



Développement et évaluation d'un système de stéréo-vidéo pour la mesure de vagues en zone de déferlement

Marion JAUD ^{1,2}, Stéphane BERTIN ^{1,2}, Emmanuel AUGEREAU ¹, Charles POITOU ¹, Aelaïg COURNEZ ², Noémie FRITSCH ¹, France FLOC'H ¹

1. Université de Brest, IUEM, Geo-Ocean, UMR 6538 CNRS – UBO – Ifremer, Rue Dumont d'Urville, 29200 Brest, France.
*marion.jaud@univ-brest.fr ; stephane.bertin@univ-brest.fr ;
emmanuel.augereau@univ-brest.fr ; charles.poitou@univ-brest.fr ;
aelaig.cournez@gmail.com ; noemie.fritsch@univ-brest.fr ; france.floch@univ-brest.fr*
2. Université de Brest, IUEM, UAR 3113 CNRS – UBO – IRD, Rue Dumont d'Urville, 29200 Brest, France.

Résumé :

La forme des vagues, et de façon plus générale, le comportement de la surface d'eau en relation avec la morphologie littorale, restent difficiles à mesurer alors que ce sont des facteurs déterminants, agissant sur les processus hydro-sédimentaires. Pour observer le champ de vagues en quatre dimensions (spatialement et temporellement), les méthodes de stéréophotogrammétrie à partir de vidéos connaissent un intérêt grandissant depuis une dizaine d'années.

Nous présentons les différentes étapes du développement d'un système stéréo-vidéo économique et modulable composé de deux GoProTM Hero 7. Dans cette étude, une attention particulière est portée au dimensionnement du système permettant de répondre au besoin en termes de résolution spatiale et de précision, ainsi qu'à la calibration des capteurs optiques, qui est effectuée à l'aide d'un damier et dont les erreurs sont contrôlées afin de limiter le risque de propagation dans les modèles numériques des élévations. Le succès de la mesure requiert également une bonne synchronisation des capteurs. Avec le mode de déploiement proposé, une évaluation sur une zone test aux dimensions connues montre une précision de reconstruction de 3,5%. Le système a ensuite été déployé sur la plage du Minou (Bretagne) à l'aide d'une tourelle légère et spécialement aménagée. La reconstruction de vagues au déferlement est opérationnelle même dans des conditions de levé suboptimales (transparence de l'eau, réflexions solaires, etc.).

Mots-clés :

Mesure 4D de vagues, Etat de mer, Télédétection, Photogrammétrie, Stéréo-vidéo, Calibration optique, Distorsion, Modèle numérique d'élévation, Evaluation des erreurs.

1. Introduction

Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection

L'état de mer influe sur la géomorphologie côtière (érosion, transport de sédiments), sur les habitats benthiques (herbiers, coraux), et sur les infrastructures d'ingénierie côtière et offshore et d'énergie renouvelable. Par exemple, l'analyse de l'amplitude et de la fréquence des vagues montre que ces paramètres sont essentiels dans la prédiction des événements météorologiques extrêmes tels que les vagues de submersion (PASQUET *et al.*, 2014). La forme des vagues avant déferlement influence également la mise en suspension des sédiments sur le fond (MASSELINK *et al.*, 2016). La modélisation numérique peut apporter de nombreuses réponses ; cependant, l'état de la mer résultant de la combinaison d'un grand nombre de processus (forçage gravitationnel, processus sub-gravitationnels, interactions vagues-ondes, etc.), des observations in situ sont nécessaires pour bien comprendre le rôle de ces différents processus. Pourtant, le comportement spatio-temporel de la surface d'eau à l'échelle locale, en relation avec la morphologie littorale, reste difficile à mesurer.

Pour étudier la topographie de surfaces d'eau, ainsi que leur évolution, les méthodes déployées doivent être à même de fournir des données spatio-temporelles avec une couverture spatiale et une fréquence d'acquisition suffisantes. Plusieurs études se sont penchées sur la possibilité d'utiliser un profileur Lidar 2D ou un scanner Lidar 3D multifaisceaux (BELMONT *et al.*, 2007 ; MARTINS *et al.*, 2017 ; BRODIE *et al.*, 2015 ; O'DEA *et al.*, 2021) pour la mesure de vagues à haute résolution spatiale et temporelle. Bien qu'efficaces, ces systèmes Lidar mesurent plutôt une série de profils et ne fournissent pas une réelle couverture surfacique. De plus, ils sont coûteux et nécessitent une plateforme robuste et souvent fixe (ex. pontons, digues) pour leur déploiement, ce qui limite dès lors les sites d'application potentiels. Une autre approche pour observer la surface libre en quatre dimensions (4D, comprenant trois dimensions spatiales et une dimension temporelle) est d'utiliser la stéréo-vidéo, c'est-à-dire des méthodes de stéréophotogrammétrie, auxquelles une composante temporelle est ajoutée grâce à une acquisition vidéo. Un logiciel de traitement, WASS (Wave Acquisition Stereo System), a été spécialement développé pour la mesure des vagues par stéréo-caméra en pleine mer (BERGAMASCO *et al.*, 2017). La plupart des travaux réalisés sur la stéréo-vidéo (BENETAZZO *et al.*, 2012 ; LECKLER *et al.*, 2015 ; GUIMARÃES *et al.*, 2020) utilisent des caméras conçues pour le domaine industriel, évitant les courtes focales afin de réduire les problèmes de distorsion d'image. Cependant, l'utilisation de longues focales a pour effet de réduire le champ de vision, ce qui restreint fortement les configurations d'acquisitions possibles et empêche généralement des mesures à courte portée. De plus, ces caméras restent relativement coûteuses et fragiles, alors que ces systèmes ont vocation à être exposés aux conditions météo-marines.

Pour limiter le risque de dégradation du matériel et augmenter les sites d'application, des outils à bas coût semblent être une bonne alternative. VIEIRA *et al.* (2020) ont récemment montré la possibilité d'avoir recours à un système stéréo grand public composé de deux smartphones pour la reconstruction 3D d'un champ de vagues depuis le rivage. Dans cette

étude, nous évaluons le potentiel d'une paire de caméras GoPro™ pour la mesure de vagues autour de la zone de déferlement sur une plage sableuse ne disposant pas de plateforme fixe pour l'installation des appareils. Le capteur GoPro™ présente des avantages supplémentaires par rapport au smartphone. Tout en restant compact, léger et relativement peu onéreux, il est robuste et résistant à l'eau et peut donc être installé sur tout type de structure fixe ou mobile. De plus, avec une optique et des fonctionnalités améliorées, cela représente un système très modulable. Cependant, alors que la courte distance focale de ces capteurs permet de visualiser une grande surface malgré une courte portée, ceci est en général contrebalancé par des distorsions importantes provoquées par l'objectif, ce qui peut affecter la topographie mesurée. Pour corriger ces effets, des applications récentes de la photogrammétrie à partir de GoPro ont montré l'importance d'une application rigoureuse des étapes de calibration des capteurs optiques et de vérification de la qualité des données (LI *et al.*, 2018). Après une description détaillée du dispositif de mesure, cet article présente les différentes étapes d'acquisition et de traitement des données en vue de la reconstruction 4D de la surface d'eau. Des premiers résultats obtenus sur la plage du Minou en Finistère sont présentés et discutés à la lumière de l'objectif développé dans le cadre du projet ANR WEST, qui est d'utiliser ce système stéréo-vidéo pour mieux caractériser les conditions hydrodynamiques menant au transport sédimentaire vers la côte lors des périodes d'accrétion.

2. Matériel et dispositif expérimental

Étant des capteurs grand public, les caméras GoPro™ sont d'un coût réduit (300 à 500€ selon les modèles), facilement remplaçables, robustes, résistantes à l'eau et légères (116 g). De plus, de nombreux accessoires peuvent être utilisés : filtres optiques, caissons étanches, télécommandes et boîtiers d'alimentation et de contrôle, ce qui rend ces caméras extrêmement modulables. Dans cette étude, nous avons utilisé deux GoPro™ Hero7 Black, en mode vidéo 4K (format 4:3 et une fréquence d'acquisition de 24 images/s), avec une résolution de 12 Mpix. Ces caméras ont une focale très courte ($f = 2,92$ mm), ce qui induit un angle de champ large et permet d'imager une zone plus étendue, même à faible distance. Les caméras sont placées dans des caissons étanches, avec une alimentation externe et un module *Up-Blink* permettant de programmer les plages d'acquisition (voir figure 1). La synchronisation des deux caméras est assurée au moyen d'un flash lumineux servant de clap, qui permet de déterminer le nombre d'images d'écart entre les deux vidéos (de l'ordre de 13 images avec le *Up-Blink*). Pour éviter la latence d'enregistrement, et ainsi limiter la dérive temporelle entre les vidéos des deux caméras, les GoPros™ sont équipées de cartes micro-SD de classe "V30" à haute vitesse. Avec ces cartes, nous obtenons moins de 0,04 s de dérive (soit une différence d'une image) après 15 minutes d'enregistrement.

Dans le prototype utilisé ici, les caissons des GoPro™ sont placés de part et d'autre d'un tube métallique rigide. Comme les caméras peuvent être déplacées sur le tube, la ligne de

Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection

base entre les deux centres optiques des caméras peut être facilement ajustée. Ce tube peut être fixé sur un trépied topographique avec un berceau permettant sa rotation autour d'un axe horizontal afin de régler l'angle de visée des caméras (voir figure 1). Comme l'objectif est d'avoir un système adaptable et transposable, y compris sur des sites où il n'y a pas de point haut pour observer la zone, nous avons imaginé pouvoir fixer le tube au sommet d'une structure déployée de façon temporaire : ici, des éléments de pont lumière (voir figure 2).



Figure 1. Système de mesure stéréo-vidéo conçu pour cette étude, composé de deux caméras GoProTM montées sur une barre rigide (baseline) ajustable sur différents systèmes de fixation (ex. trépied).

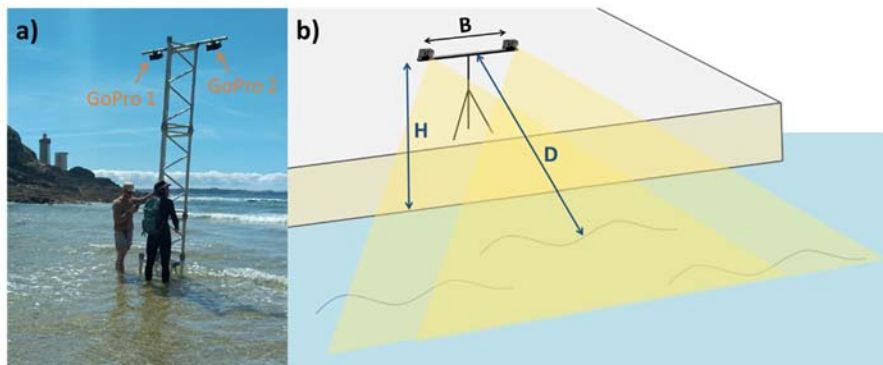


Figure 2. (a) Exemple de déploiement du système stéréo-vidéo sur la plage du Minou (Finistère) et (b) présentation des paramètres principaux d'acquisitions où B est la ligne de base entre les centres optiques des deux caméras, H est la hauteur des centres optiques par rapport à la surface d'eau et D est la distance à la zone de mesure.

3. Méthodes

3.1 Site d'étude et conditions environnementales

Un déploiement du système stéréo-vidéo a eu lieu sur la plage sableuse macrotidale du Minou près de Brest en Finistère (Bretagne, France). La plage du Minou se trouve à l'entrée du goulet de Brest et offre une bonne exposition aux houles d'Ouest à Sud-Ouest. Le déploiement a eu lieu le vendredi 13 mai 2022 entre 11 h et 13 h sur une marée montante (haute mer à 16 h, coefficient 72). L'acquisition a eu lieu par ciel dégagé, un angle du soleil zénithal compris entre 40 et 60° (90° indique un soleil au nadir) et un azimut entre 110 et 150° (0° indique le Nord géographique). En termes d'agitation du plan d'eau, les prévisions faisaient état d'une houle en légère baisse avec une hauteur significative (H_s) à 0,8 m et une période (T) d'environ 10 s (résultats issus du modèle WAVEWATCH III diffusés par Ifremer). Pendant l'acquisition, un vent léger (5-10 nœuds) de secteur Ouest à Sud-Ouest contribuait à donner une certaine rugosité (texture) à la surface d'eau.

3.2 Géométrie d'acquisition

Le rapport entre la ligne de base et la distance à la cible, appelé ici B/D (voir figure 2), est un paramètre caractéristique de la configuration. Un rapport B/D "élevé" améliore la précision de la reconstruction 3D et limite le bruit. En revanche, si B/D est trop élevé, les images sont acquises sous des angles trop différents et il devient impossible de détecter des points homologues à utiliser dans la correspondance des points caractéristiques. Une difficulté dans le paramétrage de la configuration est donc de trouver le bon rapport B/D. BERGAMASCO *et al.* (2017) indiquent que les axes optiques des caméras doivent être quasi-parallèles et que le rapport B/D doit être proche de 0,10. Dans l'étude de VIEIRA *et al.* (2020), avec une ligne de base de 0,98 m et une zone imagée allant de 10 m à 35 m, le rapport B/D varie de 0,1 dans le champ proche à 0,03 dans le champ lointain. Dans cette étude, la ligne de base est de 1,1 m, les axes optiques des caméras sont parallèles, les caméras sont situées à environ 4 m au-dessus de l'eau et orientées avec un angle de 40° par rapport à la verticale. Cette configuration se traduit par une zone d'étude d'environ 30 m x 40 m dont le point le plus proche se trouve à une distance horizontale d'environ 1 m des caméras avec un rapport B/D allant de 0,26 à 0,036.

3.3 Calibration

La calibration consiste à calculer les paramètres intrinsèques et extrinsèques qui permettront de convertir l'image réelle, impactée par les distorsions de l'objectif et les effets de prise de vue, à une géométrie théorique "sténopé". En raison de la courte focale de la GoPro™ (2,92 mm), les images présentent une forte distorsion radiale. L'étape de calibration est donc d'autant plus critique. Pour cette étape de calibration, nous utilisons un damier (70 x 70 cm composé de carreaux de 5 cm) comme motif de calibration (voir figure 3a) et la toolbox *Stereo-Camera Calibrator* proposée dans Matlab® afin d'obtenir simultanément les paramètres intrinsèques et extrinsèques de la paire de caméras.

Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection

Dans cette boîte à outils, il est recommandé,

(<https://fr.mathworks.com/help/vision/ug/using-the-stereo-camera-calibrator-app.html>),

- i) d'avoir plus de 10 paires d'images,
- ii) qu'en combinant les différentes photos, le motif de calibration recouvre le cadre de l'image,
- iii) et que l'orientation du motif de calibration varie suffisamment par rapport aux caméras (mais avec un angle inférieur à 45°).

Afin de minimiser le temps de calibration et donc d'économiser la batterie et de limiter le volume de données à traiter, une procédure d'étalonnage a été mise en place. Cette procédure consiste à monter le damier sur un trépied afin de le stabiliser au maximum pendant l'acquisition. Le damier est déplacé sur 6 positions (gauche/centrale/droite à la fois en proche/lointain – voir figure 3c) par rapport à la barre stéréo-vidéo montée sur un trépied de topographe. Pour chacune de ces positions, on fait pivoter le damier le long d'un axe vertical pour obtenir trois orientations différentes. En outre, la barre stéréo-vidéo pivote autour d'un axe horizontal de sorte que le damier couvre verticalement toute l'image (bas/centre/haut). Ainsi, 9 configurations sont acquises pour chaque position du système (voir figure 3b), soit un total de 54 paires d'images extraites pour la calibration. Avec ce protocole, l'étape de calibration sur le terrain prend environ 5 minutes.

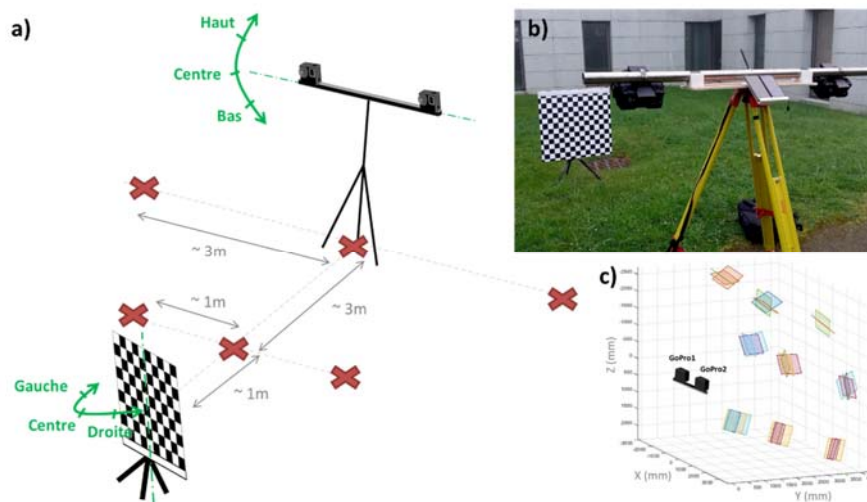


Figure 3. (a) Méthode utilisée pour la calibration du système stéréo GoPro reposant sur un damier rigide. (b) Couples stéréoscopiques utilisés pour la détermination des paramètres intrinsèques et extrinsèques du système, et (c) schéma explicatif du protocole d'acquisition des images de calibration.

En plus de calculer les paramètres intrinsèques et extrinsèques du système, la toolbox *Stereo Camera Calibrator* fournit un score de qualité : l'erreur de reprojection. Les erreurs de reprojection correspondent aux distances, en pixels, entre les points détectés et les

points reprojétés (voir figures 4a et b). *Stereo Camera Calibrator* calcule cette erreur pour chaque paire d'images ainsi que l'erreur de reprojection moyenne.

Avec la procédure de calibration proposée ci-dessus, ces deux erreurs restent inférieures à 1 pixel, ce qui est tout à fait satisfaisant.

Pour compléter cette estimation de la qualité, nous calculons, sur quelques images en plus du jeu de données calibration, une erreur de rectification (BERTIN *et al.*, 2015). En géométrie épipolaire, les points homologues d'un couple stéréo parfaitement corrigé des distorsions doivent être situés sur la même ligne horizontale de l'image. L'erreur de rectification correspond alors à la distance verticale entre deux points homologues (voir figure 4c).

Une fois les images de calibration obtenues, il est primordial de veiller à ce que la géométrie du système stéréo-vidéo (en particulier la position relative des caméras l'une par rapport à l'autre) reste inchangée pendant toute la durée d'acquisition, au risque d'avoir des paramètres extrinsèques inadéquats et des erreurs élevées au moment de la reconstruction.

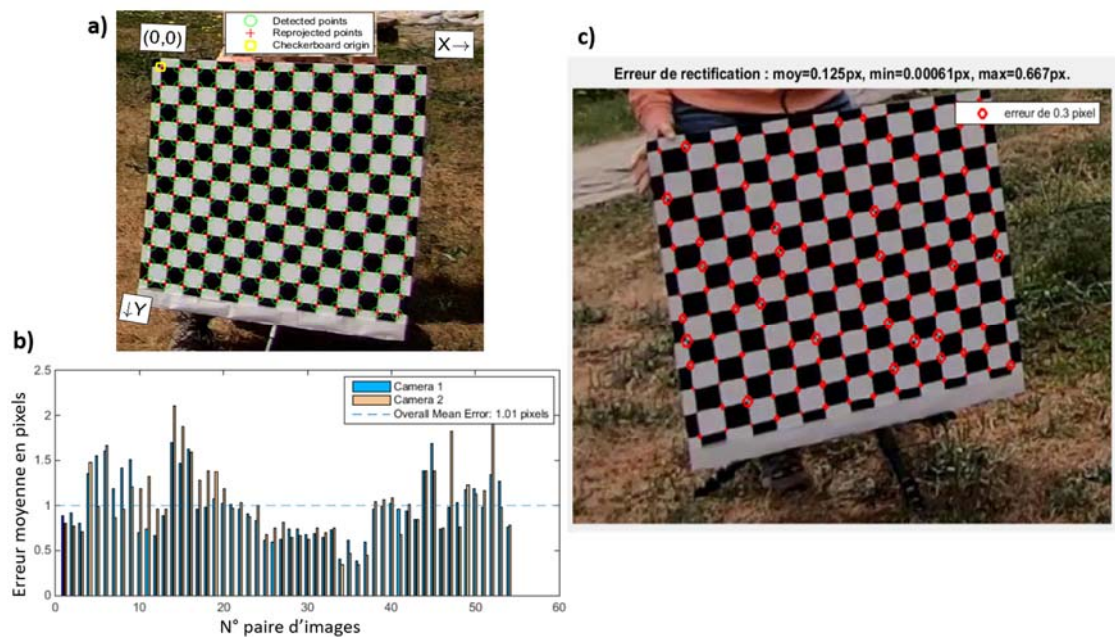


Figure 4. Evaluation des résultats de calibration : (a) et (b) Erreur de reprojection calculée par *Stereo Camera Calibrator* pour chaque paire d'images prise en compte dans le calcul des paramètres internes ; (c) Erreur de rectification, calculée manuellement a posteriori sur des images complémentaires au jeu de données de calibration.

3.4 Acquisition et reconstruction stéréoscopique

Un pipeline de traitement a été imaginé de façon à traiter « à la chaîne » plusieurs couples d'images. Les couples d'images corrigées de la distorsion via le module *Stereo Camera*

Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection

Calibrator de *Matlab*® sont ensuite gérés dans le logiciel *MicMac* (logiciel libre de photogrammétrie développé par l'IGN - Institut Géographique National), selon la chaîne de traitement suivante (voir figure 5) :

- Les fichiers *Autocal* et *Orientation* dans l'arborescence du projet *MicMac* sont mis à jour en renseignant respectivement la focale des caméras et les composantes du vecteur de ligne de base entre la caméra 1 et la caméra 2, paramètres déterminés lors de la stéréocalibration. Les métadonnées du fichier EXIF des images sont également mises à jour automatiquement.

- La commande *MicMac* "*Tapioca*" permet ensuite de rechercher les points de liaison sur les images en pleine résolution.

- Ensuite, la commande *MicMac* "*Tapas*" calcule l'orientation relative des caméras. En utilisant l'option "*Figee*", on contraint l'algorithme à utiliser les paramètres calculés lors de l'étape de calibration.

- Connaissant la position et l'orientation de chaque caméra, la commande *MicMac* "*AperiCloud*" génère un nuage 3D épars.

- Enfin, la commande *MicMac* *C3DC* génère un nuage de points dense pour le couple d'images orientées. Selon les levés, nous avons obtenu les meilleurs résultats avec les options "*Statue*", "*Forest*" ou "*BigMac*".

Pour chaque couple d'images, le nuage de points dense, recalé relativement à la position des caméras, est finalement exporté dans *CloudCompare*®, logiciel open-source dédié à la manipulation de nuages de points 3D, pour la génération de Modèles Numériques de Terrain (MNT) et l'analyse des données.

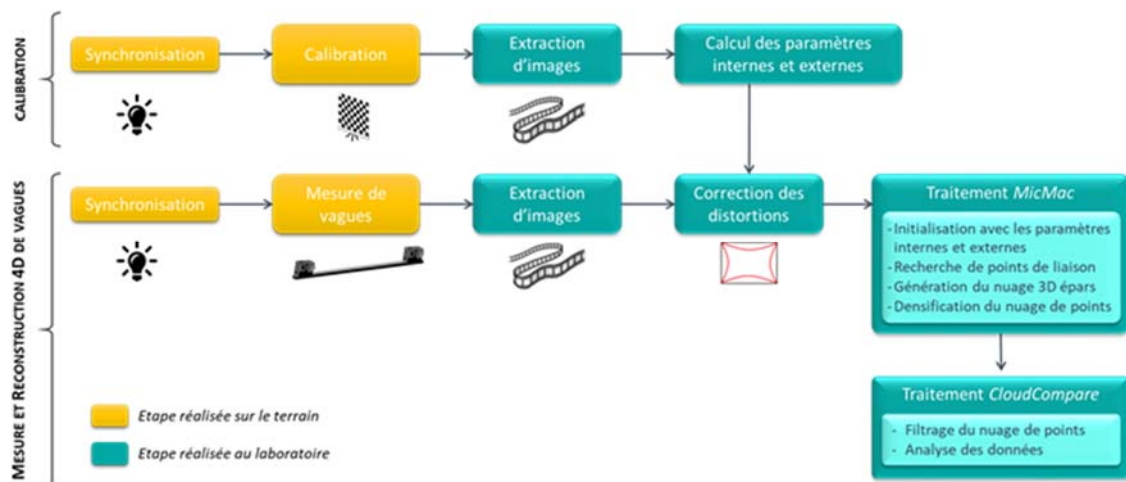


Figure 5. Chaîne de traitement utilisée pour la reconstruction en 4D de la surface d'eau à partir d'images stéréoscopiques.

4. Résultats et discussion

4.1 Validation sur une zone test

Afin d'évaluer la qualité de la reconstruction, une acquisition a été réalisée selon le protocole défini précédemment, mais dans un environnement structuré (portion de bâtiments), avec des longueurs étalons, facilement mesurables selon trois dimensions. En particulier, le damier a été utilisé pour déterminer la répartition spatiale des erreurs dans le plan horizontal en le déplaçant latéralement du champ proche au champ lointain.

La figure 6 montre que les surfaces planes contenues dans la zone test sont reconstruites sans déformation. Cette observation suggère une bonne calibration des capteurs optiques. En effet, des déformations géométriques dans les résultats issus de la photogrammétrie ont été associés à des erreurs de calibration en particulier sur la longueur focale et les paramètres de distorsion (JAMES & ROBSON, 2014). Quantitativement, à partir de dix mesures étalons allant de 0,1 m à 11 m, l'erreur moyenne de reconstruction a été évaluée à 3,46% (avec une erreur maximale de 10% sur un carreau de 10 cm).

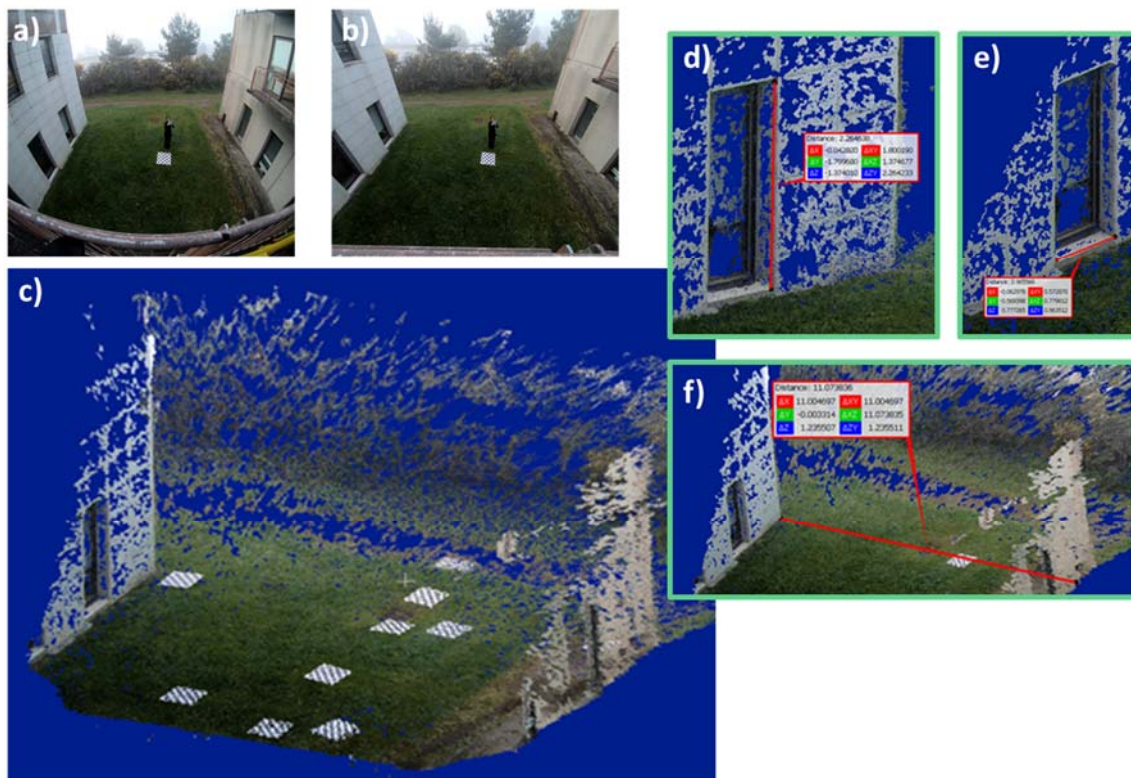


Figure 6. Zone de validation de la reconstruction. (a) Zone imagée avant correction de la distorsion. (b) Zone imagée après correction de la distorsion. (c) Nuage de points dense issu de la chaîne de traitement MicMac et inséré dans CloudCompare. (d), (e), (f) Exemples de mesures “étalons” dans différentes directions sur le nuage de points denses et comparées à la mesure in situ.

4.2 Reconstruction 4D d'une vague

Les figures 7 et 8 présentent les résultats de la reconstruction de la surface d'eau sur la plage du Minou à un instant donné ainsi que pour une série d'images.

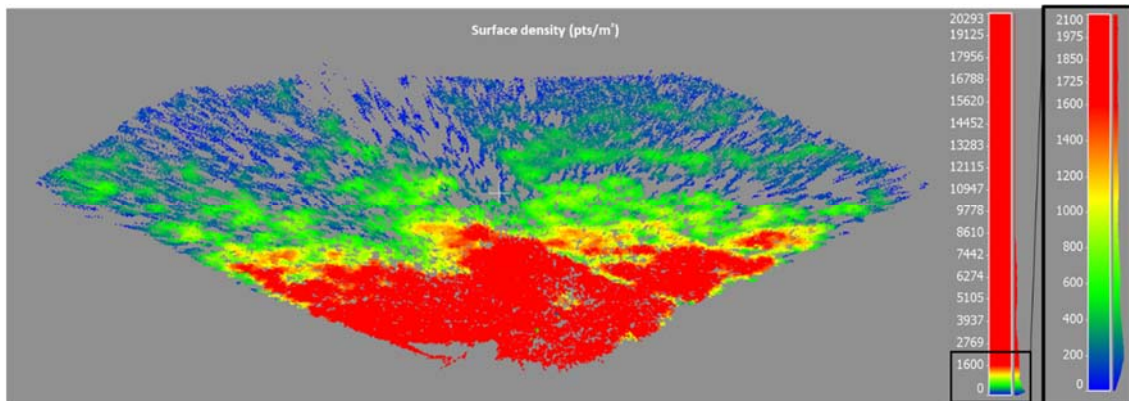


Figure 7. Carte de densité de points (en points/m²) de la zone reconstruite pour le site test de la plage du Minou.

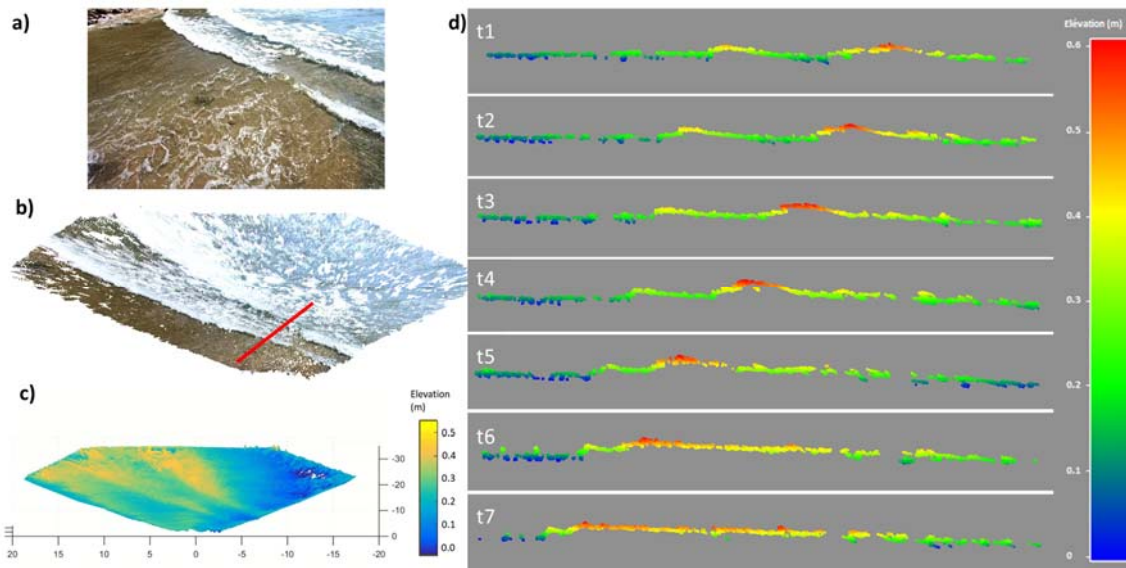


Figure 8. (a) Exemple d'image corrigée des distorsions (temps $t1$). (b) Nuage de points dense colorisé reconstruit ($t1$). Le trait rouge correspond à la position du profil présenté en (d). (c) Modèle Numérique d'Élévation généré après filtrage manuel ($t1$). (d) Extraction d'un profil d'élévation à partir de sept reconstructions séparées de 0.4 s.

La zone reconstruite est de forme trapézoïdale (voir figures 7 et 8), cette zone commençant à environ 1 m (en distance horizontale) par rapport au pied de la tour, avec une largeur de 6 m. Comme attendu, la densité de points décroît avec la distance aux caméras, au fur et à mesure que la rasance de la prise de vue augmente (figure 7). On observe ainsi une densité dépassant les 10.000 points au m² dans le champ proche, mais également une diminution rapide pour atteindre des densités de deux ordres de grandeur en deçà pour des distances aux caméras de l'ordre de quelques dizaines de mètres. Afin de pouvoir modéliser de façon réaliste les vagues de faibles amplitudes mesurées lors de ce déploiement, et du fait que les vagues observées représentent un environnement

particulièrement complexe pour la télédétection en raison d'une faible texture, du peu de contraste, et de l'absence d'arêtes marquées, un seuil de densité de points minimale (500 pts/m²) a été fixé avant interpolation sur une grille régulière (figure 8c).

La zone est alors découpée en fonction de cette densité de points. Dans cette étude, la taille de la zone reconstruite est de l'ordre de 40 m (transversalement à l'axe de visée des caméras) par 30 m (dans l'axe de visée), soit environ 780 m² (voir figure 8). A partir de chaque nuage de points associé à un couple d'images, un Modèle Numérique d'Élévation (MNE) peut être généré (voir figure 8c). Ici, le MNE est généré par interpolation linéaire, sur une grille de 10 cm de résolution.

Pour les différentes prises de vue, les nuages de points ont pu être reconstruits sur l'ensemble de la zone imagée, ce qui a pu être favorisé par la texture de surface due à la mousse et à l'écume des vagues après déferlement.

En revanche, lorsque le fond sableux est visible par transparence, c'est le fond et non la surface qui a été reconstruit (voir partie gauche de la figure 8d). Les différentes vagues d'une même série sont reconstruites de manière distincte. On obtient ici des hauteurs maximales tête à creux de l'ordre de 40 cm. Cette valeur est inférieure à la prédiction du modèle WAVEWATCH III ($H_s = 80$ cm), mais ceci peut être dû au fait que notre zone de mesure est davantage située au niveau du jet de rive plutôt que la zone de déferlement. Ces résultats sont encourageants et démontrent la capacité d'un système stéréo-vidéo pour mesurer des vagues d'amplitude faible à moyenne, comme envisagé dans le cadre du projet WEST qui s'intéresse aux conditions menant au retour du sable sur la plage intertidale.

Les nuages de points présentés ici n'ont pas été filtrés. Mais des étapes de filtrage pourraient être ajoutées à la chaîne de traitement. Par ailleurs, dans des conditions ensoleillées, la réflexion spéculaire génère du bruit sur la reconstruction. Pour pallier ce problème en amont, l'utilisation de filtres polarisants pour GoProTM pourrait être envisagée.

Concernant la chaîne de traitement, l'utilisation du logiciel WASS (BERGAMASCO *et al.*, 2017), dédié à la stéréo restitution de vagues, avait été envisagée. Mais, probablement en raison des spécificités du capteur GoProTM (notamment les très fortes distorsions), certains résultats intermédiaires n'étaient pas pleinement satisfaisants. Cet outil mériterait davantage de tests, possiblement en reconsidérant notre procédure de calibration.

5. Conclusions

Dans cette étude, nous avons présenté le développement d'un système stéréo-vidéo faible coût et modulable pour la mesure de vagues à partir de caméras grand public GoProTM et dont le déploiement peut être effectué à partir d'une structure légère installée au plus près de la zone d'acquisition.

Différentes stratégies ont été employées pour déterminer les erreurs de mesure et limiter leur propagation dans les reconstructions 4D. Nos résultats montrent qu'il est possible de

Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection

calibrer efficacement les capteurs GoPro™ à l'aide d'un damier rigide et ainsi de pouvoir corriger les effets de distorsion optique, avec des erreurs de reprojection et de rectification en dessous de 1 pixel. Faute de vérité terrain pour les mesures de vagues effectuées sur la plage du Minou, le protocole d'acquisition a été mis en œuvre sur une zone test aux dimensions connues, avec des précisions 3D moyennes obtenues de l'ordre de 3,5% des longueurs mesurées.

Le système a montré son potentiel pour générer des reconstructions 4D de vagues en champ proche et en domaine côtier, sur des surfaces pouvant atteindre près de 1000 m² et avec une densité de points suffisante pour la reconstruction de modèles numériques d'élévations avec une résolution de 10 cm. Grâce aux nombreux accessoires disponibles pour ces caméras et à la modularité du système, certaines limites liées aux conditions d'acquisition (ex. réflexion solaire) pourront vraisemblablement être surmontées, contribuant ainsi à la transposabilité du système dans différents sites.

6. Références bibliographiques

- BELMONT M. R., HORWOOD J. M. K., THURLEY R. W. F., BAKER J. (2007). *Shallow Angle Wave Profiling Lidar*. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 24(6), 1150–1156. <https://doi.org/10.1175/JTECH2032.1>
- BENETAZZO A., FEDELE F., GALLEGRO G., SHIH P.-C., YEZZI A. (2012). *Offshore stereo measurements of gravity waves*. Coastal Engineering, 64, 127–138. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.01.007>
- BERGAMASCO F., TORSELLO A., SCLAVO M., BARBARIOL F., BENETAZZO A. (2017). *WASS: An open-source pipeline for 3D stereo reconstruction of ocean waves*. Computers & Geosciences, 107, 28–36. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.07.001>
- BERTIN S., FRIEDRICH H., DELMAS P., CHAN E., GIMEL'FARB G. (2015). *Digital stereo photogrammetry for grain-scale monitoring of fluvial surfaces: Error evaluation and workflow optimisation*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 101, 193–208. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.12.019>
- BRODIE K. L., RAUBENHEIMER B., ELGAR S., SLOCUM R. K., MCNINCH J. E. (2015). *Lidar and Pressure Measurements of Inner-Surfzone Waves and Setup*. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 32(10), 1945–1959. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-14-00222.1>
- GUIMARÃES P. V., ARDHUIN F., BERGAMASCO F., LECKLER F., FILIPOT J.-F., SHIM J.-S., DULOV V., BENETAZZO A. (2020). *A data set of sea surface stereo images to resolve space-time wave fields*. Scientific Data, 7(1), 145. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0492-9>
- JAMES M. R., ROBSON S. (2014). *Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks*. Earth Surface Processes and Landforms, 39, 1413–1420. <https://doi.org/10.1002/esp.3609>

- LECKLER F., ARDHUIN F., PEUREUX C., BENETAZZO A., BERGAMASCO F., DULOV V. (2015). *Analysis and Interpretation of Frequency–Wavenumber Spectra of Young Wind Waves*. *Journal of Physical Oceanography*, 45(10), 2484–2496. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-14-0237.1>
- LI W., BERTIN S., & FRIEDRICH H. (2018). *Combining Structure from Motion and close-range stereo photogrammetry to obtain scaled gravel bar DEMs*. *International Journal of Remote Sensing*, 39(23), 9269–9293. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1530809>
- MARTINS K., BLENKINSOPP C. E., POWER H. E., BRUDER B., PULEO J. A., BERGSMA E. W. J. (2017). *High-resolution monitoring of wave transformation in the surf zone using a LiDAR scanner array*. *Coastal Engineering*, 128, 37–43. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.07.007>
- MASSELINK G., CASTELLE B., SCOTT T., DODET G., SUANEZ S., JACKSON D., FLOC’H F. (2016). *Extreme wave activity during 2013/2014 winter and morphological impacts along the Atlantic coast of Europe*. *Geophysical Research Letters*, 43(5), 2135–2143. <https://doi.org/10.1002/2015GL067492>
- O’DEA A., BRODIE K., ELGAR S. (2021). *Field observations of the evolution of plunging-wave shapes*. *Geophysical Research Letters*, 48(16). <https://doi.org/10.1029/2021gl093664>
- PASQUET A., MICHAUD H., AOUF L., BARAILLE R., BRU C., CORREARD S., GOUILLON F., JOURDAN D., MORVAN G., OHL P., PARADIS D. (2014). *Implémentation d’un nouveau modèle opérationnel de prévision des vagues et surcotes marines*. XIII^{ème} JNGCGC, Dunkerque, 149–158. <https://doi.org/10.5150/jngcgc.2014.017>
- VIEIRA M., GUIMARÃES P. V., VIOLANTE-CARVALHO N., BENETAZZO A., BERGAMASCO F., & PEREIRA H. (2020). *A Low-Cost Stereo Video System for Measuring Directional Wind Waves*. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(11), 831. <https://doi.org/10.3390/jmse8110831>

Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection