspond à une surface émergée, à une surface d'eau et au fond bathymétrique (voir partie II.3). Il devient donc nécessaire d'utiliser d'autres attributs comme par exemple la distance plane à la topographie (classe B) ou bien l'intensité de chaque point afin de différencier finement la nature de chaque point.

La classification supervisée demande ensuite de sélectionner des groupes de points test correspondant aux 3 classes afin d'entraîner le modèle. Puis, l'algorithme SVM permet de classer les données de la classe C.

Principe de fonctionnement de la classification supervisée, par algorithme de type SVM

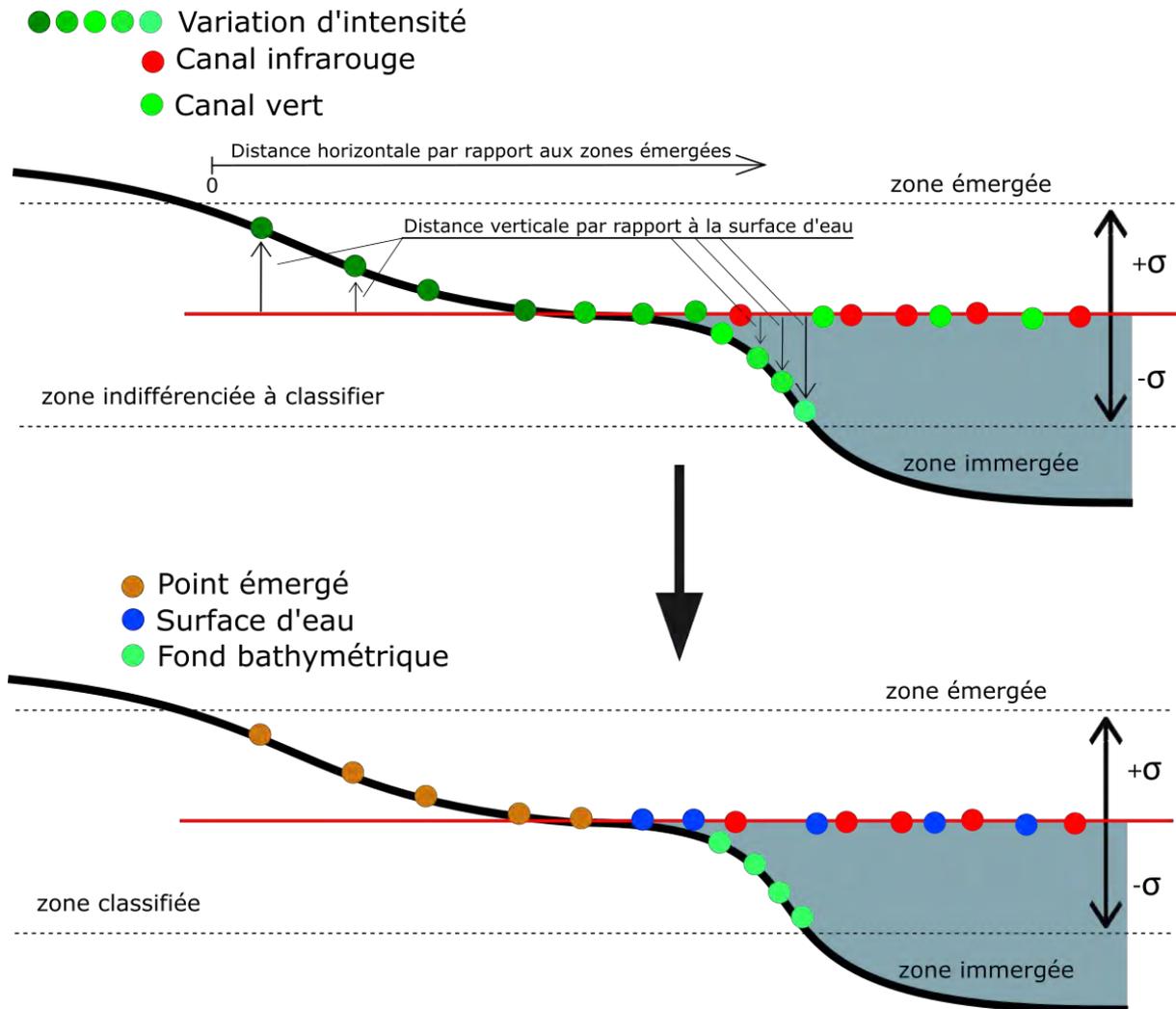


Figure 18 : schéma de fonctionnement de la classification supervisée.

III.3.2.3 Fusion des nuages de points :

Cette étape permet de fusionner les classes de la première et de la seconde classification. Ainsi, les classes A et B sont fusionnées avec les classes respectives 1 et 2.

Ce calcul est réalisé à l'aide de la fonction « *lasmerge* » du logiciel Lastools.

III.3.2.4 Classification sur le nuage de points brut :

Cette partie permet de classer le nuage de points brut du Canal 3, non sous-échantillonné.

Pour chaque point de ce nuage, on recherche son plus proche voisin dans les points classés précédemment. Il suffit alors d'affecter à ce point la classe correspondante à son plus proche voisin dans le nuage sous-échantillonné et classé.

III.3.2.5 Correction de position sur les points bathymétriques :

Cette cinquième et dernière étape consiste à corriger la position des points bathymétriques par rapport aux effets de réfraction. Au niveau du dioptre entre l'air et l'eau, le faisceau laser va subir des déformations décrites par les *Lois de Snell-Descartes* :

- Le rayon réfracté appartient au même plan que le rayon incident
- Lorsqu'un rayon incident se propage dans un milieu d'indice n_1 selon un angle par rapport à la normale θ_1 et qu'il passe dans un milieu d'indice n_2 , le rayon réfracté aura un angle par rapport à la normale θ_2 qui suit la relation suivante : $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$.

Dans le cas d'un levé LiDAR, ces effets vont engendrer des erreurs sur la position horizontale et verticale des points immergés. En effet, l'instrument va considérer que l'impulsion laser se propage en ligne droite et que la vitesse de propagation de l'onde est constante. Or, pour les points immergés, les *Lois de Snell-Descartes* indiquent que le faisceau laser sera dévié au niveau de l'interface entre l'air et l'eau et que, la vitesse de propagation sera modifiée selon la valeur d'indice du milieu aquatique (voir Figure 19 et l'Équation 7).

Il est donc nécessaire de corriger la position des points en faisant deux hypothèses pour ce travail de recherche : on considère que l'angle d'émission par rapport à la normale est égal à l'angle d'incidence au niveau du dioptre air/eau et que, la surface d'eau forme un plan horizontal.

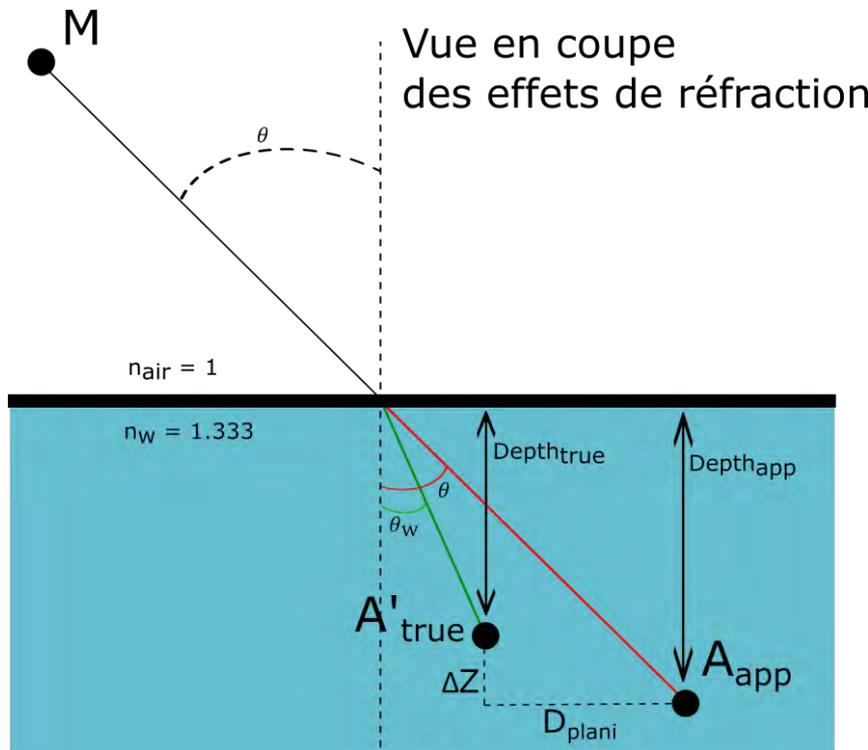


Figure 19 : Schéma des effets de réfraction.

$$\begin{cases} Z_{true} = Z_{app} + Depth_{app} \left(\frac{\cos \theta_w}{n_w \cos \theta} - 1 \right) \\ \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}_{true} = D_{plani} \cdot \vec{u} + \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}_{app} \end{cases}$$

Équation 7 : correction de réfraction air/eau. D'après les Lois de Snell-Descartes.

Avec :

θ et θ_w : respectivement l'angle d'incidence et l'angle réfracté (en rad), liés selon la relation

n_w : indice de réfraction de l'eau (considéré comme constant à 1.333)

$Depth_{app}$: profondeur apparente avant correction (en m)

$(X, Y, Z)_{app}$: coordonnées du point bathymétrique apparent A (i.e avant correction)

$(X, Y, Z)_{true}$: coordonnées du point bathymétrique vrai A' (i.e après correction)

\vec{u} : vecteur unitaire de la direction du pulse laser dans le plan (xOy),

perpendiculaire au plan d'incidence. D'après la Figure 19, il est égal à :
$$\frac{\vec{AM}_{xy}}{\|\vec{AM}\|_{xy}}$$

D_{plani} : Distance dans le plan (xOy) entre le point apparent et la position réelle (en m).

Elle est égale à : $Depth_{app} \times \tan \theta - Depth_{true} \times \tan \theta_w$

$Depth_{true}$: profondeur réelle (en m). Elle est égale à : $\frac{Depth_{app} \cos \theta_w}{n_w \cos \theta}$

M : position de l'instrument

III.4 Les données

Dans le cadre de ce travail de recherche, les données utilisées sont issues de plusieurs projets réalisés ces dernières années par la plateforme de recherche du laboratoire. Ainsi, 13 projets ont été étudiés pour ce mémoire (voir Figure 20), ce qui correspond à 12 sites différents puisque le projet sur l'Ain a été réalisé deux fois (projet n°2 en 2015 et n° 3 en 2016). Ces sites présentent des caractéristiques différentes qui sont résumés par le tableau suivant :

Numéro	Site-projet	Année	Localisation	Taille	Environnement hydrologique
1	Abisko	2017	Au sud du Parc National du Vadvetjåkka (Suède)	Superficie de 132 km ²	Lacs
2	Ain 2015	2015	Entre la commune de Poncin (01) et la confluence avec le Rhône	Tronçon de 45 km	Cours d'eau
3	Ain 2016	2016	//	//	Cours d'eau
4	Bertheaume	2017	Anse de Bertheaume (29)	Superficie de 13 km ²	Côtier
5	Blancs-Sablons	2017	Anse des Blancs-Sablons (29)	//	Côtier
6	Camargue	2016	Pointe de Beauduc (13)	21 km de côte	Côtier
7	Estuaire Seine	2017	Estuaire de la Seine, Pointe d'Agon (50)	Superficie de 2 km ²	Côtier/estuaire
8	les Glénan	2017	Archipel des Glénan (29)	Superficie de 16 km ²	Côtier
9	Guidel	2017	Anse du Pouldu (56)	Superficie de 2 km ²	Côtier
10	Kerjolis	2017	Anse de Bréhec (22)	Superficie de 0.5 km ²	Côtier
11	Loire	2017	Entre les communes de Juigné/Loire et La Méritré (49)	Tronçon de 17 km	Cours d'eau
12	les Minquiers	2017	Archipel des Minquiers (Jersey)	Superficie de 3 km ²	Côtier
13	Rhin	2017	Entre les communes de Kembs et Village-Neuf (68)	Tronçon de 10 km	Cours d'eau

Tableau 5 : caractéristiques des sites étudiés

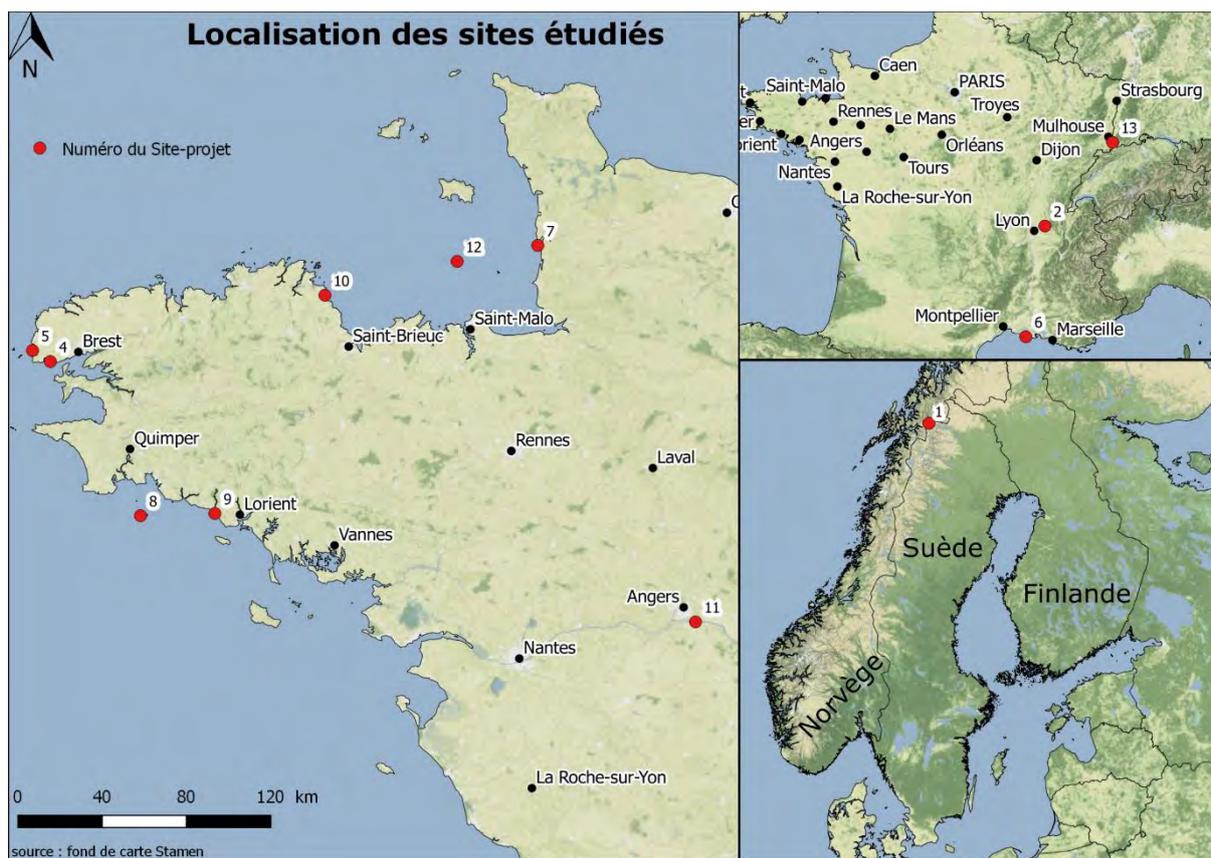


Figure 20 : Localisation des sites étudiés. Correspondance des numéros avec le Tableau 5.

La majorité des projets étudiés se trouvent dans la région Bretagne. Néanmoins, dans le cadre de collaboration avec des universités ou bien des sociétés privées, d'autres sites ont été survolés en France et même à l'étranger (pour le site d'Abisko). On remarque une certaine variété dans les caractéristiques des projets étudiés, qui vont du plus petit (Kerjolis) au plus grand (Abisko) avec des environnements hydrologiques bien distincts (domaine côtier, rivière, lac).

III.5 Méthode d'analyse des données

Dans le cadre de ce travail de recherche, les données analysées ici correspondent aux nuages de points du fond bathymétrique du canal 3 corrigé spatialement des effets de réfraction (voir partie III.3.2.5). Après traitements, les données contiennent différents attributs qui se présentent sous la forme suivante :

N° point	X (m)	Y (m)	Z (m)	Temps GPS (sec)	Profondeur (m)	Intensité	Angle d'émission (deg)	Hauteur de vol (m)
1
2

Tableau 6 : format des données LiDAR analysées

Les intensités de chaque point sont analysées à partir d'un modèle physique décrit dans le manuel de [Guenther \(1985\)](#). Ce modèle s'inspire de la loi de *Beer-Lambert* pour l'atténuation d'un faisceau lumineux à travers un milieu aux propriétés optiques données.

Cette relation qui sera appliquée dans la suite de ce mémoire s'écrit sous la forme suivante :

$$I = I_{ref} e^{\left(\frac{-2K_d Z}{\cos \theta_w}\right)}$$

Équation 8 : modèle physique de décomposition de l'intensité reçu par le capteur LiDAR.

Avec :

I : l'intensité du signal laser reçu par le capteur LiDAR

I_{ref} : l'intensité de référence, normalisée selon le passage du pulse laser dans l'eau

K_d : coefficient d'atténuation diffus (en m^{-1})

Z : profondeur traversée par le pulse laser dans l'eau (en m)

θ_w : angle réfracté (en rad)

D'après l'Équation 8 et le modèle Wa-LID proposé dans l'article [Abdallah et al. \(2012\)](#), on peut s'attendre à ce que le terme « I_{ref} » dépende de la réflectance du fond, de la hauteur de vol et de l'angle d'émission (considéré ici comme étant l'angle d'incidence au niveau de l'interface air/eau).

Dans les analyses décrites dans la suite de ce mémoire, ce modèle sera calculé en estimant les inconnues (les facteurs « K_d » et « I_{ref} ») par la méthode des moindres carrés non linéaires. Par la suite, le facteur « K_d » sera considéré comme constant pour l'échantillon étudié. Mais, le facteur « I_{ref} » ne sera pas considéré comme constant car il dépend de nombreux paramètres ([Abdallah et al. 2012](#)), dont on cherche à étudier leurs impacts.

De plus, pour chaque extrait analysé, on estime la profondeur d'extinction du signal. Cette profondeur limite est définie comme étant la profondeur à laquelle 95% des points de l'échantillon ont une profondeur inférieure ou égale. Cette profondeur est nommée « $P_{95\%}$ ».

A partir des données collectées et du modèle utilisé (voir Équation 8), plusieurs informations seront analysées : la turbidité de l'eau, la réflectance du fond, la dépendance de l'intensité à la hauteur de vol et la dépendance de l'intensité à l'angle d'émission.

III.5.1 Turbidité de l'eau :

A partir des projets analysés pour ce travail de recherche, la turbidité de l'eau va être estimée par le biais du coefficient d'atténuation diffus à l'aide de l'Équation 8.

La variation selon les projets du coefficient d'atténuation diffus sera analysée. Pour ce mémoire, les résultats seront présentés selon les 3 environnements aquatiques rencontrés : domaine côtier, lac et rivière. Pour chaque environnement, un extrait d'un projet sera présenté.

Pour chaque projet/environnement, l'extrait étudié correspond à un groupe de points sélectionné de façon précise. L'extrait en question doit comporter une augmentation la plus continue possible de la profondeur jusqu'à extinction du signal. De plus, la surface au fond doit être la plus homogène possible au niveau de sa réflectance et de sa pente.

III.5.1.1 Domaine côtier :

Pour le domaine côtier, le site de Bertheaume dans le Finistère a été choisi. L'Anse de Bertheaume se situe à quelques kilomètres à l'ouest de Brest (voir Figure 21). Ces données ont été acquises dans le cadre d'un projet de recherche avec l'Institut Universitaire Européen de la Mer à Brest.



Figure 21 : localisation du site d'étude de Bertheaume.

III.5.1.2 Lac :

Pour le cas des lacs, le site d'Abisko a été choisi. Il s'agit d'une grande étendue (environ 132 km²) dans la partie nord de la Suède comptant plus d'une centaine de lacs répertoriés (voir Figure 22). Cette zone, au nord du Cercle Polaire Arctique, a été survolée dans le cadre d'un projet de recherche en collaboration avec l'Université d'Umeå (Suède).



Figure 22 : localisation du site d'Abisko (Suède).

III.5.1.3 Rivière :

Pour le cas des rivières, le site du Rhin a été sélectionné. Il s'agit d'un tronçon d'environ 10 km entre les villes de Kembs et Village-Neuf dans le Haut-Rhin (68). Cette zone a été survolée afin d'étudier le Rhin ainsi que le Grand Canal d'Alsace (voir Figure 23), dans le cadre d'acquisitions réalisées pour EDF.

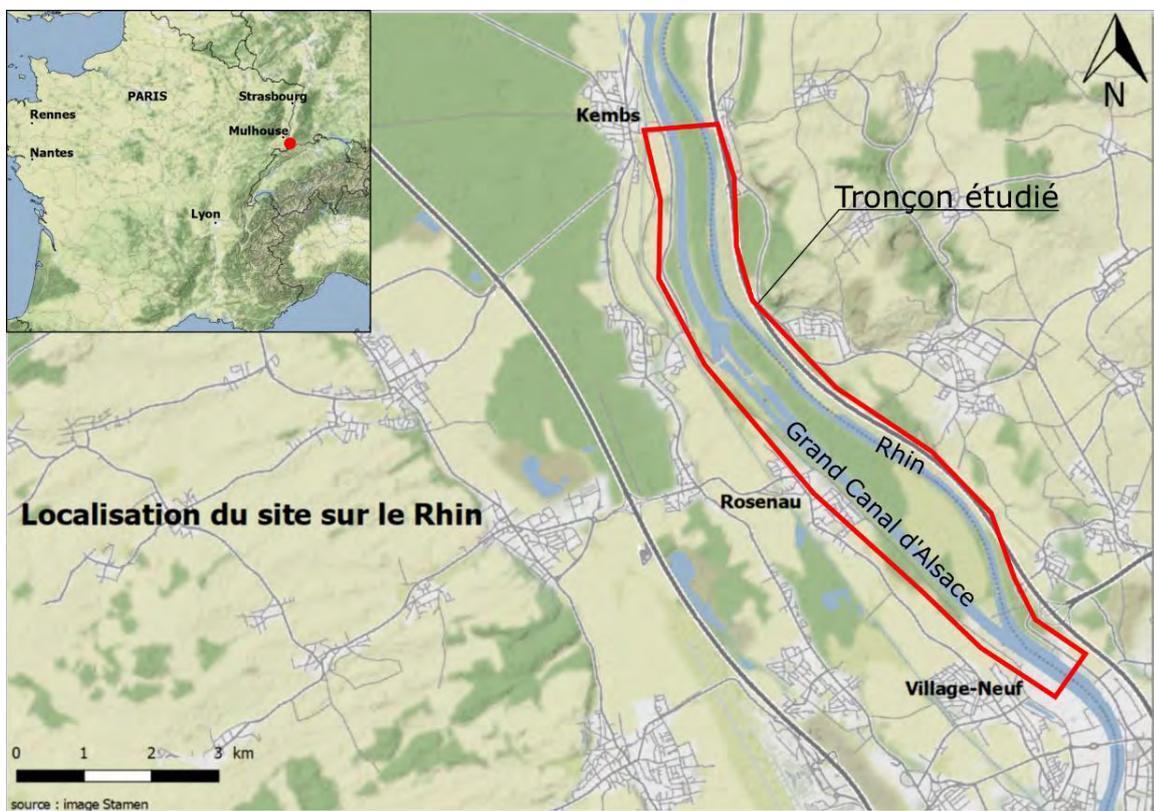


Figure 23 : localisation du site sur le Rhin.

III.5.2 Réflectance des surfaces :

L'objectif de cette partie est d'étudier la variation du facteur « I_{ref} » pour les différents environnements étudiés. Puis, d'analyser la relation entre le terme « I_{ref} » et l'intensité d'une zone émergée pour des surfaces contenant les mêmes types de matériaux.

Pour cela, la méthode mise en place consiste sélectionner deux zones (la première émergée, la seconde immergée) à calculer le ratio entre le facteur « I_{ref} » moyen selon l'Équation 8 pour une surface immergée (i.e humide) et l'intensité moyenne d'une surface émergée (i.e sèche). Les deux surfaces sélectionnées doivent contenir le même type de sol (pour cette étude, du sable) et être à des hauteurs de vol similaire (i.e à ± 10 m). Ce facteur « I_{ref} » est calculé pour tous les points de l'échantillon en connaissant la valeur du terme « K_d » estimé préalablement. L'utilisation du facteur « I_{ref} » présente l'avantage que cette « intensité de référence » n'est plus affectée par l'atténuation du faisceau laser liée à la turbidité de l'eau en fonction de la profondeur. Le rapport ainsi obtenu permet de connaître le ratio de réflectance entre une surface émergée (sèche) et la même surface immergée (humide).

Cette donnée peut s'avérer importante car, en connaissant ce ratio pour une surface donnée et la réflectance de cette surface sèche, il est alors possible de prédire sa réflectance humide. En connaissant cette réflectance pour une surface immergée, il est alors plus aisé de pouvoir estimer la profondeur maximale de mesure selon le modèle Wa-Lid ([Abdallah et al., 2012](#)) car, il y a une inconnue en moins.

Dans le cadre de ce travail de recherche concernant la réflectance des surfaces, plusieurs sites ont été étudiés :

- En zone côtière : les sites de Bertheaume et les Glénan dans le Finistère (29)
- En embouchure de fleuve : l'estuaire de la Sienne dans la Manche (50)
- En zone fluviale : la Loire dans son tronçon en amont d'Angers (49), l'Ain dans son tronçon en amont de la confluence avec le Rhône pour les vols réalisés en 2015 et en 2016.

Pour chaque site, un ou plusieurs extraits ont été sélectionnés en prenant deux groupes de points (émergés et immergés), les plus proches spatialement et avec le même type de surface. Pour ce mémoire, cette étude a été réalisée uniquement pour du sable qui peut néanmoins varier dans sa granulométrie selon les sites.

III.5.3 Dépendance de l'intensité à la hauteur de vol :

L'analyse de l'impact de la hauteur de vol consiste à regarder la variation du terme « I_{ref} » en fonction de la hauteur de vol pour une même surface étudiée. En effet, d'après le modèle utilisé (qui s'inspire du modèle Wa-Lid), la hauteur de vol impactera le terme « I_{ref} » ce qui aura pour conséquence d'influer sur la profondeur maximale de mesure (voir partie II.4).

Pour l'étude de la dépendance de l'intensité à la hauteur de vol, deux projets dans le domaine côtier ont été utilisés :

- Le site de Bertheaume
- Le site de la plage des Blancs-Sablons

Ces deux sites présentent la particularité d'avoir été survolés plusieurs fois dans la même journée à différentes hauteurs de vol. On considère donc que la turbidité de l'eau (i.e le « K_d ») changera relativement peu.

La méthode consiste donc dans un premier temps à analyser la variation du terme « I_{ref} » moyen, estimé par moindres-carrés non linéaires, en fonction de chaque passage (à des hauteurs de vol différentes). Puis, dans un second temps, les résultats seront comparés au modèle utilisé afin de confirmer ou non les hypothèses du modèle.

III.5.4 Dépendance de l'intensité à l'angle d'émission :

Pour analyser la dépendance de l'intensité à l'angle d'émission, la méthode consiste à étudier pour un échantillon donné, la variation du terme « I_{ref} » calculée pour chaque point en fonction de son angle d'émission (considéré ici comme étant égal à l'angle d'incidence).

Pour ce mémoire, deux échantillons sont présentés, qui sont représentatifs des résultats obtenus. Le premier correspond à un extrait des données du projet sur le site de Bertheaume. L'extrait présenté, correspond à un groupe de points qui ont la hauteur de vol à plus ou moins 10 m. Le second, correspond à un extrait issu du projet sur les Glénan.

IV. Résultats

IV.1 Classification

Le processus de classification implémenté en Python dans le cadre de ce travail de recherche, permet de catégoriser un nuage de points du canal 3 (vert) selon les 3 classes définies préalablement : zone émergée, zone immergée et surface d'eau. Pour ce mémoire, la version du script implémenté en Python a été testé pour le projet sur les Glénan (voir Figure 24).

La chaîne de traitements pour la classification du nuage de points permet d'obtenir un fichier au format « LAS » qui contient trois classes : les zones émergées, les zones immergées et la surface d'eau. De plus, il est possible d'enregistrer la bathymétrie dans un fichier à part en ajoutant un champ supplémentaire correspondant à la profondeur (en m). Les résultats montrent que la classification fonctionne relativement correctement même si des améliorations sont possibles notamment pour affiner la classification dans les zones peu profondes (lorsque la profondeur est inférieure à 1 m).

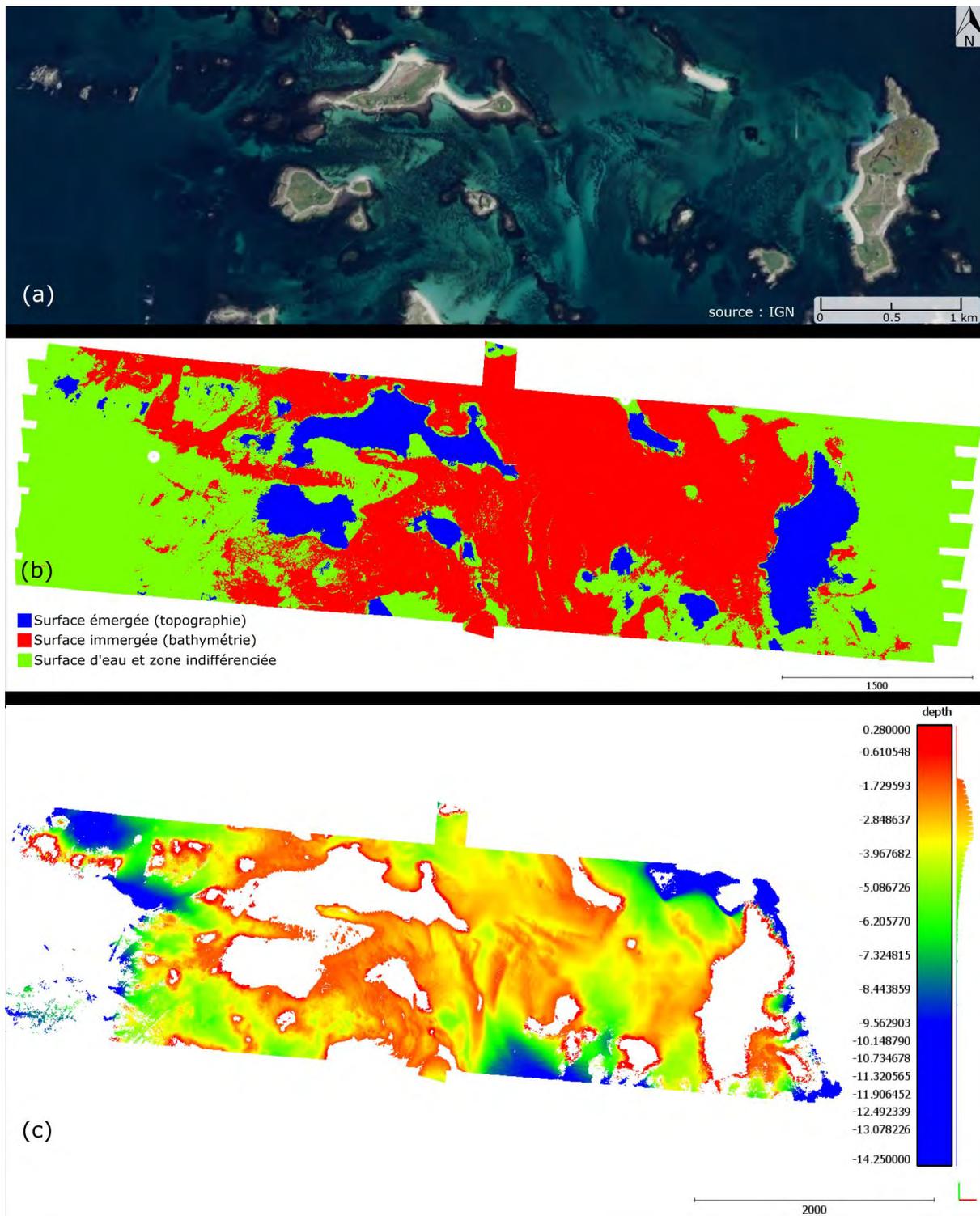


Figure 24 : Projet de levé LiDAR sur l'archipel des Glénan (29). (a) image aérienne IGN, (b) résultat de la classification réalisée par le script Python mis en place pour ce travail de recherche, (c) représentation de la bathymétrie issue de cette classification.

IV.2 Caractéristiques de l'environnement survolé

IV.2.1 Propriétés optiques de l'eau :

Les données analysées dans le cadre de ce travail ont fait l'objet d'une modélisation selon l'Équation 8 afin d'estimer par les moindres-carrés non linéaires les termes moyens « I_{ref} » et « K_d ».

Cette estimation se fait en analysant la répartition des points de l'échantillon dans un graphique du logarithme de l'intensité en fonction de la distance immergée (i.e la profondeur divisée par le cosinus de l'angle réfracté). Dans ce type de graphique, la droite de régression correspondante au modèle utilisé sera caractérisée par : sa pente « K_d » et par son ordonnée à l'origine « I_{ref} ». Pour ce graphique de l'estimation du « K_d », les points ayant les intensités les plus faibles ne sont pas utilisés afin de ne pas influencer l'estimation des inconnues du modèle car ces points sont les plus sensibles au bruit résiduel.

De plus, l'histogramme des profondeurs est réalisé pour chaque échantillon étudié afin de calculer la valeur de la profondeur limite « $P_{95\%}$ ».

L'étude des termes estimés est réalisée selon les 3 environnements hydrologique rencontrés (domaine côtier, lac et rivière).

Les paramètres estimés pour l'ensemble des échantillons étudiés sont présentées dans un tableau récapitulatif en Annexe 5.

IV.2.1.1 *Domaine côtier :*

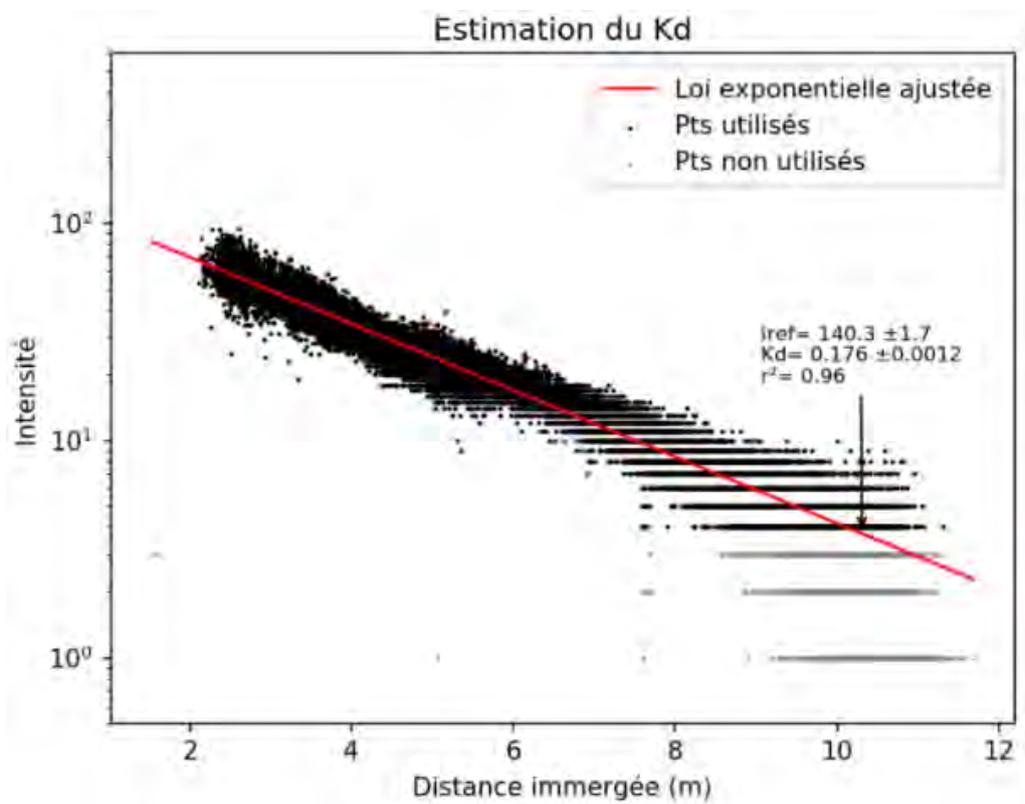
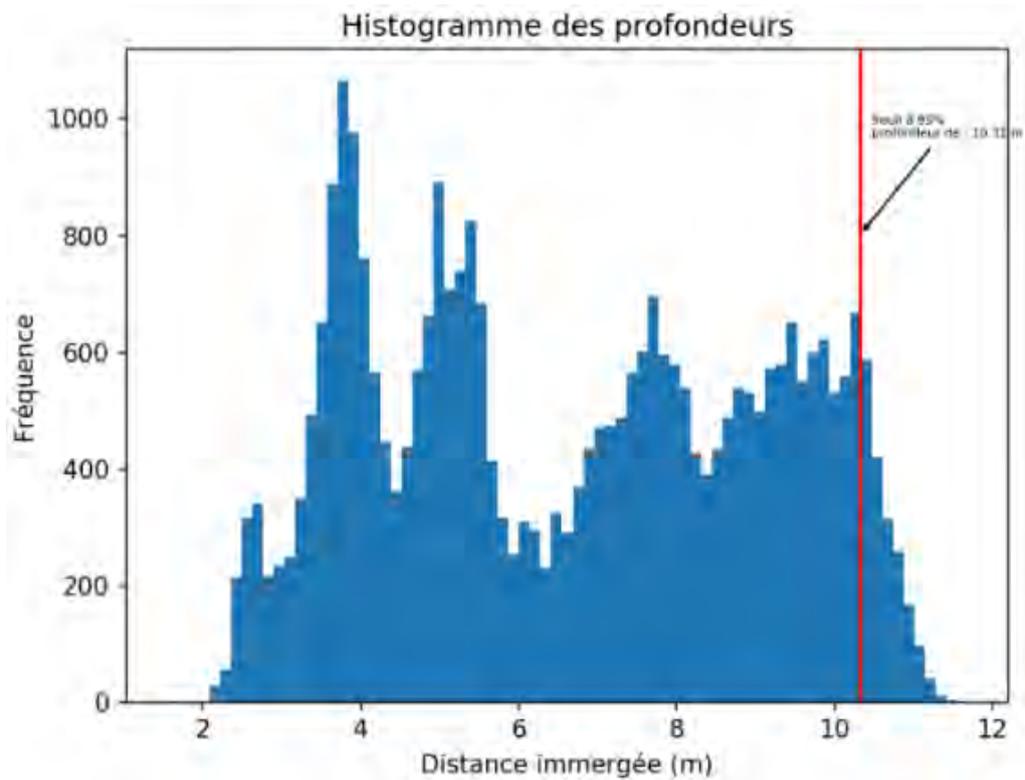
Pour le site d'étude de Bertheaume, l'extrait sélectionné (d'environ 2 ha), correspond à un échantillon de 32 513 points dans la partie Est du site survolé (voir Figure 25). Il s'agit d'un échantillon comprenant majoritairement du sable comme surface de fond. Cet extrait est un exemple parmi d'autres mais il a été choisi car il comprend une grande gamme de profondeur et que la réflectance du fond est assez homogène.

L'histogramme des profondeurs montre que la profondeur limite « $P_{95\%}$ » est de 10.31 m (voir Figure 26). Dans cette figure, les bosses que l'on peut remarquer s'expliquent par le fait qu'un pic dans l'histogramme correspondra à une zone de replat dans l'échantillon. Ceci aura pour conséquence d'engendrer plus de points ayant la même profondeur. La baisse brutale de la fréquence pour la grande profondeur indique la profondeur limite, c'est-à-dire la profondeur d'extinction que l'on cherche à estimer le plus fidèlement possible.

Le graphique de l'intensité en fonction de la distance immergée (voir Figure 27) montre que le « I_{ref} » estimé est égal à environ 140 ± 2 tandis que le terme « K_d » est lui égal à environ $0.176 \text{ m}^{-1} \pm 0.001$ avec un coefficient de détermination égal à 0.96. On remarque l'homogénéité de la réflectance du fond par l'alignement des points dans ce graphique avec assez peu de valeurs aberrantes. Ainsi, le modèle utilisé est relativement bien ajusté comme le montre la valeur du coefficient de détermination.



Figure 25 : localisation de l'échantillon étudié sur le site de Bertheaume.



IV.2.1.2 Lac :

Pour le site d'étude d'Abisko, l'extrait sélectionné correspond à un lac d'environ 20.5 ha, représenté par un échantillon de 12 048 points dans la partie nord du site survolé (voir Figure 28). Le site étant difficile d'accès et l'eau du lac étant relativement trouble, il est difficile de connaître la nature exacte de la surface au fond.

L'histogramme des profondeurs montre que la profondeur limite « $P_{95\%}$ » est de 3.19 m (voir Figure 29). Pour ce graphique, on remarque des pics dans l'histogramme qui s'expliquent de la même manière que pour la partie sur le domaine côtier (voir IV.2.1.1). C'est-à-dire, les zones de replats ont pour conséquences de représenter plus de points ayant la même profondeur. La profondeur limite estimée se situe dans la zone où la fréquence diminue brutalement (pour la Figure 26, entre 10m et 11m de profondeur). Il s'agit de la zone d'extinction où le capteur ne détecte plus de signal.

Le graphique de l'intensité en fonction de la distance immergée (voir Figure 30) montre que le « I_{ref} » estimé est égal à environ 25.5 ± 0.7 tandis que le terme « K_d » est lui égal à environ $0.364 \text{ m}^{-1} \pm 0.009$ avec un coefficient de détermination égal à 0.56. Pour ce graphique, on remarque que les points sont beaucoup plus dispersés. C'est-à-dire, que pour chaque gamme d'intensité, on retrouve des points ayant des profondeurs significativement différentes. Ce phénomène s'explique par le fait que la surface au fond n'est pas homogène ce qui entraîne une fluctuation de la réflectance du fond. Le modèle sera donc plus difficile à ajuster, ce qui se confirme par la valeur du coefficient de détermination qui indique une qualité moyenne de la prédiction réalisée par le modèle ajusté.



Figure 28 : localisation de l'échantillon étudié sur le site d'Abisko.

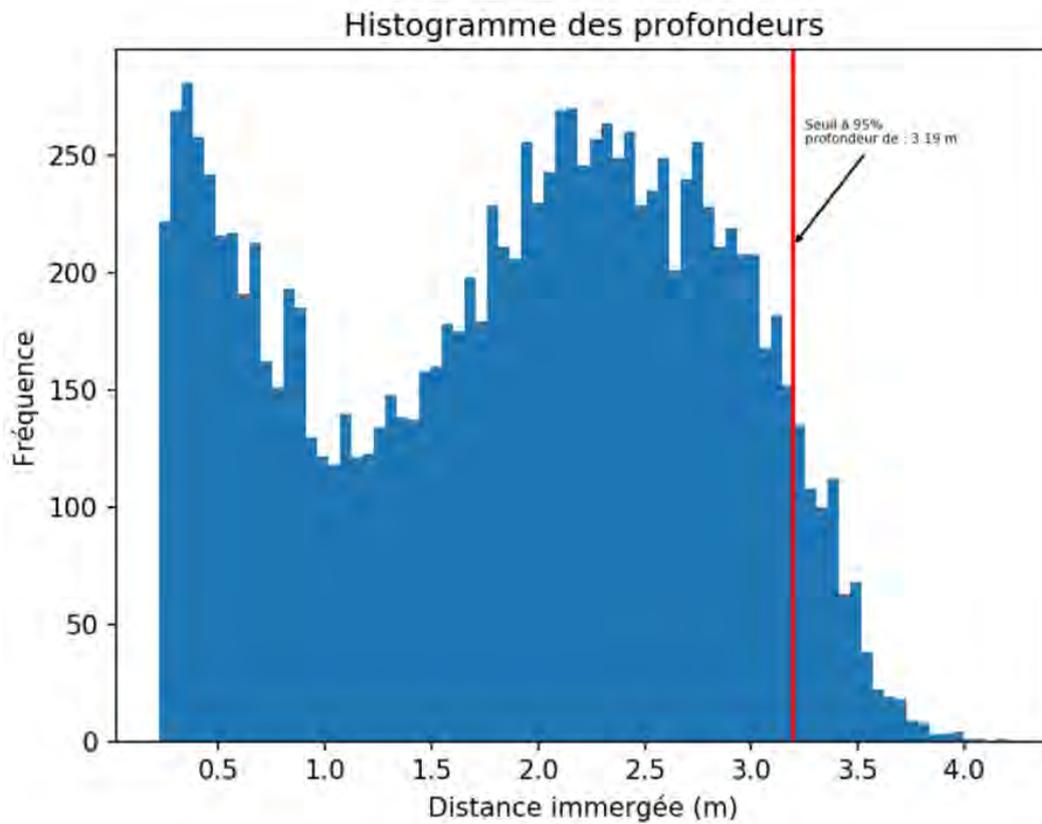


Figure 29 : histogramme des profondeurs pour le site d'Abisko.

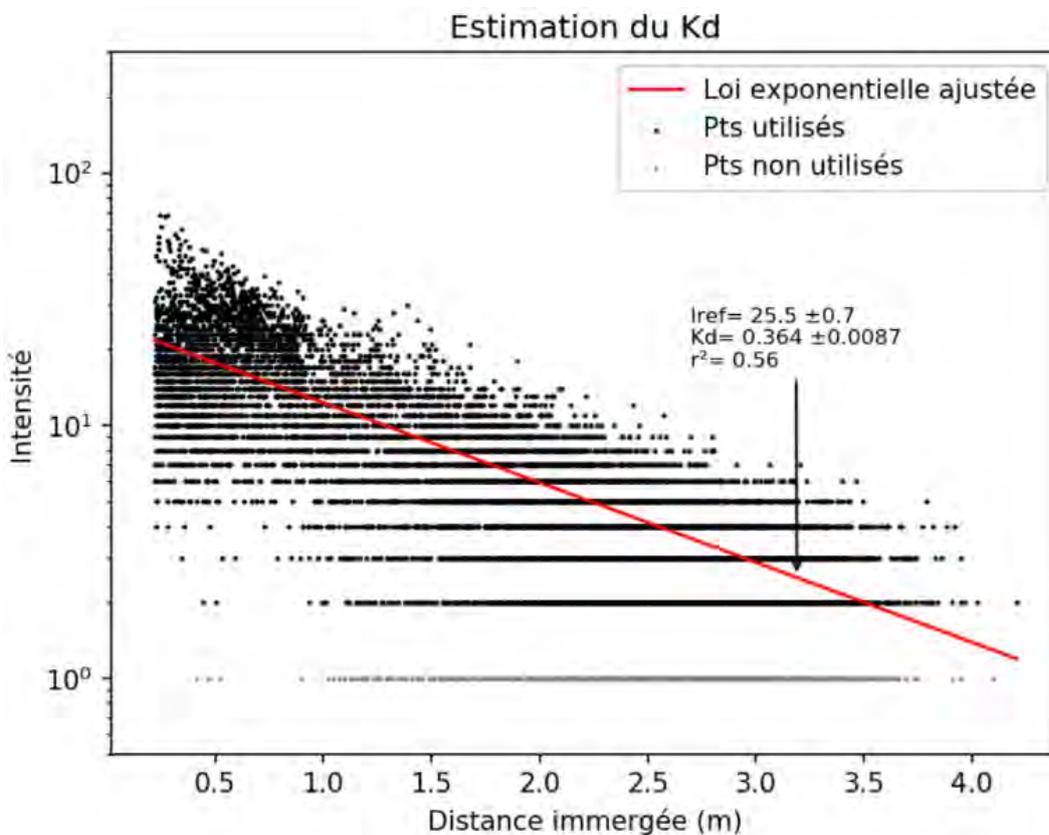


Figure 30 : graphique d'estimation du coefficient d'atténuation diffus pour le site d'Abisko.

IV.2.1.3 Rivière :

Pour le site d'étude sur le Rhin, l'extrait sélectionné correspond à une zone d'environ 2.5 ha, représentée par 17 942 points dans la partie sud du site survolé (voir Figure 31). L'eau étant relativement trouble pour ce tronçon, il est difficile d'estimer la nature exacte du fond, toutefois, on peut faire l'hypothèse qu'il s'agit d'un mélange de sable et de vase avec la présence de végétation aquatique.

L'histogramme des profondeurs montre que la profondeur limite « $P_{95\%}$ » est de 1.8 m (voir Figure 32). Pour ce graphique, on remarque un seul pic en fréquence qui montre une zone où la pente diminue, juste avant la zone d'extinction du signal LiDAR. Ceci implique donc que l'échantillon comprend des points ayant une pente relativement homogène et que le fond comprend une pente assez faible. La profondeur limite estimée se situe de la même manière que les autres environnements hydrologiques, au niveau de la baisse brutale des fréquences liée à l'atténuation du signal. On retrouve ainsi sur cet échantillon, une profondeur limite assez faible (i.e 1.8 m).

Le graphique de l'intensité en fonction de la distance immergée (voir Figure 33) montre que le « I_{ref} » estimé est égal à environ 80 ± 2 tandis que le terme « K_d » est lui égal à environ $0.724 \text{ m}^{-1} \pm 0.008$ avec un coefficient de détermination égal à 0.83. Pour ce graphique on remarque des points assez peu dispersés, ce qui montre une certaine homogénéité de la réflectance de la surface du fond même si on distingue quelques valeurs aberrantes. Ce relativement bon alignement des points est montré par une bonne valeur de prédiction faite par le modèle, comme le montre la valeur du coefficient de détermination.



Figure 31 : localisation de l'échantillon étudié sur le Rhin.

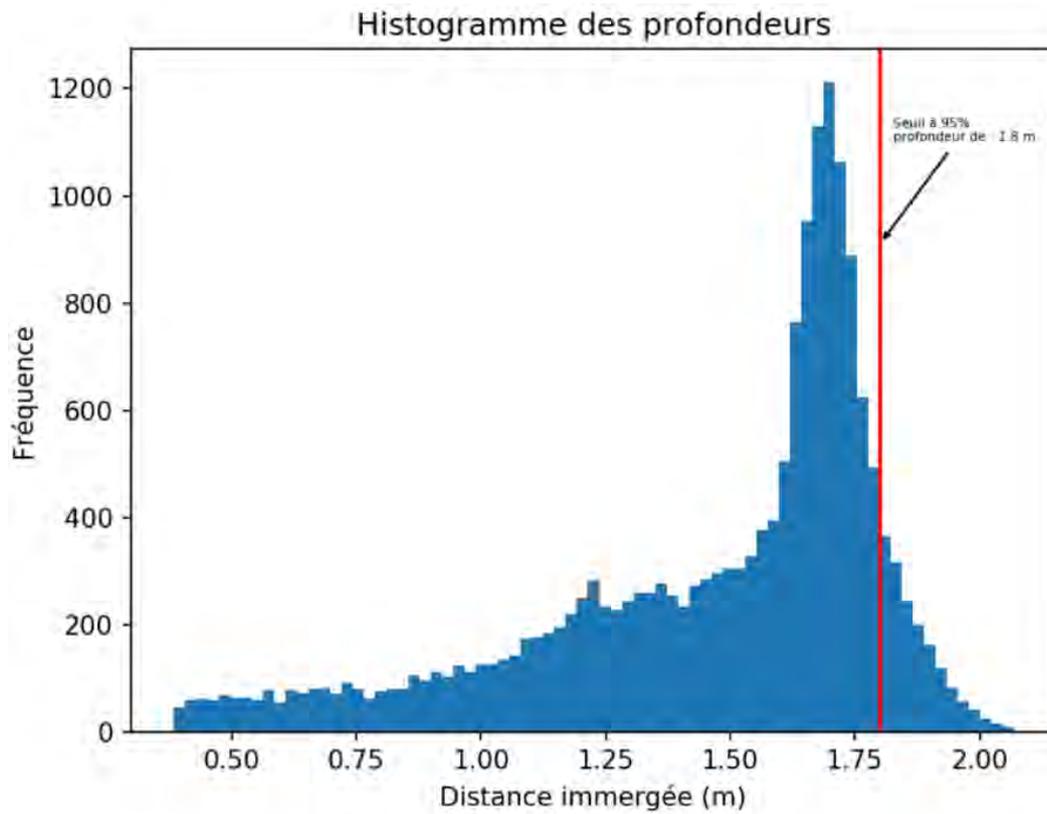


Figure 32 : histogramme des profondeurs pour le tronçon sur le Rhin.

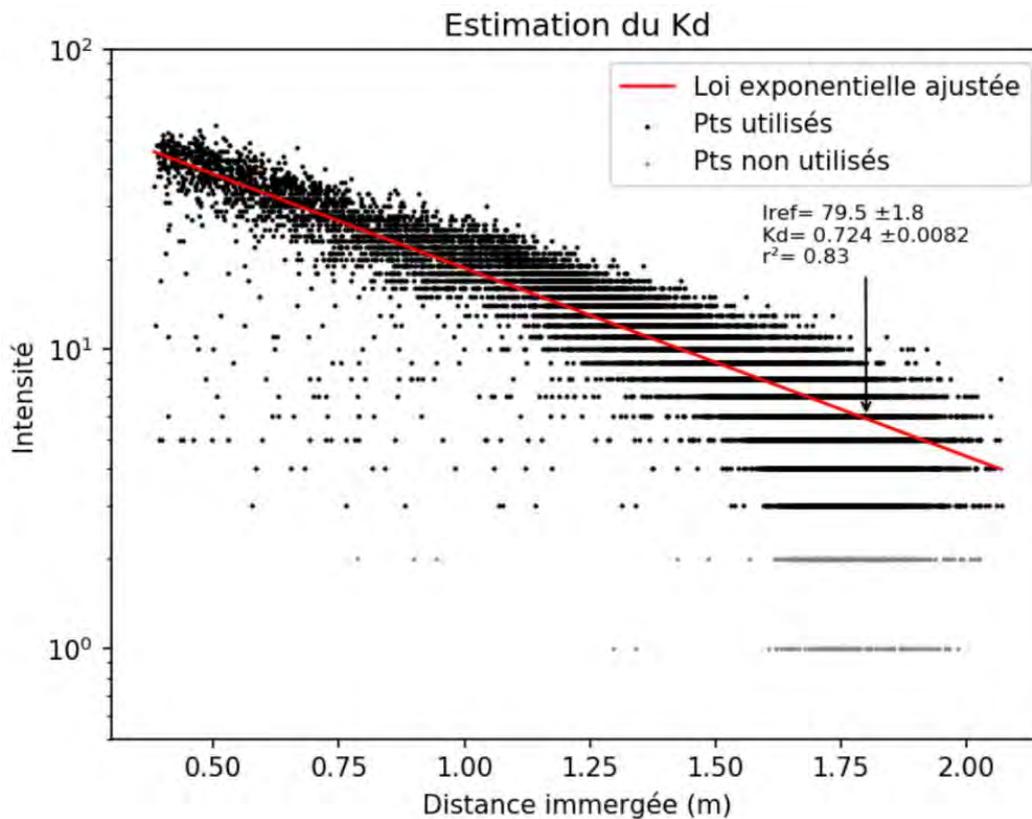


Figure 33 : graphique d'estimation du coefficient d'atténuation diffus pour le tronçon sur le Rhin.

IV.2.2 Réflectance du fond :

Pour cette partie sur l'analyse de la réflectance du fond, on observe le ratio entre l'intensité et le « I_{ref} » moyen, à partir de plusieurs sites étudiés. Sur chaque site, plusieurs échantillons ont été sélectionnés afin de calculer ce ratio pour du sable. Les 6 sites présentés dans cette partie (voir Figure 34) présentent des valeurs moyennes d'intensité assez diverses. Néanmoins, on observe une relation proportionnelle en moyenne entre les intensités émergées et les « I_{ref} » correspondant. Les ratios calculés pour cette partie présentent toutefois une variabilité assez grande entre les différents sites ou bien pour un même projet (e.g Ain 2015).

La droite ajustée comporte un coefficient de détermination égal à 0.6, ce qui correspond à une qualité de prédiction moyenne. La variabilité entre les différents sites d'étude est liée aux hauteurs de vol qui varient d'un site à l'autre. Ainsi, les échantillons sur les Glénan comportent des « range moyen » d'environ 335m tandis que sur le site de Bertheaume, les échantillons comportent des « range moyen » d'environ 390m (voir Annexe 2). La variabilité pour un même site d'étude peut être liée à une variation de la réflectance du sol étudié.

On obtient un ratio moyen d'environ 0.23 pour le sable à partir des données utilisées, avec une erreur quadratique moyenne d'environ 0.09. Autrement dit, pour une surface sablonneuse, lorsque cette surface est humide (i.e sous l'eau), il y a une perte d'intensité d'environ 77% en moyenne par rapport à l'intensité de cette même surface sèche et à l'air libre. On remarque toutefois des valeurs hautes de ce ratio (i.e les données sur les Glénan) et des valeurs assez basses (i.e les données sur l'Ain 2015 et 2016). Ces différences pourraient s'expliquer par une variation de la granulométrie du sable entre les sites, ou bien une modification significative de la surface sous l'eau par des biofilms de nature différente.

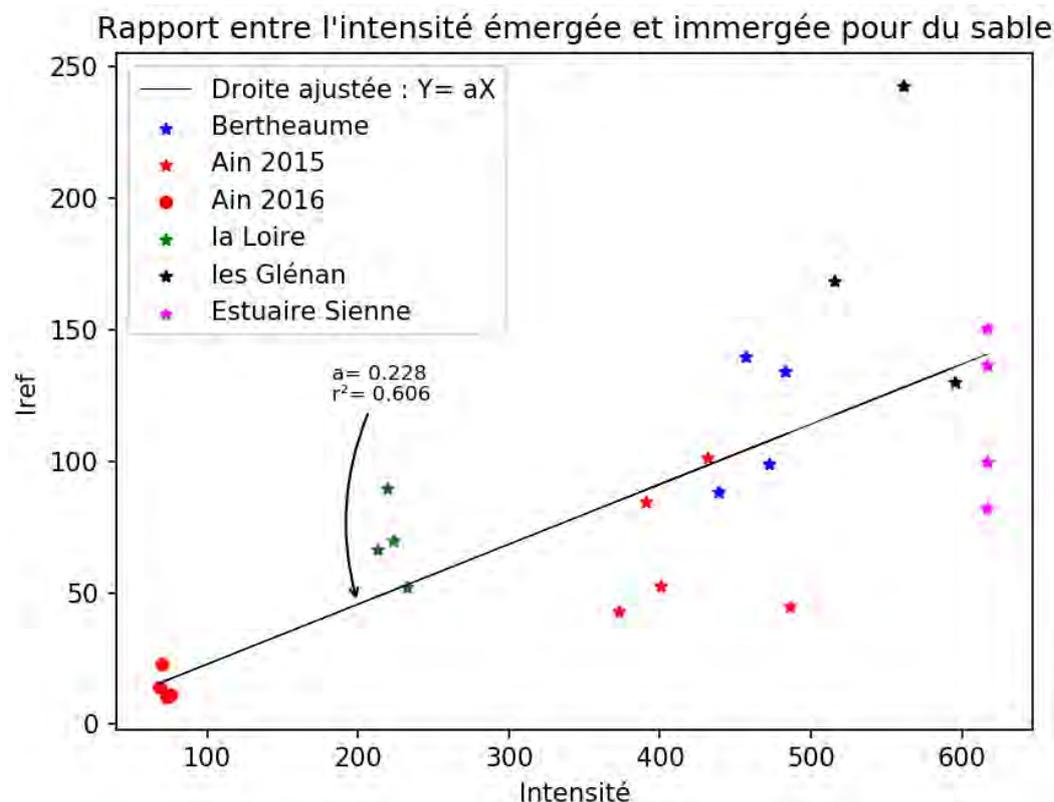


Figure 34 : graphique du ratio d'intensité entre des surface émergée et immergée.

Les valeurs présentées dans ce graphique sont consultables dans un tableau situé en Annexe 2.

IV.3 Caractéristiques du vol

IV.3.1 Hauteur de vol :

L'analyse de la dépendance à la hauteur de vol a été réalisée à partir des données collectées sur les sites de Bertheaume et Blancs-Sablons dans le Finistère (29). Ces sites ont été survolés lors de la même campagne de levé à différentes altitudes. Il est donc possible de comparer les valeurs des « I_{ref} » estimés puisqu'il s'agit des mêmes surfaces survolées. De plus, en partant de l'hypothèse qu'entre les différents passages, la turbidité de l'eau a relativement peu changé, on considère alors que le coefficient d'atténuation diffus est constant.

Dans les tableaux suivants, on appelle « *range moyen* » la distance laser parcourue par l'impulsion. Cette distance correspond à la hauteur de vol divisée par le cosinus de l'angle d'émission.

Le site de Bertheaume a été survolé à 3 altitudes différentes : environ 600 m, 400 m et 300 m. les résultats sont présentés par le tableau suivant :

Tableau 7 : résultats obtenus pour le site de Bertheaume.

Extrait	Range moyen (m)	Kd estimé (/m)	Profondeur 95% (m)	Iref estimé
n°1	592.7	0.164	8.01	44.8
n°2	399.5	0.197	9.8	144.6
n°3	303.1	0.204	10.92	250.2

Le site de la plage des Blancs-Sablons a été survolé aux altitudes suivantes : environ 410 m, 370 m et 250 m. Les résultats sont présentés par le tableau suivant :

Tableau 8 : résultats obtenus pour le site de Blancs-Sablons.

Extrait	Range moyen (m)	Kd estimé (/m)	Profondeur 95% (m)	Iref estimé
n°1	407.4	0.204	10.11	189.9
n°2	377.8	0.208	10.51	220.6
n°3	256.6	0.218	11.53	530.5

L'histogramme pour l'estimation de la profondeur maximale « $P_{95\%}$ » et le graphique de l'estimation des paramètres « K_d » et « I_{ref} » pour les échantillons des deux sites sont présentés en Annexe 3.

A partir des deux tableaux ci-dessus, on observe un lien significatif entre le « range moyen » et la profondeur maximale « $P_{95\%}$ ». Toutefois, cette dépendance est visible dans des proportions différentes entre les deux sites étudiés. Ceci peut s'expliquer par une variation de la réflectance du fond entre les deux sites d'étude.

Néanmoins, on peut remarquer que les valeurs des différents coefficients d'atténuation diffus estimés sont relativement constantes sur un même site. L'écart sur le « K_d » que l'on peut observer pour l'extrait n°1 du site de Bertheaume (0.164) peut être lié à une variation locale de la turbidité de l'eau ou bien, à la méthode d'estimation du modèle.

En effet, d'après le modèle Wa-Lid, les deux variables « I_{ref} » et « K_d » sont indépendantes entre elles. Mais, lors du calcul de ces paramètres par moindres-carrés, il y a une interdépendance entre les deux variables lors de leurs estimations. C'est-à-dire, que lors de l'estimation du modèle par moindres-carrés, les deux variables sont estimées afin de minimiser les résidus des variables. Or il est possible que l'estimation du « I_{ref} » impacte les résidus sur la variable « K_d » et inversement. Cette tendance resterait de faible ampleur, néanmoins, dans certain cas (nombre de points insuffisant dans l'échantillon, dispersion des points dans le graphique, trop de valeurs aberrantes, etc...), cet effet pourrait être significatif.

IV.3.2 Angle d'émission :

La dépendance de l'intensité à l'angle d'émission a été testée sur plusieurs échantillons pour différents sites en variant l'environnement hydrologique (domaine côtier, rivière et lac). La méthode utilisée consiste à regarder la variation du facteur « I_{ref} » moyen par gamme d'angle (pas de 1 degré). Cette méthode requière un grand nombre de points dans l'échantillon afin d'avoir des valeurs de « I_{ref} » moyen robustes. De plus, l'échantillon analysé doit aussi comporter une large gamme d'angles afin de pouvoir distinguer une dépendance significative ou non.

Les observations faites sur les données analysées montrent des résultats très variants. En effet, sur certains échantillons, on pourra observer une dépendance significative (voir Figure 36) tandis que sur d'autres, il ne sera pas possible de dire si l'angle d'émission a un impact réel sur l'intensité (voir Figure 35). Les graphiques ci-dessous montrent les deux résultats typiques observés : une dépendance significative et l'autre non :

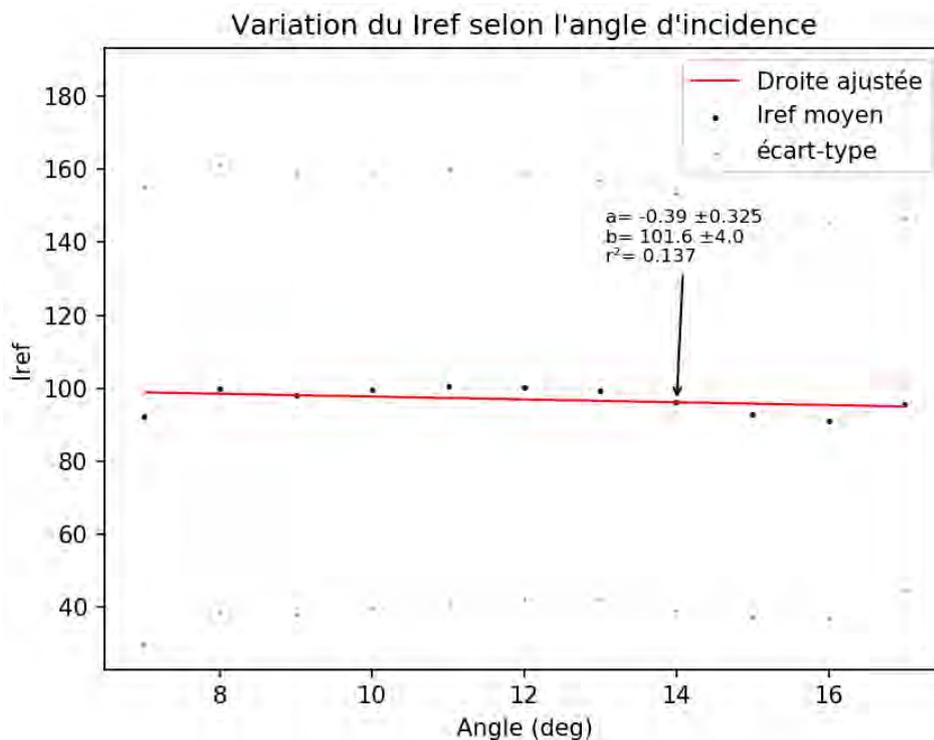


Figure 35 : graphique du Iref en fonction de l'angle d'émission sans dépendance significative. Echantillon extrait sur le site des Glénan.

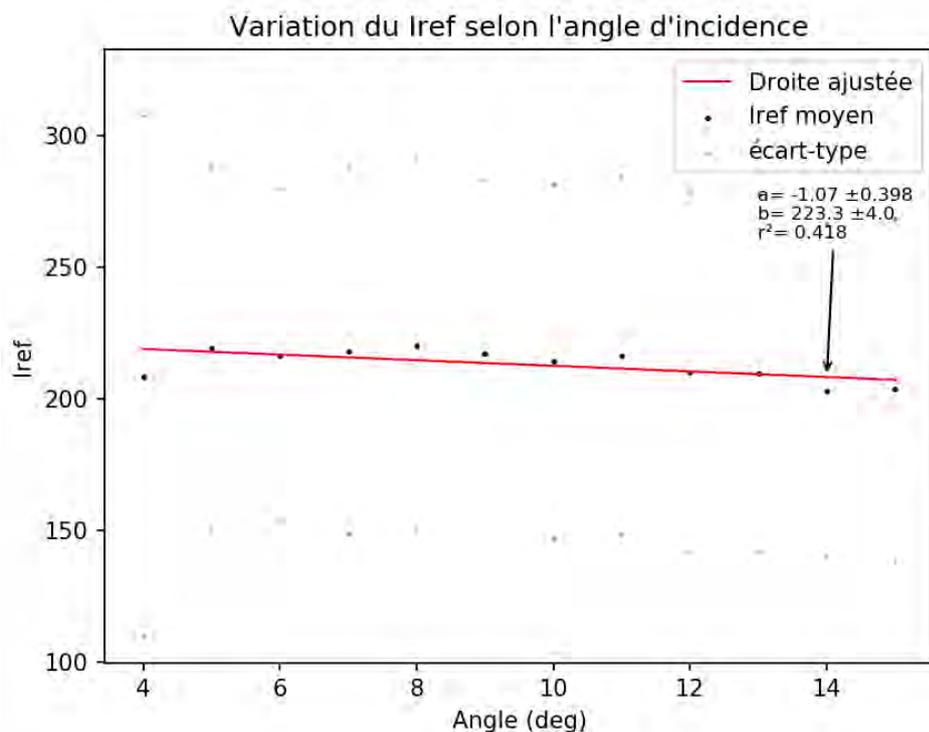


Figure 36 : graphique du I_{ref} en fonction de l'angle d'émission avec une dépendance significative. Echantillon extrait sur le site de Bertheaume.

Les résultats de ces deux échantillons sont assez représentatifs des observations faites sur l'ensemble des données collectées. En effet, la dépendance de l'intensité à l'angle d'émission ne semble pas être liée à l'environnement hydrologique car pour des rivières ou des lacs, on observe des échantillons avec une dépendance significative et d'autres non. Néanmoins, les analyses réalisées montrent que l'échantillon étudié doit comporter un assez grand nombre de points (supérieur à 10 000 environ) afin de pouvoir réaliser un calcul des « I_{ref} » moyen pour chaque gamme d'angle qui soit robuste. Finalement, on peut remarquer que pour les angles étudiés, il n'est pas possible d'affirmer qu'il y a une dépendance significative.

IV.3.3 Coût d'un levé LiDAR

Cette partie vise à illustrer de manière concrète l'impact des facteurs montrés dans les parties précédentes sur le coût d'un vol LiDAR. Pour cela, cette étude a été réalisée à l'aide du logiciel Optech FMS Planner permettant de réaliser des plans de vol dans le cadre d'une préparation pour une campagne de levé LiDAR aéroporté.

Cette étude va donc illustrer la variation du coût d'un levé à partir de la variation de certains paramètres. Pour cela, trois scénarios sont analysés :

- Cas 1 : configuration du vol permettant d'avoir la profondeur maximale la plus grande possible
- Cas 2 : configuration du vol afin d'obtenir une profondeur maximale de 5m
- Cas 3 : configuration du vol afin d'avoir un coût le plus faible possible. C'est-à-dire en minimisant le temps de vol.

Pour ces trois cas de figure, pour la même zone survolée, les propriétés optiques de l'environnement sont considérées comme constante. Ainsi, pour plan d'eau fictif survolé (d'environ 21 km²), on obtient une profondeur maximale de 5m pour une hauteur de vol de 400m. Enfin, la vitesse de l'avion est considérée comme constante avec une valeur de 120 nds (environ 222 km.h⁻¹) et, pour estimer le coût moyen uniquement lié au volet acquisition aéroportée, le prix est fixé à 900 €/heure avec une durée de boucle de l'avion entre deux passages de 5min.

IV.3.3.1 Cas n°1 :

Dans ce premier cas, l'objectif est d'obtenir la plus grande profondeur maximale possible. Pour cela, il est donc nécessaire de minimiser la hauteur de vol tout en minimisant la durée du vol.

Les paramètres choisis sont présentés par le tableau suivant :

Tableau 9 : paramétrage du plan de vol pour le cas de figure n°1.

Paramètres	Altitude (m)	Fréquence de balayage (Hz)	FOV (deg)	Laser PRF (kHz)	Densité moyenne (pt/m ²)
Valeurs	258	61	± 13	125	17

Ces paramètres donnent une durée de vol d'environ 3 heures et 17 minutes pour effectuer 26 passages, ce qui correspond à une distance parcourue d'environ 267 km et coût moyen d'environ 2955 €. Pour choisir ce paramétrage, le point de base était de minimiser l'altitude afin de garantir une profondeur maximale qui soit la plus grande possible. Ainsi, 258 m est l'altitude de vol la plus basse possible au regard des règles de sécurité oculaire pour les personnes au sol. Ensuite, les autres paramètres devaient être adaptés afin de minimiser le temps de vol tout en maximisant la densité moyenne théorique du nuage de points obtenus. Ainsi, la fréquence de tir laser est égale à 125 kHz, ce qui correspond au maximum possible par rapport à l'altitude de vol et aux règles de sécurité oculaire.

IV.3.3.2 Cas n°2 :

Dans ce deuxième cas, l'objectif est d'obtenir une profondeur maximale d'environ 5m. D'après les hypothèses de départ, le paramétrage doit consister à avoir une altitude de vol proche de 400m. Les paramètres choisis sont présentés par le tableau suivant :

Tableau 10 : paramétrage du plan de vol pour le cas de figure n°2.

Paramètres	Altitude (m)	Fréquence de balayage (Hz)	FOV (deg)	Laser PRF (kHz)	Densité moyenne (pt/m ²)
Valeurs	400	61	± 13	200	17

Ce paramétrage donne une durée de vol d'environ 2 heures et 8 minutes afin d'effectuer 17 passages, ce qui correspond à une distance parcourue d'environ 177 km et un coût moyen d'environ 1920 €. Pour choisir ce paramétrage, l'altitude de base est fixée à 400m afin d'avoir une profondeur maximale proche de 5m. Ensuite, les autres paramètres sont modifiés afin de maximiser la densité moyenne théorique. Ainsi, comme l'altitude de vol est plus importante par rapport au cas n°1, la fréquence de tir laser peut être augmentée à 200 kHz.

IV.3.3.3 Cas n°3 :

Dans ce troisième cas, l'objectif est d'avoir un coût le plus faible possible, c'est-à-dire en minimisant le temps de vol sans avoir de contrainte sur la profondeur maximale de mesure. Toutefois, la densité moyenne théorique doit rester acceptable (i.e supérieure à 10 pt/m²). Les paramètres choisis sont présentés par le tableau suivant :

Tableau 11 : paramétrage du plan de vol pour le cas de figure n°3.

Paramètres	Altitude (m)	Fréquence de balayage (Hz)	FOV (deg)	Laser PRF (kHz)	Densité moyenne (pt/m ²)
Valeurs	565	53	± 15	250	13

Ce paramétrage donne une durée de vol d'environ 1 heure et 21 minutes pour effectuer 11 passages et parcourir 117 km. Le coût moyen correspondant est donc d'environ 1215 €.

Pour choisir ce paramétrage, l'objectif afin de minimiser le temps de vol est d'avoir une altitude la plus grande possible (i.e 600m pour des levés bathymétriques avec le canal vert). Mais, pour avoir une densité moyenne théorique convenable, supérieure à 10 pt/m², la fréquence de tir PRF doit alors être la plus élevée possible. Or, lorsque la fréquence de tir est supérieure à 225 kHz, le phénomène de « blind zone » descend à des altitudes inférieures à 600m.

Les « blind zone » correspondent à des gammes d'altitude pour lesquels l'instrument ne pourra pas fonctionner. En effet, lorsque la fréquence de tir devient importante (i.e >225 kHz), le temps mis par l'impulsion laser pour parcourir le trajet aller-retour correspond au temps séparant deux tirs laser. Or l'instrument utilisé ne peut pas gérer à la fois une émission laser et une réception en même temps.

Ainsi, pour une fréquence de tir fixée à 250 kHz, l'altitude maximale permise est d'environ 565m. Ensuite, l'angle de balayage est plus important que pour les cas n°1 et n°2 afin de diminuer le temps de vol.

V. Discussion

V.1 Caractéristiques de l'environnement survolé

V.1.1 Propriétés optiques de l'eau :

Les résultats observés selon les 12 sites analysés montrent des valeurs de « K_d » et « I_{ref} » différents (voir Annexe 5). Les graphiques présentés selon l'environnement hydrologique montrent bien que de manière générale, dans le domaine côtier, les valeurs de coefficient d'atténuation et les profondeurs maximales mesurées sont plus importantes que pour les rivières ou les lacs. On peut remarquer cette caractéristique en réalisant un graphique comparant les profondeurs maximales mesurées « $P_{95\%}$ » et les profondeurs estimées selon l'Équation 8 (voir Figure 37).

En effet, la formulation utilisée dans l'Équation 8 permet de relier l'intensité reçue selon différentes variables (les facteurs « K_d » et « I_{ref} » ainsi que la profondeur et l'angle réfracté). En modifiant cette formulation, on obtient une relation entre la profondeur maximale théorique et les différentes variables précédentes :

$$P_{95\%} = \frac{\ln(I_{ref}) - \ln(I_{lim})}{2K_d}$$

Équation 9 : relation entre les facteurs K_d , I_{ref} et la profondeur maximale de mesure. Issue de l'Équation 8.

Avec :

$P_{95\%}$: la profondeur maximale à 95% en mètre (voir partie III.5)

I_{ref} : intensité de référence (voir Équation 8)

I_{lim} : intensité limite détectable par le capteur LiDAR fixée à 4.

K_d : coefficient d'atténuation diffus (en m^{-1})

D'après l'**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, la profondeur maximale théorique correspond à une distance immergée (i.e en prenant en compte l'angle réfracté). Pour ce graphique, on considère que l'angle réfracté est proche de 0 est donc que l'impact du cosinus de cet angle est négligeable.

Ce graphique est alors réalisé pour tous les échantillons de tous les projets étudiés :

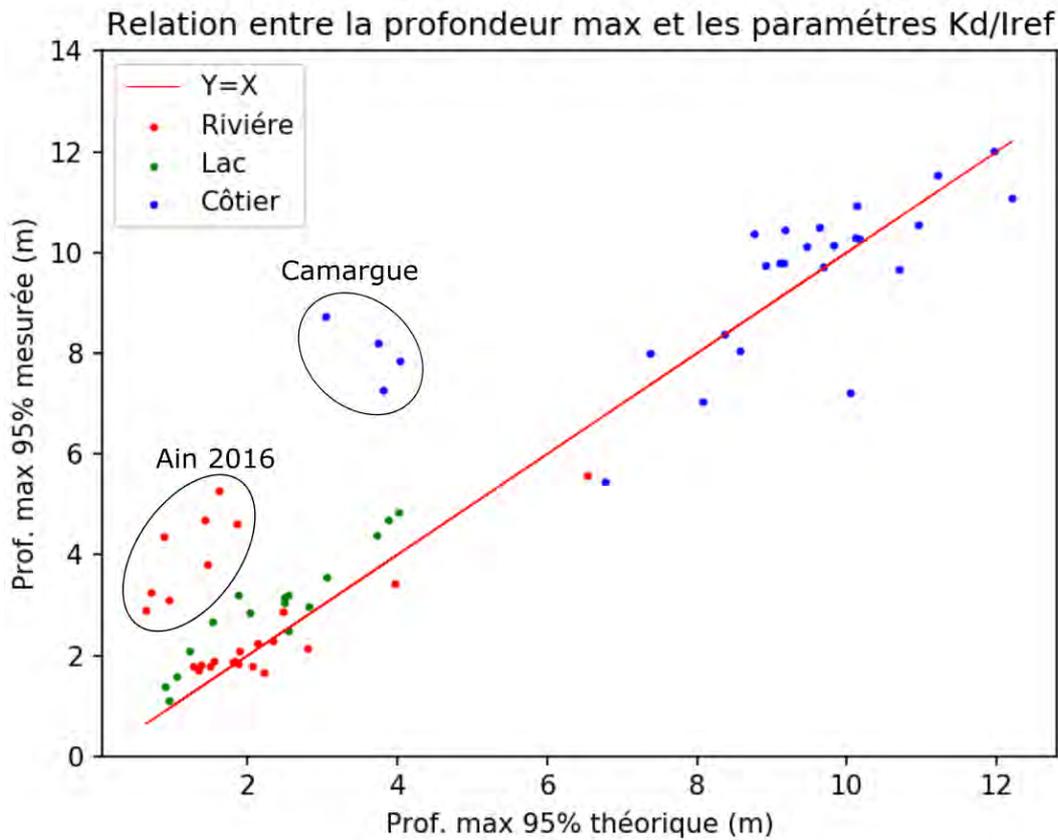


Figure 37 : relation entre la profondeur maximale mesurée et la profondeur maximale théorique.

Sur ce graphique (voir Figure 37), on remarque que les différents points représentant les échantillons sont globalement alignés selon une droite « $Y = X$ » lorsque l'intensité limite vaut 4, sauf pour les extraits de deux projets : la Camargue et l'Ain 2016.

Les écarts à la droite « $Y = X$ » que l'on peut observer peuvent être dû à plusieurs facteurs. Par exemple, la variation des conditions atmosphériques et de la rugosité de la surface d'eau ou bien une différence dans la réflectance de la surface du fond et dans la hauteur de vol qui ne sont pas prises en compte dans le facteur I_{ref} comme décrit dans le modèle Wa-Lid ([Abdallah et al., 2012](#)).

De plus, l'écart de ces points alignés avec les échantillons des projets sur la Camargue et l'Ain 2016 peuvent s'expliquer par une variation de l'intensité émise. En effet, pour ces valeurs aberrantes, on remarque que pour ces deux sites, les profondeurs maximales observées sont nettement supérieures aux prédictions (par un facteur 3 environ). Or, les deux projets Camargue et l'Ain 2016 ont été réalisés à quelques semaines d'intervalle en 2016, juste après une révision de l'instrument. Pour expliquer ces deux groupes de points aberrants, on peut donc émettre l'hypothèse qu'au cours de son utilisation, le LiDAR perd en intensité. Lorsque l'instrument fait l'objet d'une révision par le constructeur (Teledyne-Optech), il est possible que la puissance des impulsions laser soit réajustée et qu'on observe alors des profondeurs maximales plus importantes.

Pour tester la validité du modèle, il est possible de réaliser un test du χ^2 entre les profondeurs observées et les profondeurs estimées. Ainsi, en ne prenant pas en compte les données des sites de la Camargue et de l'Ain 2016, on a un échantillon de 56 points des profondeurs observées et estimées. Le test du χ^2 réalisé avec un degré de liberté de 55, montre que la probabilité qu'un lien existe entre ces deux échantillons est de 99%. De plus, le coefficient de corrélation de Spearman, calculé entre les profondeurs observées et estimées indique une corrélation de 0.95 avec : $p_{value} = 10^{-29}$.

Enfin, pour avoir un ordre d'idée de la précision de l'estimation, il est possible de calculer l'erreur moyenne quadratique entre les profondeurs observées et théoriques. En ne prenant pas en compte les données sur la Camargue et l'Ain 2016, on obtient la valeur suivante : $EMQ = 0.78 m$.

A partir des tests effectués et la valeur de l'erreur moyenne quadratique, on peut dire qu'en ne prenant pas en compte les données de la Camargue et de l'Ain 2016, on observe un lien significatif entre les profondeurs observées et celles estimées. On peut donc dire que le modèle formalisé selon l'Équation 8, est valide et fonctionne relativement correctement avec une précision d'estimation inférieure au mètre.

L'analyse des valeurs des paramètres K_d et I_{ref} montre que l'on peut classer les résultats en deux groupes : d'une part les gammes de profondeurs pour les projets dans le domaine côtier, et d'autre part les profondeurs maximales mesurées pour les lacs et rivières :

- Pour le domaine côtier, les données observées montrent que globalement les sites survolés ont une eau relativement claire avec $K_d \approx 0.2 m^{-1}$ en moyenne, et une intensité « référence » assez importante (≈ 150 en moyenne pour une hauteur de vol proche de 400m) ce qui donnera des profondeurs maximales importantes (jusqu'à 12m). Toutefois, ce facteur peut varier selon notamment la hauteur de vol et la réflectance du fond. Par exemple, pour les données sur le site de Kerjolis (voir Annexe 4), le I_{ref} est égal en moyenne à 42. Mais, le fait d'avoir une eau très claire ($K_d \approx 0.14 m^{-1}$) va permettre d'obtenir des profondeurs importantes (jusqu'à 8m).
- Pour les lacs et les rivières, les données montrent ici que, les sites survolés présentent des eaux avec une turbidité pouvant varier énormément (entre $0.18 m^{-1}$ pour la valeur la plus faible jusqu'à $1.2 m^{-1}$ pour la plus élevée) et un facteur I_{ref} assez faible (< 75 en moyenne). Ce qui caractérise ces environnements est donc d'une part la variation importante de la turbidité de l'eau qui va entraîner des profondeurs maximales pouvant varier ($< 2m$ pour la Loire jusqu'à 5.5 m sur l'Ain 2015). D'autre part, ce sont les variations des I_{ref} qui sont beaucoup plus importantes que pour le domaine côtier, car les lacs et rivières présentent des natures de surface très différentes qui vont influencer sur la réflectance du fond (e.g sable, végétation aquatique, vase, feuilles mortes, etc...).

Les données collectées montrent aussi l'importance du coefficient d'atténuation diffus par rapport au facteur I_{ref} qui représente les influences des autres paramètres (hauteur de vol, angle d'émission, réflectance du fond, etc...). En effet, si on sélectionne deux échantillons, le premier sur l'estuaire de la Sienne et le second sur l'Ain 2015 (voir Annexe 4), avec la même valeur de I_{ref} (≈ 110) et des coefficients d'atténuation différents ($0.25 m^{-1}$ pour l'estuaire de la Sienne et $0.76 m^{-1}$ pour l'Ain 2015), on observe des profondeurs maximales « $P_{95\%}$ » très différentes (5.46m pour l'estuaire de la Sienne et 1.65m pour l'Ain 2015). Ainsi, pour les mêmes valeurs de I_{ref} et des K_d variant d'un facteur 3 environ, la profondeur maximale mesurées « $P_{95\%}$ » variera aussi d'un facteur 3 environ.

A l'inverse, pour deux échantillons ayant la même valeur de coefficient d'atténuation diffus ($K_d \approx 0.14 m^{-1}$ sur les sites de Kerjolis et les Glénan, voir Annexe 4), et des valeurs de I_{ref} différentes (42 pour le site de Kerjolis et 152 pour les Glénan), on observe des profondeurs maximales mesurées « $P_{95\%}$ » dans la même gamme (8.4m pour le site de Kerjolis et 11m pour les Glénan). Ainsi, pour une variation du I_{ref} d'un facteur 3.5, la profondeur maximale mesurées variera d'un facteur 1.3. Cela correspond environ au logarithme népérien de 3.5.

Ces résultats montrent que le modèle utilisé pour la variation de l'intensité d'un faisceau laser durant sa propagation dans l'eau, et qui est décrit dans le manuel de [Guenther \(1985\)](#), correspond aux observations faites en conditions réelles. En effet, les variations de profondeurs maximales en fonction du coefficient d'atténuation diffus et du terme I_{ref} démontrent que le coefficient d'atténuation diffus K_d impacte la profondeur maximale de mesure de manière linéaire tandis que le terme I_{ref} impacte cette profondeur maximale de façon logarithmique.

V.1.2 Réflectance du fond :

Les résultats observés pour l'analyse de la réflectance du fond montrent une certaine disparité dans les valeurs (l'erreur quadratique moyenne est égale à 0.09). En effet, on remarque une différence significative entre le ratio moyen pour les données sur le site des Glénan (0.33) et le ratio pour les données sur l'Ain 2015 (0.16). L'hypothèse avancée est que la variation de la granulométrie du sable (entre le sable marin et le sable de rivière), impacte de façon significative la réflectance de la surface étudiée, avec potentiellement des effets liés à la présence de biofilms dans les zones immergées. Toutefois, le ratio moyen permet d'obtenir une première approximation de la perte d'intensité entre une surface à l'air libre et une surface sous l'eau pour du sable. Il est nécessaire néanmoins de répéter l'opération afin d'affiner l'analyse en différenciant par exemple les sables marins et les sables de rivières. De plus, si la connaissance de ce ratio permet d'estimer en amont la réflectance de la surface au fond en connaissant celle à l'air libre, la nature de la surface peut impacter la valeur de ce ratio. L'analyse doit donc être réalisée pour d'autres surfaces (e.g végétation aquatique, algues, rochers, vase, etc...) afin de savoir si ce ratio est valable pour tous les types de surface ou non.

V.2 Caractéristiques du vol

V.2.1 Hauteur de vol :

A partir des résultats obtenus d'après l'analyse des données observées sur les deux sites (Bertheaume et Blancs-Sablons), on remarque une dépendance du terme I_{ref} à la hauteur de vol. D'après l'Équation 9, le facteur I_{ref} impact la profondeur de façon linéaire. Par relation de cause à effet, la hauteur de vol impactera la profondeur maximale de mesure comme cela a été observé sur les résultats. Toutefois, cette dépendance est visible dans des proportions différentes entre les deux sites étudiés. Il est donc nécessaire de répéter l'opération afin d'affiner la dépendance dans le but de quantifier l'impact de la hauteur de vol sur la profondeur maximale de mesure.

D'autre part, d'après l'Équation 8 et le modèle Wa-Lid (*Abdallah et al., 2012*), on remarque que le facteur I_{ref} dépend de la distance parcourue par le pulse laser (le « range ») comme étant inversement proportionnel au carré de cette distance. Ainsi :

$$I_{ref} = \frac{I_{norm}}{R^2}$$

Équation 10 : normalisation de l'intensité de référence selon la distance parcourue par le laser. D'après *Abdallah et al. (2012)*.

Avec : I_{ref} : l'intensité « référence » selon Équation 8 ; I_{norm} : l'intensité normalisée selon la distance parcourue par le laser ; R : le « range », distance parcourue par le laser.

D'après ce modèle, en multipliant le terme I_{ref} par le carré du « range moyen », on obtient donc une intensité « I_{norm} » qui n'est plus influencée par la hauteur de vol. Donc pour un même site d'étude, en faisant l'hypothèse que la réflectance du sol ne varie pas, on peut s'attendre à ce que le terme « I_{norm} » soit constant.

Le calcul du coefficient de variation du facteur I_{norm} permet de donner un ordre d'idée de la fiabilité de l'Équation 10 et de l'hypothèse selon laquelle, pour un même site d'étude, l'intensité « I_{norm} » est constante. Les résultats montrent les valeurs suivantes pour les deux sites :

- Pour Bertheaume : 16.69%
- Pour Blancs-Sablons : 4.95%

D'après les coefficients de variation calculés, on observe que globalement, la relation établie par l'Équation 10 est acceptable mais avec seulement deux sites étudiés, il n'est pas possible de confirmer la validité de cette relation. Néanmoins, on remarque que la normalisation de l'intensité selon la distance parcourue par le laser (selon l'Équation 10) semble plus robuste pour le site de Blancs-Sablons car le coefficient de variation est plus faible.

V.2.2 Angle d'émission :

D'après le modèle Wa-Lid (*Abdallah et al., 2012*), l'angle d'émission va influencer la terme I_{ref} de l'Équation 9 relativement peu. En effet, d'après le modèle Wa-Lid, l'angle d'émission est utilisé afin de calculer la distance parcourue par le pulse laser en divisant la hauteur de vol par le cosinus de cet angle. Or, pour les angles étudiés (entre 0 et 16 degrés par rapport au Nadir), la différence du cosinus carré de l'angle d'émission fera varier le terme I_{ref} de 7.6% au maximum (car $\cos^2(0) = 1.0$ et $\cos^2(16) \approx 0.924$). Donc on peut s'attendre d'après le modèle utilisé, que l'influence de l'angle d'émission sera de faible ampleur.

Les deux graphiques présentés pour l'étude de l'angle d'émission (voir partie IV.3.2) sont représentatifs des analyses effectuées. En effet, pour certains échantillons, une dépendance de l'intensité à l'angle d'émission sera détectée, dans d'autres cas, cette dépendance ne sera pas observée. Ces observations confirment les descriptions du modèle Wa-Lid qui indiquent que l'angle d'émission fera varier le terme I_{ref} relativement peu pour les angles étudiés (entre 0 et 16 degrés par rapport au Nadir).

Néanmoins, pour quantifier de façon précise l'influence de l'angle d'émission, on peut remettre en cause l'hypothèse de départ selon laquelle l'angle d'émission est égal à l'angle d'incidence. Cette hypothèse n'est peut être pas une bonne approximation lorsqu'on étudie de façon précise la dépendance du facteur « I_{ref} » à l'angle d'émission. Pour étudier l'impact de l'angle d'émission sur le facteur « I_{ref} » et donc sur la profondeur maximale de mesure, il est peut-être nécessaire de prendre en compte la rugosité de la surface d'eau. De plus, afin d'observer une décroissance significative de l'intensité en fonction de l'angle d'émission, il est nécessaire de réaliser des tests sur des gammes d'angles plus importants (i.e jusqu'à environ 30 degrés environ).

V.2.3 Coût d'un levé LiDAR :

Les études effectuées sur le coût d'un levé LiDAR montrent une importante différence de prix selon les configurations choisies. Ainsi, entre définir un plan de vol dans le but d'obtenir la profondeur maximale de mesure la plus grande possible et le plan de vol le moins cher possible, on remarque un facteur de prix d'environ 2.5. De plus, selon la stratégie adoptée, la profondeur maximale de mesure bathymétrique sera différente. En prenant l'exemple de l'étude réalisée sur la hauteur de vol (voir partie IV.3.1), si on fait le parallèle entre la zone fictive et le site de Blancs-Sablons (voir Tableau 8), on remarque que pour des hauteurs de vol de 258m (cas n°1) et 400m (cas n°2), il y a un gain de profondeur d'environ 1 à 2m. De la même manière, en faisant le parallèle entre la zone fictive et le site de Bertheaume (voir Tableau 7), on remarque que pour des hauteurs de vol de 565m (cas n°3) et 400m (cas n°2), il y a une perte de profondeur d'environ 1 à 2m. Ces différences de profondeur vont donc engendrer une couverture bathymétrique qui sera radicalement différente selon la stratégie adoptée.

Ces résultats expriment l'importance de définir des objectifs précis pour le levé LiDAR (i.e être le moins cher possible, maximiser la couverture bathymétrique, etc...) afin de réaliser un plan de vol en conséquence. Les simulations effectuées partent de l'hypothèse que sur la zone fictive survolée, la profondeur maximale de mesure est de 5m pour une altitude de vol de 400m. Cette donnée permet de réaliser les plans de vol selon les objectifs prédéfinis. Il s'agit d'un enjeu important à résoudre et qui constitue un objectif pour ce travail de recherche. Les simulations effectuées illustrent donc bien l'importance de pouvoir prédire les profondeurs maximales de mesure afin d'évaluer le coût moyen d'un levé LiDAR selon les objectifs du commanditaire.

VI. Conclusion et perspectives

La méthode de traitement des nuages de points LiDAR bathymétriques mise en place durant ce travail de recherche permet d'étudier le comportement du faisceau laser lors de sa propagation dans l'eau. L'analyse des paramètres de chaque point du nuage permet de comprendre les facteurs impactant la profondeur maximale de mesure et de quantifier leurs impacts avec plus ou moins de précision.

L'enjeu de ce travail de recherche consistait à collecter un grand nombre d'échantillons sur des projets aux caractéristiques différentes dans le but d'analyser l'influence de chaque paramètre sur la profondeur maximale de mesure. Pour cela, la méthode de classification a été implémentée en Python et d'autres traitements y ont été ajoutés (e.g la conversion entre hauteur et altitude et le changement de système de coordonnées). Néanmoins, des améliorations sont possibles, notamment sur la classification supervisée mise en place. D'autres attributs peuvent être ajoutés à ceux existant afin d'améliorer la classification des points au niveau de la zone de rencontre entre la surface émergée, la surface immergée et la surface d'eau.

D'autre part, l'analyse du coût d'un levé LiDAR a montré que l'optimisation du plan de vol permet d'avoir un prix en rapport aux objectifs commandés. Cette notion rend utile la connaissance de la profondeur maximale de mesure prédite et nécessite une analyse fine des paramètres qui impactent cette profondeur maximale de mesure afin d'avoir des paramètres de vol en lien avec les objectifs et les profondeurs maximales qui seront effectivement atteintes.

L'analyse de l'intensité du signal retour par rapport au modèle utilisé a été effectuée à partir de plusieurs échantillons collectés sur les différents projets. Les résultats ont montré l'adéquation globale du modèle par rapport aux observations. De plus, l'analyse des intensités a confirmé le fait que la turbidité de l'eau (caractérisée par le coefficient d'atténuation diffus) est le facteur qui impacte le plus la profondeur maximale de mesure. Ce qui est conforme à la littérature ([Guenther et al., 2000](#)).

Toutefois, il n'a pas toujours été possible de quantifier de façon précise l'impact des paramètres et de comparer les résultats par rapport aux descriptions du modèle utilisé. Ainsi, l'impact de l'angle d'émission sur la profondeur maximale de mesure n'est pas significatif pour les gammes d'angles étudiées. D'autres campagnes de tests doivent être mises en place afin d'expérimenter l'impact de l'angle d'émission sur des angles plus grands mais aussi la hauteur de vol en réalisant d'autres levés à différentes altitudes. La réflectance du fond doit être analysé plus finement, par l'étude du ratio d'intensité entre la surface émergée et immergée pour d'autres types de surface, et l'impact de l'état de la surface d'eau (en particulier la hauteur et la longueur d'onde des vagues).

En conclusion, ce travail de recherche a permis d'implémenter en Python une chaîne de traitements opérationnelles des données LiDAR bathymétriques dans le but d'analyser les facteurs impactant la profondeur maximale de mesure. Durant ce stage, il a fallu développer des solutions pour répondre aux problèmes rencontrés et réfléchir aux méthodes pour interpréter les résultats obtenus par rapport au modèle utilisé. Les résultats de l'étude des facteurs impactant la profondeur maximale de mesure bathymétrique a permis de valider le modèle utilisé en conditions réelles et de confirmer l'importante influence de la turbidité de l'eau par rapport aux autres facteurs. L'analyse des données a aussi permis de remettre en question certaines hypothèses, notamment celle sur la planéité de la surface d'eau. L'étude de ces données doit être poursuivie afin de compléter les travaux effectués sur l'analyse de l'influence de la hauteur de vol par exemple.

L'étude des données LiDAR bathymétriques en est encore à ces débuts surtout dans le cas des rivières et des lacs. Il s'agit d'un domaine en développement constant, le LiDAR aéroporté topo-bathymétrique est encore en phase d'expérimentation où le géomaticien peut apporter ses compétences pour participer au développement de ce domaine de recherche des géosciences. La chaîne de traitements sera testée pour des projets à venir. Les résultats obtenus invitent à de belles perspectives d'évolutions pour la compréhension des facteurs contrôlant la profondeur maximale de mesure.

VII. Références bibliographiques

- Abdallah, H., Baghdadi, N., Bailly, J. S., Pastol, Y., & Fabre, F. (2012). Wa-LiD: A new LiDAR simulator for waters. *IEEE Geoscience and remote sensing letters*, 9(4), 744-748.
- Allouis, T., Bailly, J. S., Pastol, Y., & Le Roux, C. (2010). Utilisation conjointe de trains d'ondes LiDAR vert et infrarouge pour la bathymétrie des eaux de très faibles profondeurs. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, (191), p-52.
- Blair, J. B., Rabine, D. L., & Hofton, M. A. (1999). The Laser Vegetation Imaging Sensor: a medium-altitude, digitisation-only, airborne laser altimeter for mapping vegetation and topography. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2-3), 115-122.
- Devlin, M. J., Barry, J., Mills, D. K., Gowen, R. J., Foden, J., Sivyer, D., & Tett, P. (2008). Relationships between suspended particulate material, light attenuation and Secchi depth in UK marine waters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 79(3), 429-439.
- Guenther, G. C. (1985). *Airborne laser hydrography: System design and performance factors*. NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION ROCKVILLE MD.
- Guenther, G. C., Cunningham, A. G., LaRocque, P. E., & Reid, D. J. (2000). *Meeting the accuracy challenge in airborne bathymetry*. NATIONAL OCEANIC ATMOSPHERIC ADMINISTRATION/NESDIS SILVER SPRING MD.
- Gordon, H. R., & Wouters, A. W. (1978). Some relationships between Secchi depth and inherent optical properties of natural waters. *Applied Optics*, 17(21), 3341-3343.
- Haner, D. A., McGuckin, B. T., Menzies, R. T., Bruegge, C. J., & Duval, V. (1998). Directional-hemispherical reflectance for Spectralon by integration of its bidirectional reflectance. *Applied optics*, 37(18), 3996-3999.
- Jerlov, N.G., 1976. *Marine Optics*, Elsevier Scientific Pub. Co., Amsterdam, 231 pp.
- Kaasalainen, S., Kukko, A., Lindroos, T., Litkey, P., Kaartinen, H., Hyyppä, J., & Ahokas, E. (2008). Brightness measurements and calibration with airborne and terrestrial laser scanners. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 46(2), 528-534.
- Kashani, A. G., Olsen, M. J., Parrish, C. E., & Wilson, N. (2015). A review of LiDAR radiometric processing: From ad hoc intensity correction to rigorous radiometric calibration. *Sensors*, 15(11), 28099-28128.
- Mallet, C. (2010). *Analyse de données lidara Retour d'Onde Complete pour la classification en milieu urbain* (Doctoral dissertation, Thèse de Doctorat. Paris: Telecom Paris Tech. Lien valide au 20 septembre 2014: <http://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00566992>).
- Mallet, C., & Bretar, F. (2009). Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 64(1), 1-16.
- McCarthy, J. C., Pyle, T. E., & Griffin, G. M. (1974). Light transmissivity, suspended sediments and the legal definition of turbidity. *Estuarine and Coastal Marine Science*, 2(3), 291-299.
- Mobley, C. D. (2001). Radiative transfer in the ocean. *Encyclopedia of ocean sciences*, 4, 2321-2330.
- Thiel, K. H., & Wehr, A. (2004). Performance capabilities of laser scanners—an overview and measurement principle analysis. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(8/W2), 14-18.
- Tyler, J. E. (1968). The secchi disc. *Limnology and oceanography*, 13(1), 1-6.
- Vain, A., Kaasalainen, S., Pyysalo, U., Krooks, A., & Litkey, P. (2009). Use of naturally available reference targets to calibrate airborne laser scanning intensity data. *Sensors*, 9(4), 2780-2796.
- Vallet, J. ; 2011 ; La Lasergrammétrie aéroporté : approches théoriques, concepts, méthodes ; Colloque Images et modèles 3D en milieux naturels ; Collection EDYTEM n°12 ; pp.29-40
- Wang, C. K., & Philpot, W. D. (2007). Using airborne bathymetric lidar to detect bottom type variation in shallow waters. *Remote Sensing of Environment*, 106(1), 123-135.
- Wu, J., Van Aardt, J. A. N., & Asner, G. P. (2011). A comparison of signal deconvolution algorithms based on small-footprint LiDAR waveform simulation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(6), 2402-2414.

VIII. Liste des figures

Figure 1 : Les types balayage. D'après Ba (2017)	8
Figure 2 : Système de géoréférencement. D'après Vallet (2011)	9
Figure 3 : Différence de réception d'une impulsion laser, entre le retour d'onde complet et les échos discrets. D'après Mallet et al. (2008).	10
Figure 4 : Schéma de la propagation du laser dans l'eau. D'après Kashani et al. (2015).	11
Figure 5 : Schéma du signal retour pour le LiDAR bathymétrique. D'après Allouis et al. (2010).	12
Figure 6 : signal retour LiDAR simulée. D'après Abdallah et al. (2012).	14
Figure 7 : Diagramme des différents facteurs d'influences du Kd. D'après Devlin et al. (2008).	15
Figure 8 : Disque de Secchi. Image Association du lac du Missionnaire	16
Figure 9 : Echelle de mesure NTU	17
Figure 10 : schéma du signal retour décomposé en une somme de courbes gaussiennes.	20
Figure 11 : LiDAR Optech Titan. Image Teledyne-Optech.	22
Figure 12 : Schéma simplifié de l'acquisition des données LiDAR.	23
Figure 13 : Différence entre hauteur ellipsoïdale et altitude. (image IGN)	25
Figure 14 : schéma de fonctionnement pour les traitements appliqués au fichier SBET.	26
Figure 15 : schéma de fonctionnement du sous-échantillonnage.	28
Figure 16 : schéma de fonctionnement de la détection de surface.	29
Figure 17 : schéma de fonctionnement de la 1ère classification.	30
Figure 18 : schéma de fonctionnement de la classification supervisée.	31
Figure 19 : Schéma des effets de réfraction.	32
Figure 20 : Localisation des sites étudiés. Correspondance des numéros avec le Tableau 5.	34
Figure 21 : localisation du site d'étude de Bertheaume.	36
Figure 22 : localisation du site d'Abisko (Suède).	37
Figure 23 : localisation du site sur le Rhin.	37
Figure 24 : Projet de levé LiDAR sur l'archipel des Glénan (29). (a) image aérienne IGN, (b) résultat de la classification réalisée par le script Python mis en place pour ce travail de recherche, (c) représentation de la bathymétrie issue de cette classification.	40
Figure 25 : localisation de l'échantillon étudié sur le site de Bertheaume.	42
Figure 26 : histogramme des profondeurs pour le site de Bertheaume.	43
Figure 27 : graphique d'estimation du coefficient d'atténuation diffus sur le site de Bertheaume.	43
Figure 28 : localisation de l'échantillon étudié sur le site d'Abisko.	44
Figure 29 : histogramme des profondeurs pour le site d'Abisko.	45
Figure 30 : graphique d'estimation du coefficient d'atténuation diffus pour le site d'Abisko.	45
Figure 31 : localisation de l'échantillon étudié sur le Rhin.	46
Figure 32 : histogramme des profondeurs pour le tronçon sur le Rhin.	47
Figure 33 : graphique d'estimation du coefficient d'atténuation diffus pour le tronçon sur le Rhin. ...	47
Figure 34 : graphique du ratio d'intensité entre des surface émergée et immergée.	48
Figure 35 : graphique du Iref en fonction de l'angle d'émission sans dépendance significative.	50
Figure 36 : graphique du Iref en fonction de l'angle d'émission avec une dépendance significative... ..	51
Figure 37 : relation entre la profondeur maximale mesurée et la profondeur maximale théorique. ...	55

IX. Liste des tableaux

Tableau 1 : comparaison des intensités calibrées par rapport à la cible ayant la plus grande réflectance (Tarp A). Les marques "*" et "***" indiquent des angles d'émission respectivement <math><13^\circ</math> et >math>>20^\circ</math>. D'après Kaasalainen et al. (2008).....	18
Tableau 2 : Description des caractéristiques du LiDAR Optech-Titan.....	22
Tableau 3 : Description des champs contenus dans un fichier SBET.	24
Tableau 4 : comportement des attributs pour la 2ème classification.	30
Tableau 5 : caractéristiques des sites étudiés.....	33
Tableau 6 : format des données LiDAR analysées.....	35
Tableau 7 : résultats obtenus pour le site de Bertheaume.....	49
Tableau 8 : résultats obtenus pour le site de Blancs-Sablons.....	49
Tableau 9 : paramétrage du plan de vol pour le cas de figure n°1.	52
Tableau 10 : paramétrage du plan de vol pour le cas de figure n°2.	52
Tableau 11 : paramétrage du plan de vol pour le cas de figure n°3.	53

X. Liste des équations

Équation 1 : distance aller-retour parcourue par un pulse laser.	8
Équation 2 : géoréférencement des données LiDAR.....	9
Équation 3 : Modèle physique Wa-Lid : relation d'intensité pour l'écho du fond.	12
Équation 4 : relation entre hauteur ellipsoïdale et altitude.....	25
Équation 5 : Calcul de l'angle d'émission du pulse laser.	27
Équation 6 : conditions sur la 1 ^{ère} classification sur les données du Canal 3.	29
Équation 7 : correction de réfraction air/eau. D'après les Lois de Snell-Descartes.	32
Équation 8 : modèle physique de décomposition de l'intensité reçu par le capteur LiDAR.	35
Équation 9 : relation entre les facteurs Kd, Iref et la profondeur maximale de mesure. Issue de l'Équation 8.....	54
Équation 10 : normalisation de l'intensité de référence selon la distance parcourue par le laser. D'après Abdallah et al. (2012).	58