

# Utilisation de la photogrammétrie numérique pour la modélisation de fonds mobiles de modèles physiques

■ Maxime CARTIER XATARD

*La photogrammétrie est un domaine en plein essor. L'arrivée des drones sur le marché a permis un grand bond en avant dans le progrès des techniques d'acquisition et ainsi diversifier l'utilisation traditionnelle qui lui était réservée jusqu'à présent. La question se pose aujourd'hui quant à son utilisation en bathymétrie. Ce projet de fin d'étude au sein de la CNR s'articule suivant deux axes : l'acquisition et le traitement des données. Une solution d'acquisition photogrammétrique à travers l'eau et adaptée à l'échelle d'un modèle physique est d'abord développée. Dans un second temps, une chaîne de traitement des photos et un algorithme de correction de la réfraction sur les données sont combinés pour obtenir des résultats utilisables en aval pour des études sédimentaires. Des protocoles pour chaque étape sont alors rédigés pour les futures études.*

## ■ MOTS-CLÉS

Photogrammétrie,  
Correction, Réfraction,  
Modèle physique,  
Fonds mobiles

## L'aménagement de Bellevue, zone d'étude préférentielle

L'étude se focalise sur une portion du lit de la Loire et notamment au niveau du pont de Bellevue. L'opération prévue a pour objectif de réduire la pente de la ligne d'eau, afin de favoriser le dépôt d'une partie du sable transporté par le fleuve. Elle constitue la clé de voûte de la stratégie de restauration du lit et sans doute l'action la plus délicate à réaliser, car il s'agit d'obtenir le meilleur résultat tout en minimisant les impacts sur les usages, le milieu naturel et les lignes d'eau en crue.

## Du terrain au laboratoire : le modèle physique

Le modèle physique permet d'étudier les phénomènes hydrauliques encore non accessibles aux modèles numériques et de définir ainsi les meilleurs choix possibles tant du point de vue technique, économique que de la sécurité. Une vulgarisation de la définition du terme de modèle physique serait une maquette dont le but est de reproduire la réalité à une échelle réduite et ainsi voir en laboratoire ce qui se passe sur le terrain. Dans la conception d'un nouvel aménagement ou dans l'optimisation d'un ouvrage existant, le modèle traite les problèmes complexes hydrauliques en prenant en

## Introduction

Spécialisé dans la réalisation de modèles physiques réduits servant à l'étude des phénomènes hydrauliques, le Centre d'analyse comportementale des ouvrages hydrauliques (CACOH) de la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) traite les problèmes complexes en associant la modélisation physique et les modèles numériques dans une totale complémentarité. C'est dans ce cadre que s'inscrit ce projet de fin d'étude (PFE) à l'INSA de Strasbourg. La mesure et la modélisation des fonds mobiles sont cruciales dans la compréhension et la prévision du processus de déplacement des sédiments. Des systèmes passifs tels que la photogrammétrie aux systèmes actifs tels que le LiDAR, les progrès technologiques actuels en matière d'acquisition 3D permettent une production importante de données 3D dans des temps très réduits, et notamment avec un grand degré d'automatisation, sans contact, évitant ainsi de corrompre les scènes d'étude.

La CNR souhaite la mise en place d'une solution faisant intervenir la

photogrammétrie numérique pour la modélisation de fonds mobiles de modèles physiques à travers l'eau. Ce projet a donc eu pour aboutissement :

- Le développement d'une méthodologie d'acquisition semi-automatisée de photos en vue d'une étude photogrammétrique.
- L'étude de l'influence et des possibles corrections de la réfraction dans le cas de la photogrammétrie multimédia.
- La rédaction d'un protocole d'acquisition et de traitement des données récoltées.

L'étude et les essais réalisés au cours de ce PFE ont été effectués dans le cadre du modèle physique de grande envergure représentant une portion du lit de la Loire entre les Ponts-de-Cé et Nantes et s'inscrivent dans une étude plus globale du lit de la Loire.

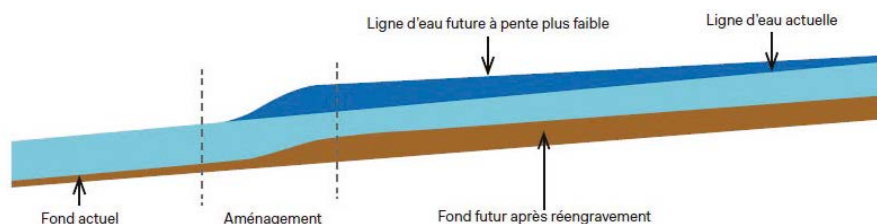


Figure 1. Finalité du projet d'aménagement du lit de la Loire



compte les écoulements tridimensionnels. Les équipes du Centre d'analyse comportementale des ouvrages hydrauliques associent modèles physiques et modèles numériques dans une totale complémentarité.

## Le modèle physique de la Loire

Le modèle physique doit permettre d'appréhender à l'échelle des aménagements projetés la dynamique sédimentaire de la Loire en situation actuelle et pour différentes configurations d'aménagement. Ce modèle physique permettra d'optimiser les performances recherchées par les travaux en termes de remous solide, dans le respect des exigences demandées par les partenaires du programme en termes environnemental, d'usages et de maîtrise des inondations.

Les objectifs principaux sont donc de :

- vérifier l'impact sédimentaire de l'aménagement de Bellevue sur un horizon de 15 ans en termes de tendance morphologique ;
- définir la configuration ou les configurations possibles des aménagements permettant de répondre à l'objectif

de création d'un remous solide, tout en respectant les contraintes du site (navigation actuelle sur le fleuve, circulation piscicole, maintien des fonctionnalités des bras secondaires de l'île Clémentine et du bras du Thouaré connectés à l'aménagement...),

- vérifier la loi de perte de charge nécessaire pour créer les conditions de dépôt solide des matériaux en amont pour les débits morphogènes dominants ;
- vérifier que l'aménagement proposé ne génère pas de survitesses trop importantes au droit des piles du pont de Bellevue, ce qui pourrait provoquer potentiellement des affouillements ;
- les échelles retenues pour le modèle sont les suivantes :

Échelle verticale	1/50
Échelle horizontale	1/100
Distorsion verticale	2
Échelle sur la pente	1/0.5

## Le rôle de la photogrammétrie dans l'étude

Lors de ce projet, il est question d'étudier la bathymétrie d'une portion du lit de la Loire. Pour ce faire, et comme expliqué précédemment, un modèle

physique modélisant les transports sédimentaires a donc été conçu pour en étudier l'évolution.

Pour procéder au relevé en 3D de la morphologie des fonds d'un modèle après essai, il est coutume de drainer le modèle sur une longue durée afin d'éviter les déformations et ainsi observer les fonds hors eau pour procéder à un relevé lasergrammétrique. Cependant, cette méthode est chronophage et un drainage, bien que réalisé méticuleusement engendre inévitablement une dégradation de l'état originel des fonds après essai.

Une autre approche évitant le drainage du modèle est la réalisation de profils bathymétriques à l'aide d'un capteur à ultrasons. Cependant, cette technique ne permet de recueillir que des données non globales et souvent entachées d'erreurs difficiles à quantifier. En effet, le principe de l'appareil utilisé (Ultralab) réside dans la mesure du point le plus haut détecté dans le cône de mesure, ce qui résulte certes à une précision altimétrique de l'ordre du millimètre mais difficile à estimer au niveau planimétrique.

C'est dans cette optique que le projet de photogrammétrie a été développé afin de pouvoir trouver une alternative au drainage et effectuer une acquisition de données en eau de manière rapide et non destructive vis-à-vis des fonds mobiles du modèle. Le développement d'une méthodologie d'acquisition permettrait ainsi de :

- passer d'une étude en profils des fonds à une étude surfacique ;
- amener une meilleure vision et compréhension de la dynamique sédimentaire dans le modèle physique.

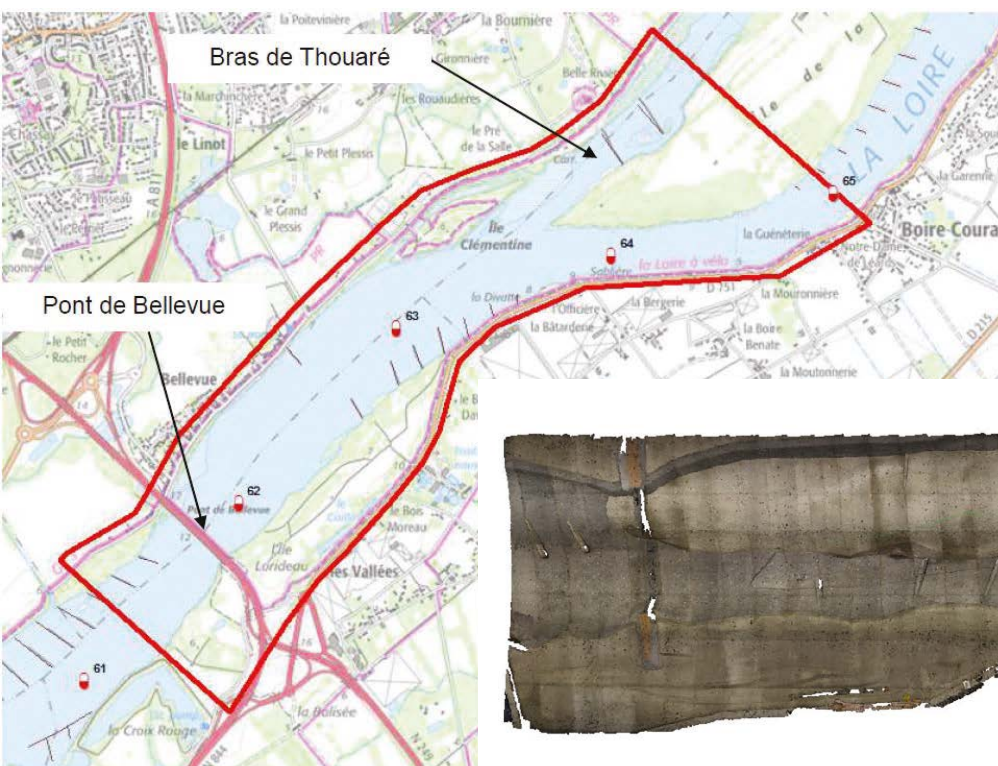


Figure 2. Localisation du projet de Bellevue et rendu 3D du modèle physique de la Loire sous Photoscan, sans échelle



## Hypothèses et contraintes de l'étude

Il est important de souligner que cette étude est originale et novatrice de par son utilisation de la photogrammétrie. L'utilisation du modèle physique pour observer des phénomènes à une plus grande échelle se base sur la photogrammétrie et ce à travers l'eau. La mise en place opérationnelle a été jalonnée de contraintes qu'il a fallu respecter et d'hypothèses à vérifier. Dans cette étude, nous avons pu diviser les contraintes suivant plusieurs critères.

Du point de vue du matériel, il est imposé l'utilisation de boîtiers EOS 1000D déjà en possession du laboratoire. Il s'agit là d'un premier frein sachant que les appareils photos datant de 2008, sont équipés de capteurs APS-C de 10,1 Mégapixels pour une résolution 2592 x 3888. Une seconde contrainte a été le respect des normes relatives au chariot instrumenté sur lequel sont placés les appareils. La pose des bras déportés par rapport aux traverses a nécessité le calcul des forces exercées et impliqué de limiter au maximum le poids de charge du chariot. Il est à noter de plus que l'utilisation de la photogrammétrie sur un modèle physique en eau exclut toute possibilité de positionner des luminaires au-dessus du plan d'eau sans quoi des masques peuvent se créer sur les photos. Il a donc été choisi une nouvelle fois d'équiper le chariot à l'aide de lampes tungstène de 600 W sur ses extrémités. Cette solution permet ainsi une diffusion homogène de la lumière tout au long de l'acquisition tout en évitant la création d'ombres sur le modèle, phénomène handicapant lors des traitements avec le logiciel Photoscan. Enfin, il a fallu élaborer une stratégie pour le positionnement des points de calage servant au géoréférencement et à la reconstruction du modèle. Ces points de calage avaient pour contraintes d'être matérialisés de façon durable et d'être résistants à l'eau mais ne devaient pas perturber l'écoulement du modèle par leur positionnement. La solution retenue est exposée dans le paragraphe "Solution opérationnelle retenue".



Figure 3. Chariot instrumenté du modèle physique

Le second aspect contraignant s'est porté sur la sécurité relative à l'installation de la solution. Le câblage des appareils photos et des luminaires doit respecter un cahier des charges et exclut notamment toute présence de prise de 220 volts sur le portique. Des *battery grips* (poignées d'alimentation) ont ainsi été ajoutés à chaque appareil pour permettre une plus longue autonomie et un accès rapide aux batteries sans démonter l'installation.

Enfin, étant donné que plusieurs acteurs interagissent sur le modèle physique, la coordination et la mise en correspondance des plannings pour permettre l'avancement des différentes opérations s'est révélée être un véritable défi. L'étalonnage des différents capteurs du chariot et les essais de calage du modèle nécessitent plusieurs phases de remplissage et drainage du bassin ainsi qu'un grand nombre de manipulations du chariot, le rendant inaccessible.

Les principales contraintes sont résumées dans le tableau suivant :

Une fois que les contraintes ont été respectées, il a été nécessaire d'émettre des hypothèses. Ces dernières permettent par la suite de s'affranchir de certains phénomènes et de simplifier l'étude sur certains aspects. Parmi ces dernières on peut citer les plus notables selon lesquelles :

- l'éclairage est uniforme sur les modèles photographiés,
- le plan d'eau du modèle est planaire et horizontal,
- l'interface air-eau est sans épaisseur et négligeable,
- les instruments sont utilisés dans les limites d'utilisation optimales,
- les calibrations utilisées sont supposées inchangées lors de l'étude,
- la turbidité de l'eau n'influe pas sur l'acquisition de mesures,
- les photos sont capturées aux alentours de la verticale (moins de 10° par rapport au nadir).

Le dernier point à souligner et sûrement la plus grande contrainte de ce projet est la réfraction qui s'opère au niveau de l'interface air-eau du modèle.

Type	Matériel	Logiciel	Opérationnel et technique	Organisationnel
Contraintes	Utilisation de boîtiers EOS 1000D	Utilisation d'Agisoft Photoscan	Respect des normes de sécurité Présence d'eau Réflexion des lumières sur l'eau Matérialisation des points de calage	Intervention des différents acteurs du projet sur le modèle

Tableau 1. Liste des contraintes imposées pour le projet

Le paragraphe suivant s'attache à décrire ce phénomène.

## La réfraction en photogrammétrie et l'algorithme de J. T. Dietrich

La photogrammétrie nécessitant le tracé des rayons optiques à travers plusieurs milieux d'indices de réfraction différents est appelée "*multimedia photogrammetry*" dans la littérature scientifique anglaise. Elle est caractérisée par la réfraction des faisceaux optiques à la transition entre les différents milieux. On peut associer à ce phénomène la notion de point apparent. En effet, celle-ci constitue l'essence même du phénomène de réfraction et provient de l'erreur systématique causée par la réfraction à l'interface air-eau et qui a pour effet de modifier la perception de la profondeur et donc en retourner une valeur faussée ou corrompue.

Lors du projet de recherche technologique du même titre, l'algorithme de James T. Dietrich, exposé dans son article "*Bathymetric Structure from Motion : Extracting shallow stream bathymetry from multi-view photogrammetry*" avait été retenu comme solution de correction de la réfraction pour notre cas d'étude. Des résultats prometteurs avaient déjà été trouvés et ceux obtenus dans ce PFE nous ont permis de confirmer l'efficacité de ce procédé.

L'objectif est ici de corriger l'influence de la réfraction sur la profondeur des points et l'entière de la démarche de calcul découle de la loi de Snell illustrée figure 4 selon laquelle :

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r$$

Il a été posé comme hypothèse d'étude que les photographies avaient été prises à la quasi-verticale et donc avec des angles inférieurs à 10° par rapport au nadir. On parle alors ici en anglais de "*Nadir SfM Imagery*". Cette hypothèse permet d'utiliser une version simplifiée de la loi de Snell qui utilise la substitution des sinus des petits angles par leur tangente. On peut alors poser les équivalences suivantes :

$$\sin i \cong \tan i = \frac{x}{h} \quad \sin r \cong \tan r = \frac{x}{h_a}$$

En posant  $n_1 = 1$  l'indice de réfraction de l'air et  $n_2 = 1.337$  l'indice de réfraction de l'eau, l'équation (1) devient :

$$h = 1.337 \times h_a$$

La distance Euclidienne D et la différence de hauteur dH sont calculées suivant les expressions :

$$D = \sqrt{(X_c - X_a)^2 + (Y_c - Y_a)^2}$$

$$dH = (Z_c - Z_a)$$

En prenant cette expression pour D, il est possible de calculer la valeur de r :

$$r = \tan^{-1} \frac{D}{dH}$$

Pour la suite des calculs, il est nécessaire de calculer  $h_a$  et en se basant sur

la figure :

$$h_a = WS_z - Z_a$$

Le calcul de la réfraction est maintenant possible en calculant le reste des variables inconnues de la figure 4 :

$$i = \sin^{-1} \left( \frac{n_2}{n_1} \sin r \right)$$

$$x = h_a \cdot \tan r$$

$$h = \frac{x}{\tan i} = \frac{h_a \cdot \tan r}{\tan \left[ \sin^{-1} \left( \frac{n_2}{n_1} \sin r \right) \right]}$$

$$Z_p = WS_z - \bar{h}$$

L'altitude réelle corrigée du point est désignée par  $Z_p$ .

Il est important de noter qu'étant donné qu'il s'agit ici d'un nuage de points,  $Z_a$  et  $h_a$  ne sont par conséquent pas des valeurs fixes pour chaque point. Ainsi, une différence sera observable entre les valeurs de x et h pour un même point depuis chaque caméra depuis lequel il est visible.  $Z_p$  et h auront donc plusieurs valeurs pour un même point et la valeur définitive  $Z_p$  de l'altitude du point sera obtenue à partir de la moyenne de toutes les valeurs de h.

Dans son article, James T. Dietrich pose ces calculs sous la forme d'un algorithme Python directement applicable sur un fichier de points.

Les bases de calculs de l'algorithme posées, il reste alors à effectuer quelques étapes de traitement en amont de son application au nuage.

## Étapes de traitements préalables

### ■ Modélisation de la surface de l'eau

Il faut sélectionner des points sur la berge au niveau de la surface de l'eau. Pour ce faire, il est utile de se référer au changement de couleur des points du nuage. Une fois plusieurs points sélectionnés sur le pourtour du bassin, il faut les exporter sous la forme d'un nouveau nuage auquel est ajouté l'attribut Z.

Dans l'article de James T. Dietrich, ce dernier avait effectué un relevé de plusieurs points de la surface de l'eau sur les berges et a ensuite importé les points levés dans *CloudCompare*

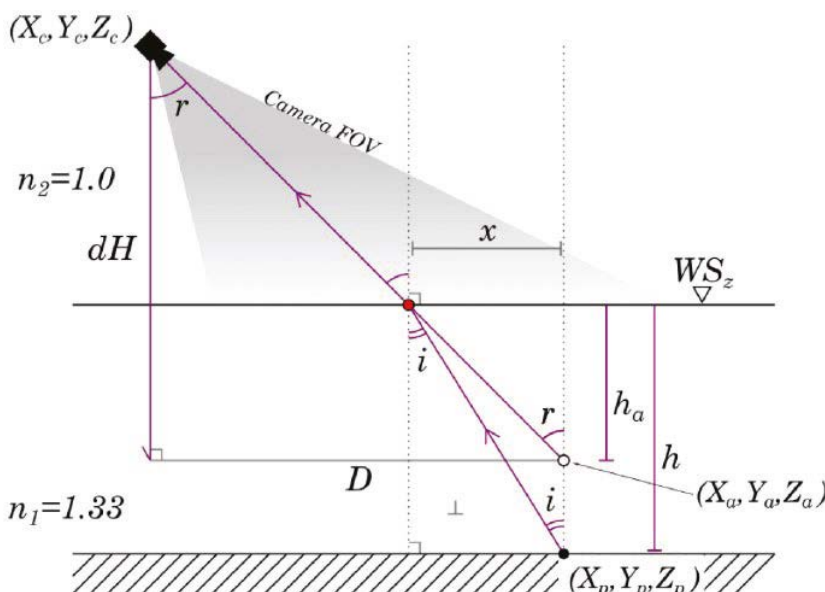


Figure 4. Figure de réfraction, J. T. Dietrich 2016

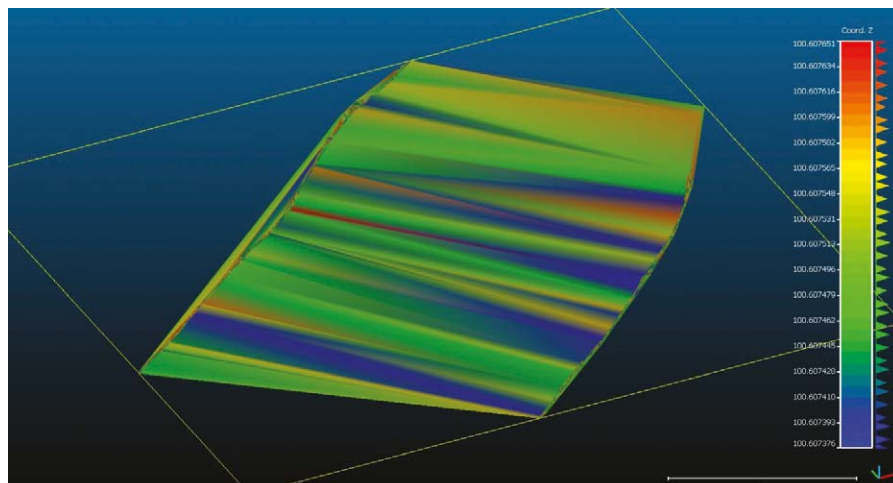


Figure 5. Maillage de la surface de l'eau à l'aide du logiciel *CloudCompare*

► pour fusionner ces derniers avec les points précédemment sélectionnés dans un seul et même nuage. Dans le cas présent, il n'a pas été possible de relever ces points : une coupe dans le nuage a été effectuée au niveau des berges en se référant à la coloration des points.

L'étape suivante dans la modélisation de l'eau est la création d'un maillage de Delaunay en 2,5D. Il est important de vérifier si le maillage ne présente pas d'anomalies notamment au niveau des berges, car dans le cas où un mauvais point a été sélectionné, des changements abrupts d'altitudes peuvent apparaître. L'échelle de couleur du maillage permet de repérer rapidement ces erreurs possibles. Un aperçu du maillage est visible dans la figure 5. Il est à noter que les valeurs d'altitude maximale et minimale sur l'échelle de droite sont séparées de moins d'un millimètre et la présence du grand nombre de couleurs ne traduit pas ici des erreurs dans le maillage.

## ■ Rééchantillonnage du nuage de points

Il est nécessaire de minimiser le bruit dans le nuage et c'est pourquoi un rééchantillonnage est envisagé. Il faut tout d'abord commencer par supprimer les champs scalaires qui sont inutiles pour la suite de l'étude. En second lieu, l'outil "Rasterize tool" est utilisé pour effectuer un rééchantillonnage en spécifiant la direction en Z et l'écart entre les points. Le nuage rééchantillonné est ensuite exporté sous la forme d'un nouveau nuage. Ce rééchantillonnage

est un point négatif pour l'étude étant donné que cela traduit une perte d'informations dans le nuage, mais le but premier est ici d'effectuer une correction de la réfraction. L'étude de l'influence de ce rééchantillonnage interviendra peut-être dans des études futures.

## ■ Calcul des attributs nécessaires à l'application de l'algorithme

La suite des opérations s'effectue sur le nuage rééchantillonné. La première étape revient à calculer la distance du nuage au maillage de la surface de l'eau. Le champ scalaire "C2M Signed Distance" créé représente la "profondeur" des points en dessous de la surface maillée. On sélectionne ensuite seulement les points immergés en filtrant les points par leur valeur de profondeur et en ne gardant que ceux avec une valeur inférieure à zéro.

Il ne reste plus qu'à convertir la profondeur de chaque point pour obtenir l'élévation de la surface de l'eau pour chaque point. Cette étape est possible

grâce à l'outil "Calculator" qui permet de soustraire la valeur négative de profondeur (et donc de l'ajouter) aux altitudes des points immergés et ainsi obtenir l'altitude de la surface de l'eau. Les champs scalaires sont par la suite correctement renommés de manière à ce qu'ils soient reconnus lors de l'exécution de l'algorithme.

Une fois l'étape de prétraitement du nuage réalisée, il est nécessaire de recueillir les différents fichiers en entrée de l'algorithme :

- fichier de points au format .las ou .csv de préférence,
- fichier de capteur comportant focale et dimensions du capteur,
- fichier comportant les orientations et positions des caméras. Ce dernier doit comporter :
  - les coordonnées XY Z des caméras dans le même système de référence que le fichier de points,
  - les angles d'orientation des caméras (tangage, roulis, lacet).

Le logigramme en figure 6 présente la logique selon laquelle s'articule le logiciel ainsi que les fichiers en entrée et sortie de l'algorithme.

## Solution opérationnelle retenue

Ce paragraphe s'attache à la description en détail de l'ensemble du matériel et des moyens mis en place pour aboutir à la solution finale retenue.

Le premier point concerne l'appareillage du chariot : nous avons comme exposé précédemment, positionné 5 appareils photo EOS 1000D équipés d'objectifs SAMYANG 10 mm.

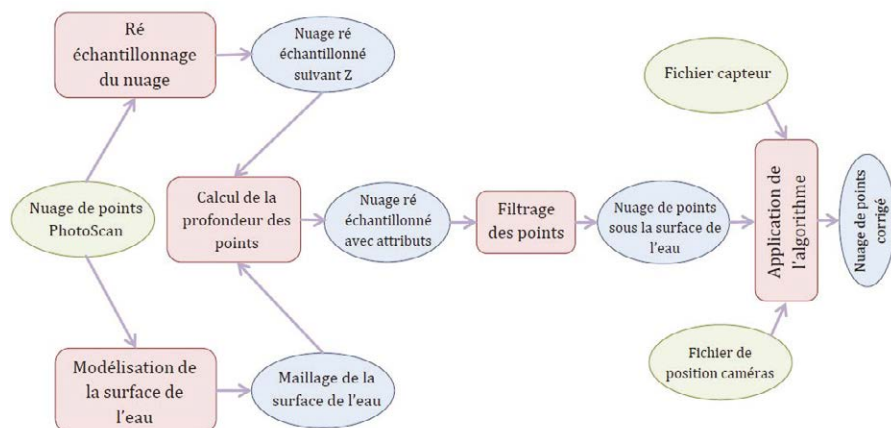


Figure 6. Logigramme des étapes de traitement de l'algorithme de correction utilisé





Les boîtiers utilisés présentent les caractéristiques et réglages suivants :

Nombre de pixels	Dimensions du capteur (pixels/mm)	Focale	ISO	Ouverture de diaphragme	Temps d'exposition	Mise au point
10.1 Mpx	2592 x 3888 14.8 x 22.2	10 mm	200/400	2.8	1/10 à 1/100	À l'infini

Afin de les fixer sur le chariot traversant, des bras supports ont été modélisés numériquement puis montés et installés en vue d'accueillir les appareils. Un rendu 3D est présenté dans la *figure 7*.

L'alimentation des appareils étant restreinte de par les règles de sécurité et l'interdiction de poser une prise de 200 V sur le chariot au-dessus de l'eau, des socles permettant d'intégrer une seconde batterie aux appareils ont été installés.

L'éclairage lors des essais en eau est réalisé grâce à deux boules "chinoises" de 600 W chacune, fixées en bord de chariot et branchées à des alimenta-

tions externes. L'utilisation de lampes tungstènes a été préconisée face aux lampes LED dont la fréquence de scintillement était incompatible avec l'acquisition des clichés.

Enfin, afin de pouvoir recalcr et géoréférencer les nuages de points générés, il a été nécessaire d'installer des cibles connues en coordonnées. Nous avons alors utilisé les patrons des cibles codées en 12 bits fournies par le logiciel PhotoScan qui permettent une détection automatique dans le logiciel. Les cibles ont été imprimées avec un diamètre de 4 cm sur des planches de PVC de 3 mm d'épaisseur avant d'être découpées au laser.

Le diamètre choisi n'est pas arbitraire : des recherches sur le forum du logiciel Agisoft PhotoScan ont permis d'aboutir à la conclusion selon laquelle une détection concluante des cibles devait répondre à plusieurs critères. Ainsi, le diamètre du rond central de la cible doit avoir pour diamètre au minimum entre 9 et 10 fois la taille d'un pixel au sol. Ayant des pixels au sol de 1,1 mm, le centre de notre cible fera entre 9,9 et 11 mm. Le diamètre global de la cible faisant 3,5 fois celui du rond central, on a donc au final des cibles de 4 cm de diamètre afin d'avoir un peu de marge pour la détection.

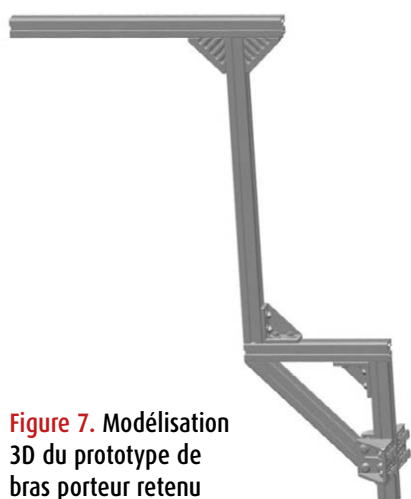
Le placement des cibles est visible dans la *figure 8* ci-dessous.

Nous avons également envisagé la matérialisation de points virtuels. En effet, nous étions restreints dans l'installation des cibles, car elles pouvaient perturber l'écoulement et nous ne pouvions donc les positionner que sur les berges. Nous avons alors suggéré l'installation de lasers de positionnement dont la projection forme une croix. Identifiable sur les photos et ne perturbant pas les fonds mobiles, cette solution s'avérait prometteuse. Le chariot s'arrêtant à des positions données et les lasers étant fixés sur ce dernier, il nous était alors possible de connaître précisément les coordonnées planimétriques de ces points virtuels.

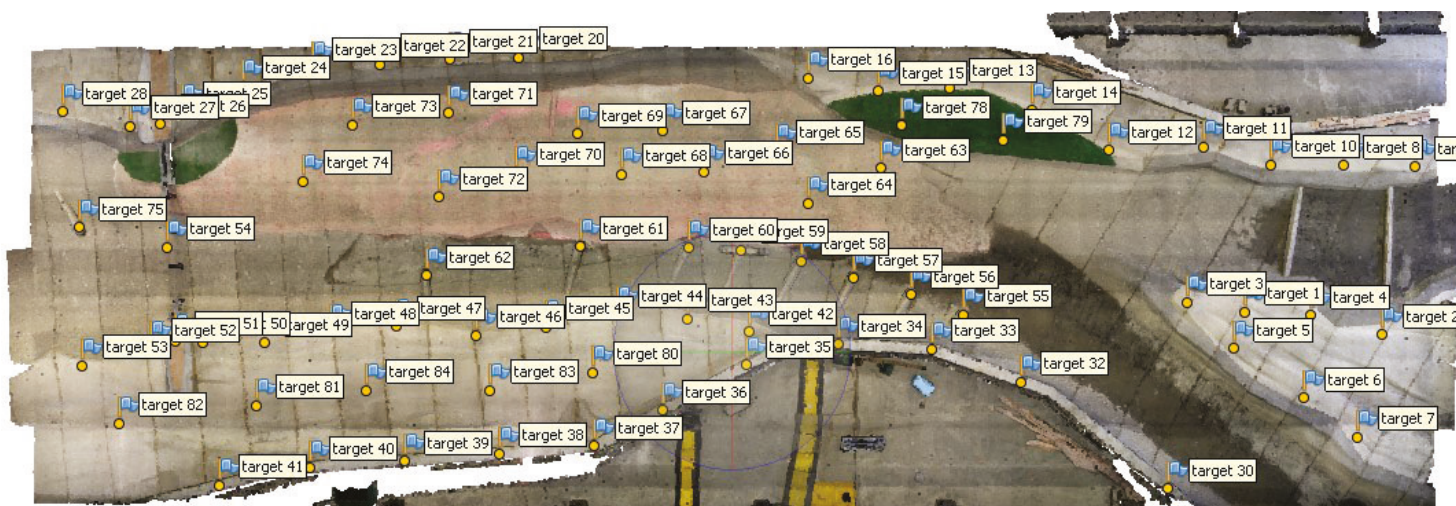


**Figure 9.** Exemple de motif de cible PVC utilisée

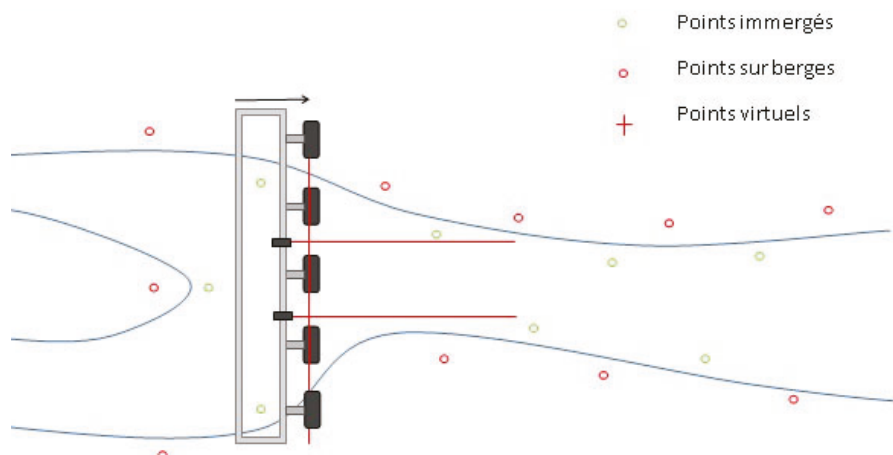
Cependant, pour connaître leur altitude, il fallait utiliser l'Ultralab, un capteur à ultrasons retournant le point le plus haut dans son cône de mesure. Hors, ce cône présente un diamètre incompatible avec la résolution des images. Cette solution a donc été abandonnée et seules les cibles en PVC ont été installées. Un exemple de motif utilisé pour les cibles est présenté dans la *figure 9* ci-contre.



**Figure 7.** Modélisation 3D du prototype de bras porteur retenu



**Figure 8.** Vue de haut du modèle et de la disposition spatiale des cibles PVC



**Figure 10.** Schéma conceptuel de la solution de matérialisation de points virtuels avec des lasers

- le premier jeu est celui de la chape du modèle physique lorsque celui est vide et constitue donc le jeu de référence,
- le second jeu a été réalisé une fois le modèle rempli avec une hauteur d'eau dont l'altitude de la surface est connue dans le référentiel du modèle physique.

## Influence de la réfraction

Pour estimer de manière quantitative les effets de la réfraction sur la génération du nuage de points du modèle physique en eau, nous nous appuyons sur les écarts retrouvés au niveau des points servant au calage du nuage. Comme décrit précédemment, ces derniers sont matérialisés par des cibles codées en 12 bits par le logiciel PhotoScan. Le modèle a été géoréférencé sur un ensemble d'une quarantaine de cibles situées sur les berges en béton du modèle non recouvertes d'eau. Les points de vérification sont, quant à eux, situés dans les zones immergées, afin de voir l'influence de la réfraction dans la détection des points homologues et la mise en corrélation de ces derniers.

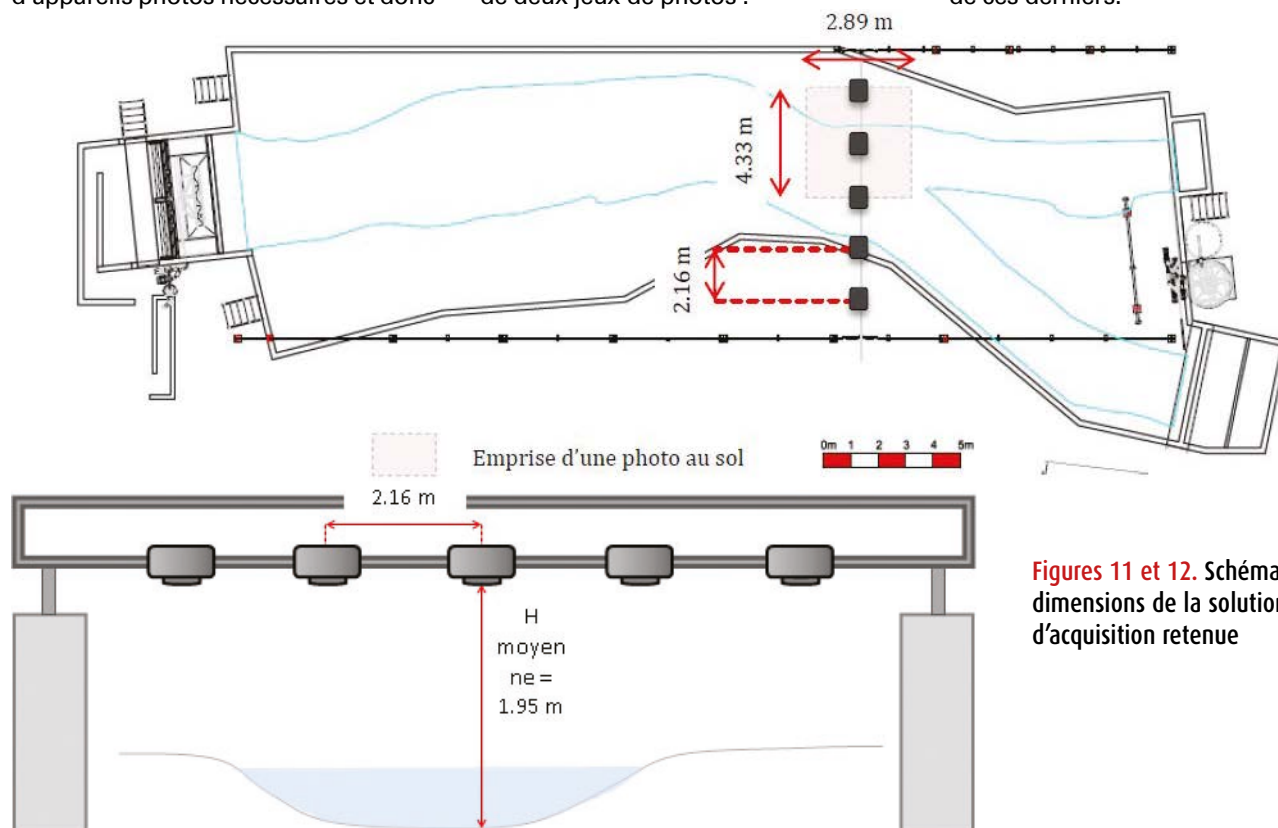
Un schéma de l'installation alors envisagée est illustrée ci-dessus en figure 10.

La liste du matériel établie, l'étape suivante a été de calculer le plan de vol de l'acquisition pour la suite des essais.

## Plan de vol

Le même plan de vol a été utilisé pour l'ensemble des acquisitions de photogrammétrie. Celui-ci a notamment servi pour connaître le nombre d'appareils photos nécessaires et donc

leur configuration d'installation et l'ensemble du matériel inhérent. Les appareils ont été fixés à la perpendiculaire du sol à une hauteur moyenne de 1.95 mètre de manière à minimiser l'angle d'intersection des rayons au niveau de l'interface air eau. Les effets de la réfraction sont alors minimisés au maximum. Les figures ci-dessous permettent de visualiser la solution une fois installée ainsi que la configuration de plan de vol adoptée. Une fois la solution et le montage validés, nous avons procédé à l'acquisition de deux jeux de photos :



**Figures 11 et 12.** Schémas et dimensions de la solution d'acquisition retenue

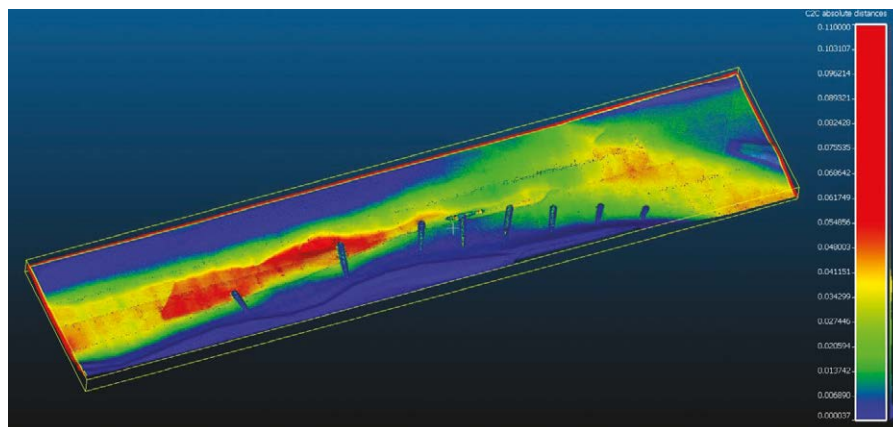


Figure 13. Comparaison sous CloudCompare des nuages avant correction

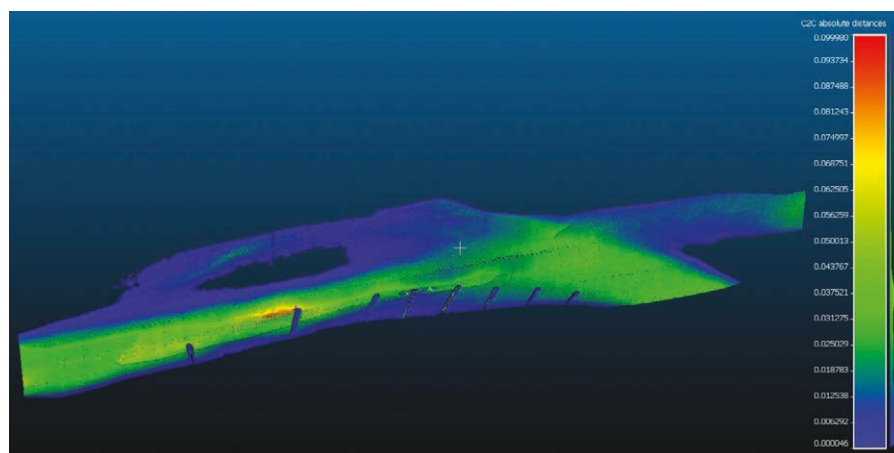


Figure 14. Comparaison sous CloudCompare des écarts du nuage des points immergés

En se basant sur les écarts des points de calage, nous obtenons ainsi une précision moyenne d'orientation externe de 0.2 cm. La précision sur les points de contrôle se dégrade pour sa part considérablement pour atteindre 0.7 cm. Il faut souligner que la valeur des écarts sur les points reste ainsi une moyenne discrète et n'est pas tout à fait représentative de la réalité. Il faut rappeler que les cibles en eau ont été placées de manière à ne pas perturber l'écoulement et ne pas être recouvertes de sédiments par la suite.

On les retrouve ainsi dans les zones avec de faibles hauteurs d'eau et donc où le phénomène de réfraction est le moins présent. Certaines zones du modèle présentent des fosses avec des hauteurs d'eau de plus de 35 cm. L'influence de la réfraction dans ces zones est alors observable de manière plus globale dans une comparaison du nuage affecté de la réfraction par rapport au nuage de référence supposé exact.

Les écarts s'articulent de manière progressive des bords affleurant

de l'eau jusqu'aux zones les plus profondes du modèle où la réfraction est plus importante et où ces derniers atteignent jusqu'à 10 centimètres. L'analyse des écarts se concentre ici sur les points immergés pour lesquels le phénomène de réfraction interagit.

La figure 14 permet ainsi une analyse visuelle des écarts, lesquels s'organisent de manière logique suivant la profondeur en eau du modèle.

L'histogramme des écarts nous permet

Gauss: mean = 0.020436 / std.dev. = 0.015125 [2650 classes]

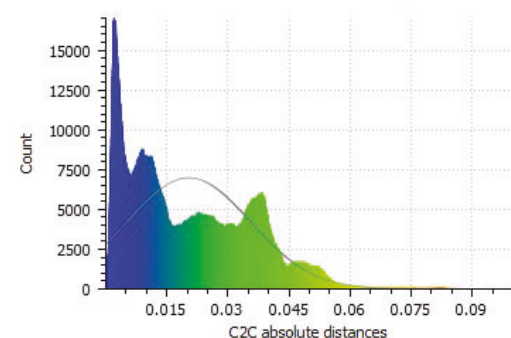


Figure 15. Histogramme des écarts du nuage des points immergés

cette fois-ci de nous faire une idée des erreurs qu'entraîne la réfraction dans la reconstitution de l'altitude des fonds sous une certaine hauteur d'eau. Il est à noter que l'ensemble des écarts relevés sur les points immergés et émergés sont des écarts positifs, traduisant donc que le nuage reconstitué présente des altitudes qui sont plus élevées que celles du modèle de référence.

Cette observation respecte bien les notions physiques de la réfraction selon lesquelles un point en eau est aperçu à une profondeur moindre qu'elle ne l'est réellement.

L'histogramme des écarts de la figure 15 fournit la moyenne et l'écart-type des écarts. Avec pour valeurs 2 cm et 1,5 cm, nous retrouvons bien la hausse attendue avec ainsi très peu d'écarts dans les extrêmes de l'histogramme, soit au maximum 10 cm dans la "fosse" du modèle.

Les effets de la réfraction ont donc clairement été quantifiés dans le cas de notre modèle et nous allons les corriger à l'aide de l'algorithme de J. T. Dietrich exposé plus tôt.

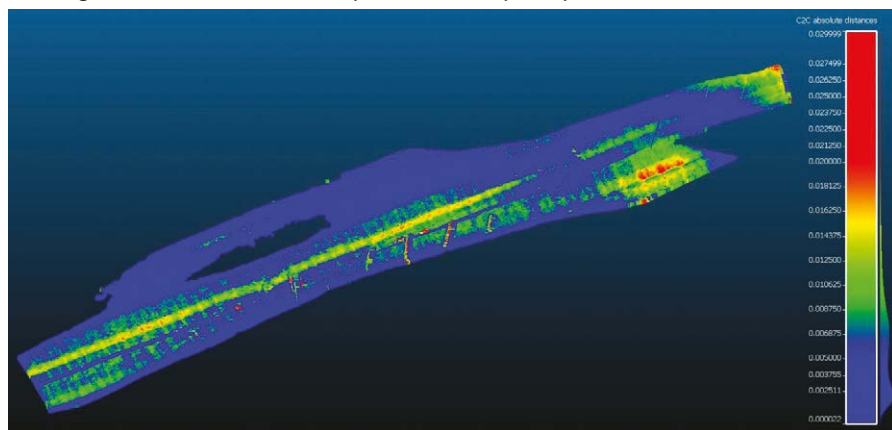


Figure 16. Comparaison sous CloudCompare des écarts du nuage des points immergés corrigés



## Résultats après correction

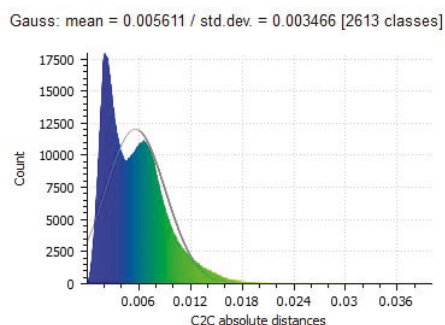
Comme vu dans la partie précédente, le phénomène de réfraction entraîne de grandes erreurs lors de la génération d'un modèle en eau, notamment sur la position altimétrique des points. L'algorithme Python de l'article de J.T. Dietrich (2016), dont le principe de correction a été expliqué plus tôt, propose justement de corriger les altitudes des points en eau du nuage dense généré. Déjà testé lors de mon projet de recherche technologique, il a de nouveau été mis en application lors de ce projet afin de vérifier son efficacité et statuer sur sa future utilisation ou non pour la suite du projet à la CNR.

Dans le paragraphe précédent, il était conclu que le nuage en eau généré présentait une erreur moyenne de 2 cm pour les zones immergées. Ces écarts restent trop importants pour les études que veut réaliser la CNR, c'est pourquoi cet algorithme de correction représente un réel atout dans cette étude.

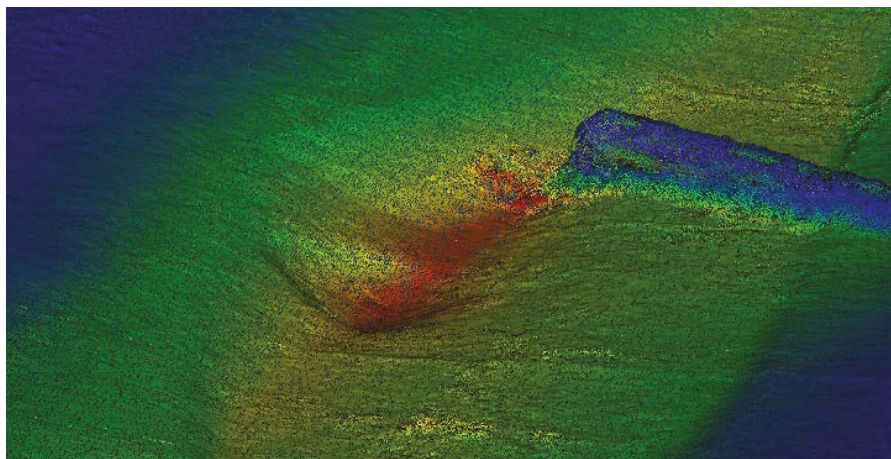
Une fois le nuage de points traité suivant les exigences du protocole et l'algorithme appliqué à ce dernier, nous pouvons effectuer une comparaison avant et après correction par rapport au nuage de référence. Tout d'abord, l'analyse visuelle de la *figure 16* traduit une nette amélioration. En effet, pour une saturation à 2 cm, nous ne retrouvons pratiquement plus de tels écarts.

Si l'on analyse l'histogramme de la *figure 17* ci-dessous, on obtient ainsi un écart moyen inférieur à 0.6 cm sur l'ensemble des points immergés contre 2 cm avant correction.

Cela représente donc une diminution des écarts de plus de 70 %. De même, l'écart-type passe de 1,5 cm avant correction à moins de 0.4 cm une fois cette dernière appliquée. Cela signifie



**Figure 17.** Histogramme des écarts du nuage des points immergés corrigés



**Figure 18.** Une "fosse" du modèle physique, zone de forte profondeur sujette aux plus grands écarts

que l'ensemble des points immergés a bien subi cette correction et sont dans l'ensemble peu écartés de la précision moyenne. Enfin, si l'on analyse bien la comparaison nuage à nuage réalisée, on peut s'apercevoir que les plus forts écarts se retrouvent le long d'une ligne au centre du modèle.

Cette concentration des écarts s'explique par une zone où la profondeur du modèle est bien plus élevée et où l'algorithme semble avoir eu plus de mal à corriger le phénomène. La vue capturée *figure 18* illustre la "fosse", zone de profondeur extrême du modèle physique. De plus, il semblerait que cette zone se trouve dans une zone de recouvrement latérale en bord de photo et donc à la configuration pour laquelle les angles d'intersection des rayons avec l'interface sont les plus élevés. L'addition de ces deux conditions explique donc la difficulté de correction dans cette zone mais également un bruit observable qui est plus important.

## Conclusion

L'utilisation de la photogrammétrie en bathymétrie reste à ce jour méconnue et très limitée. Cette étude nous a permis à travers la réalisation d'un montage et d'une chaîne de traitement de montrer l'efficacité de cette dernière. Il a été abordé ici une approche de correction de la réfraction en post-traitement mais si l'on se réfère à la littérature scientifique, d'autres solutions seraient possibles comme un traitement lors du calcul des nuages. La solution mise en œuvre sur ce modèle est désormais opérationnelle

et permet à l'équipe projet d'améliorer considérablement sa connaissance du fonctionnement hydraulique. La génération d'une orthophoto permet d'avoir une vision qualitative des mouvements et celle des modèles numériques une évolution quantitative entre deux acquisitions. La CNR a travaillé depuis à l'amélioration du système (flashes, automatisation, etc.). ●

L'auteur tient à remercier Paul-Henri FAURE et Damien ALLIAU pour la proposition et l'encadrement de ce projet de fin d'études à la CNR CACOH.

## Contact

Maxime CARTIER XATARD  
max.cartier13@gmail.com

## ABSTRACT

*Photogrammetry is a growing field. The arrival of the drones on the market has allowed a great leap forward in the progress of acquisition techniques and also to diversify the traditional use reserved for it until now. The question arises today as to its use in bathymetry. This master thesis in collaboration with CNR is based on two axes: acquisition and processing of data. A photogrammetric acquisition solution through water and adapted to the scale of a physical model is first developed. In a second step, a photo processing chain and a refraction's correction algorithm on the data are combined to obtain results that can be used for sediment studies. Protocols for each stage are then drafted for future studies.*