

---

## **Création d'un Modèle Numérique Dynamique de Surface (MNDS) à l'aide de l'algorithme de la Direct Linear Transformation (DLT) et détermination des champs de vitesses de l'écoulement à partir d'appareils vidéographiques**

**Auteur :** Decalf, Manon

**Promoteur(s) :** Cornet, Yves; Dewals, Benjamin

**Faculté :** Faculté des Sciences

**Diplôme :** Master en sciences géographiques, orientation géomatique et géométrologie, à finalité spécialisée

**Année académique :** 2017-2018

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/5584>

---

### *Avertissement à l'attention des usagers :*

*Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.*

*Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.*

---



UNIVERSITÉ DE LIÈGE  
Faculté des Sciences  
Département de Géographie

**Création d'un Modèle Numérique Dynamique de Surface  
(MNDS) à l'aide de l'algorithme de la *Direct Linear  
Transformation* (DLT) et détermination des champs de  
vitesses de l'écoulement à partir d'appareils vidéographiques**

*Date de défense : Septembre 2018*

*Promoteur : Y. CORNET*

*Co-promoteur : B. DEWALS*

*Lecteurs : P. ARCHAMBEAU & G. HOUBRECHTS*

*Mémoire présenté par :*

***Manon DECALF***

*pour l'obtention du titre de :*

***Master en Sciences géographiques, orientation  
géomatique et géométrologie, à finalité spécialisée***





UNIVERSITÉ DE LIÈGE  
Faculté des Sciences  
Département de Géographie

**Création d'un Modèle Numérique Dynamique de Surface  
(MNDS) à l'aide de l'algorithme de la *Direct Linear  
Transformation* (DLT) et détermination des champs de  
vitesses de l'écoulement à partir d'appareils vidéographiques**

*Date de défense : Septembre 2018*

*Promoteur : Y. CORNET*

*Co-promoteur : B. DEWALS*

*Lecteurs : P. ARCHAMBEAU & G. HOUBRECHTS*

*Mémoire présenté par :*

***Manon DECALF***

*pour l'obtention du titre de :*

***Master en Sciences géographiques, orientation  
géomatique et géométrologie, à finalité spécialisée***

## REMERCIEMENTS

*Je tiens premièrement à remercier mon promoteur en faculté des sciences, Yves Cornet, pour sa disponibilité, son implication et ses conseils avisés tout au long de ce quadrimestre.*

*Je tiens à remercier au même titre mon co-promoteur en faculté de sciences appliquées, Benjamin Dewals, pour son encadrement ainsi que sa participation lors d'une journée de test au laboratoire.*

*Je remercie Benoit Jonlet pour les conseils topographiques prodigués afin de maîtriser pleinement la station totale.*

*Je remercie également Pierre Archambeau pour les solutions apportées lors des quelques difficultés rencontrées.*

*Mes remerciements vont également à Sébastien Erpicum pour avoir effectué la transition entre tous les besoins nécessaires au laboratoire et la réalisation de ceux-ci.*

*Je désire également remercier Nicolas Rousseau pour sa collaboration et son aide sur le modèle expérimental ainsi que Max pour l'autonomie apportée au laboratoire.*

*Enfin et non des moindres, je tiens à remercier tous les stagiaires, Alexandre, Claire, Sarah, Mike et chercheurs, Xuefang, Maurine et Mohammad du laboratoire HECE pour leur disponibilité et leur participation sportive lors des différents essais effectués.*

*Je souhaite pour finir remercier ma famille et mes amis pour leur soutien et plus particulièrement mon petit frère pour s'être improvisé assistant géomètre lors de la dernière journée d'essai.*

## RESUME

Les ruptures de digues fluviales provoquent des dégâts considérables tant sur le plan humain que matériel. De nombreuses recherches ont étudié le mécanisme de rupture par surverse en considérant un flux transversal à l'édifice et en négligeant le flux longitudinal. Cependant, la formation de la brèche est fortement influencée par le flux longitudinal.

L'objectif de ce mémoire consiste donc à modéliser de manière dynamique la surface libre de l'écoulement résultant d'une rupture de digue par surverse en configuration fluviale dans le but de comprendre le processus de formation, d'érosion et de propagation de la brèche.

L'hypothèse de recherche posée consiste à utiliser la vidéographie en stéréoscopie couplée à l'algorithme de la *Direct Linear Transformation* (DLT) et à la géométrie épipolaire pour obtenir des champs de vitesses tridimensionnelles sur base d'objets disséminés à la surface libre de l'écoulement. Pour cela un module de détection automatique de points homologues a dû être intégré dans le processus de restitution photogrammétrique statique de la DLT afin d'acquérir une restitution dynamique.

Cette modélisation a permis d'obtenir des champs de vitesses eulériens de l'écoulement sur base d'acquisition d'images FullHD à un taux d'échantillonnage temporel de 30 images par seconde. Les parties de la brèche les plus vulnérables à l'érosion ont ainsi pu être identifiées afin de mieux comprendre son processus de propagation.

La méthode développée propose donc l'avantage de déterminer automatiquement et de manière non-intrusive des champs de vitesses eulériens tridimensionnelles distribuées spatialement sur toute la surface de l'écoulement. Ces champs de vitesses sont calculés sur base de distances parcourues entre des positions d'objet successives, restituées à une précision de l'ordre de 5 mm, au cours du temps.

**Mots-clés :** photogrammétrie, hydraulique, géométrie épipolaire, modélisation dynamique, surverse, points homologues, automatique

## ABSTRACT

Fluvial dikes failures can cause huge damages in both materials and human levels. Many studies have investigated the mechanism of overflow failure by considering a transverse flow towards the dike and neglecting the longitudinal one. However, the break formation is highly influenced by the longitudinal flow.

The aim of this master thesis is to dynamically model the free flow surface resulting from an overflow dike break in the objective to understand the formation, the erosion and the propagation of the breach.

The research hypothesis posed consists of using the stereoscopic videography coupled with the Direct Linear Transformation (DLT) algorithm and the epipolar geometry to obtain three-dimensional velocity fields based on scattered objects at the free surface of the flow. For this purpose, a module of automatic points detection have been integrated in the photogrammetric restitution process of the DLT in order to acquire dynamic restitution.

This modelling allows to obtain eulerian velocity fields based on the acquisition of FullHD images at a temporal rate sampling of 30 images per second. The most vulnerable part of the breach to erosion has been identified in order to better understand the process of breach propagation.

The developed method therefore offers the advantage of automatically and non-intrusively determining three-dimensional eulerian velocity fields spatially distributed over the entire surface of the flow. These velocity fields are based on distances between successive positions of objects, determined at an accuracy of 5 mm, over time.

**Keywords :** photogrammetry, hydraulic, epipolar geometry, dynamic modelling, overflow, homologous points, automatic

## TABLE DES MATIERES

<b>REMERCIEMENTS .....</b>	<b>2</b>
<b>RESUME.....</b>	<b>3</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>4</b>
<b>LISTE DE FIGURES.....</b>	<b>8</b>
<b>LISTE DE TABLEAUX .....</b>	<b>10</b>
<b>CHAPITRE I : ELEMENTS INTRODUCTIFS .....</b>	<b>11</b>
<b>I. 1. Introduction.....</b>	<b>11</b>
<b>I. 2. Etat de l'art.....</b>	<b>12</b>
I. 2. 1. Photogrammétrie .....	13
I. 2. 2. <i>Direct Linear Transformation (DLT)</i> .....	15
I. 2. 3. Détection de points homologues .....	16
I. 2. 4. <i>Large Scale Particles Images Velocimetry (LSPIV)</i> .....	17
<b>I. 3. Hypothèse de recherche.....</b>	<b>19</b>
<b>I. 4. Environnement de travail.....</b>	<b>19</b>
I. 4. 1. Infrastructures et équipements .....	20
I. 4. 2. Modèle réduit de retenue d'eau .....	21
I. 4. 2. 1. Dimensions.....	21
I. 4. 2. 2. Matériau constitutif.....	21
I. 4. 2. 3. Drainage .....	22
I. 4. 3. Eléments flottants .....	22
I. 4. 4. Dispositif pour disperser les flotteurs .....	23
I. 4. 5. Appareils photographiques .....	24
I. 4. 6. Appareil de mesure .....	26
I. 4. 7. License Matlab .....	26
<b>CHAPITRE II : CODES FOURNIS ET MODIFICATIONS .....</b>	<b>27</b>
<b>II. 1. Introduction .....</b>	<b>27</b>
<b>II. 2. Contexte général.....</b>	<b>27</b>
II. 2. 1. DLT à 16 paramètres.....	27
II. 2. 2. Profilométrie laser .....	28
II. 2. 3. LSPIV .....	28
<b>II. 3. Modifications à apporter .....</b>	<b>29</b>

<b>CHAPITRE III : DEVELOPPEMENTS THEORIQUES.....</b>	<b>31</b>
<b>III. 1. Introduction.....</b>	<b>31</b>
<b>III. 2. Détection et identification des flotteurs .....</b>	<b>31</b>
III. 2. 1. Sélection de la partie traitée sur la première image de chaque vidéo.....	31
III. 2. 2. Détection des flotteurs par classification d'image.....	33
III. 2. 3. Erosion et dilatation des groupes de pixels correspondants aux flotteurs .....	35
III. 2. 4. Identification du centroïde .....	36
III. 2. 5. Cas particuliers.....	36
<b>III. 3. Développement mathématique du modèle géométrique de recherche de points homologues .....</b>	<b>38</b>
III. 3. 1. Théorie de la géométrie épipolaire .....	38
III. 3. 2. Direct Linear Transformation (DLT) .....	39
III. 3. 3. Modèle mathématique dans le cas de 2 images.....	40
III. 3. 3. 1. Développement théorique .....	40
III. 3. 3. 2. Résultats.....	50
III. 3. 4. Modèle mathématique dans le cas de trois images.....	51
III. 3. 4. 1. Développement théorique et résultats.....	51
III. 3. 5. Modèle mathématique dans le cas de quatre images ou plus .....	54
<b>III. 4. Reconstitution 3D .....</b>	<b>54</b>
III. 4. 1. Equations de restitution.....	55
III. 4. 2. Correction de la hauteur d'eau.....	56
<b>III. 5. Aspect dynamique .....</b>	<b>56</b>
III. 5. 1. Synchronisation des vidéos .....	57
III. 5. 1. 1. Erreur de synchronisation liée au nombre d'IPS .....	57
III. 5. 1. 2. Erreur totale de synchronisation entre les vidéos .....	58
III. 5. 2. Suivi des flotteurs .....	58
<b>III. 6. Synthèse .....</b>	<b>59</b>
<b>CHAPITRE IV : APPLICATION .....</b>	<b>61</b>
<b>IV. 1. Introduction.....</b>	<b>61</b>
<b>IV. 2. Mise en place au laboratoire.....</b>	<b>61</b>
IV. 2. 1. Réglages des appareils photos.....	61
IV. 2. 2. Positionnement des appareils photographiques .....	62
IV. 2. 3. Distribution des points de contrôle et de vérification .....	63
<b>IV. 3. Acquisition des coordonnées-monde et image des PC et PV .....</b>	<b>64</b>
IV. 3. 4. Détermination des coordonnées-image .....	64
IV. 3. 5. Détermination des coordonnées-monde .....	64
IV. 3. 5. 1. Instruments .....	64

IV. 3. 5. 2. Levé topographique .....	65
IV. 3. 5. 3. Correction des mesures .....	66
<b>IV. 4. Protocole d'acquisition des données .....</b>	<b>67</b>
<b>IV. 5. Calibration des prises de vue .....</b>	<b>69</b>
IV. 5. 1. Indicateurs de qualité de la calibration .....	69
IV. 5. 2. Résultats .....	69
<b>IV. 6. Résultats et analyses .....</b>	<b>72</b>
IV. 6. 1. Hauteur du plan d'eau .....	72
IV. 6. 2. Restitution 3D .....	74
IV. 6. 2. 1. Résultats .....	74
IV. 6. 2. 2. Sources d'erreurs .....	76
IV. 6. 2. 3. Analyse par surface de tendance .....	79
IV. 6. 3. Trajectoires 3D .....	84
IV. 6. 3. 1. Résultats .....	84
IV. 6. 3. 2. Sources d'erreurs .....	86
IV. 6. 4. Vitesse 3D .....	86
IV. 6. 4. 1. Filtre sur les vitesses .....	86
IV. 6. 4. 2. Résultats .....	88
IV. 6. 4. 3. Interprétations .....	89
<b>CHAPITRE V : CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>90</b>
<b>V. 1. Conclusions .....</b>	<b>90</b>
<b>V. 2. Perspectives .....</b>	<b>91</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>93</b>
<b>Annexes numériques .....</b>	<b>96</b>

## **LISTE DE FIGURES**

FIGURE 1 : CANAL PRINCIPAL DE L'ESSAI AU LABORATOIRE HECE .....	20
FIGURE 2 : VUE D'ENSEMBLE DES INFRASTRUCTURES AU LABORATOIRE HECE .....	21
FIGURE 3 : ESQUISSE 3D DE LA DIGUE. $L_D = 3 \text{ m}$ ; $L_B = 1.05 \text{ m}$ ; $H_D = 0.3 \text{ m}$ ; $L_C = 0.15 \text{ m}$ .....	21
FIGURE 4 : FLOTTEURS DE PÊCHE CAPERLAN - 2.00 g .....	23
FIGURE 5 : DISPOSITIF POUR LÂCHER LES FLOTTEURS .....	24
FIGURE 6 : APPAREILS PHOTOGRAPHIQUES. DE GAUCHE  DROITE : LUMIX GH4, LUMIX FZ82, CANON.....	25
FIGURE 7 : STATION TOTALE LEICA.....	26
FIGURE 8 : STRUCTURE DU PROGRAMME DE BASE APRÈS LES MODIFICATIONS.....	30
FIGURE 9 : EXEMPLE DE DIGITALISATION DU PLAN D'EAU ET DE LA DIGUE  PARTIR DE LA PRISE DE VUE DU CANON.....	32
FIGURE 10 : MASQUE BINAIRE DE LA ZONE SÉLECTIONNÉE PAR L'UTILISATEUR.....	32
FIGURE 11 : IMAGE SUR BASE DE LAQUELLE LES FLOTTEURS SERONT IDENTIFIÉS.....	32
FIGURE 12 : ESPACE COLORIMÉTRIQUE HSV (SOURCE : MATLAB) .....	33
FIGURE 13 : DIAGRAMME CIRCULAIRE DE LA TEINTE EXTRAIT DE L'IMAGE DE RÉFÉRENCE (FIGURE 11). .....	33
FIGURE 14 : HISTOGRAMME DE LA SATURATION EXTRAIT DE L'IMAGE DE RÉFÉRENCE (FIGURE 11). .....	34
FIGURE 15 : HISTOGRAMME DE L'INTENSITÉ EXTRAIT DE L'IMAGE DE RÉFÉRENCE (FIGURE 11). .....	34
FIGURE 16 : MASQUE BINAIRE INITIAL DES FLOTTEURS ORANGES.....	35
FIGURE 17 : MASQUE BINAIRE EROD DES FLOTTEURS ORANGES.....	35
FIGURE 18 : MASQUE BINAIRE DILATÉ DES FLOTTEURS ORANGES.....	35
FIGURE 19 : MASQUE BINAIRE INITIAL DES FLOTTEURS ORANGES MULTIPLIÉ PAR L'IMAGE ORIGINALE.....	35
FIGURE 20 : MASQUE BINAIRE EROD DES FLOTTEURS ORANGES MULTIPLIÉ PAR L'IMAGE ORIGINALE.....	35
FIGURE 21 : MASQUE BINAIRE DILATÉ DES FLOTTEURS ORANGES MULTIPLIÉ PAR L'IMAGE ORIGINALE.....	35
FIGURE 22 : CLASSIFICATION DES FLOTTEURS JAUNE ET IDENTIFICATION DE LEUR CENTROÏDE .....	36
FIGURE 23 : CLASSIFICATION DES FLOTTEURS ORANGE ET IDENTIFICATION DE LEUR CENTROÏDE .....	36
FIGURE 24 : CONFUSION ENTRE DEUX FLOTTEURS DE MÊME COULEUR .....	37
FIGURE 25 : SÉPARATION DU GROUPE DE PIXELS CORRESPONDANT  2 FLOTTEURS CONTIGUS EN DEUX FLOTTEURS DISTINCTS.....	37
FIGURE 26 : ILLUSTRATION DU CONCEPT DE LA GÉOMÉTRIE ÉPIPOLAIRE. (SOURCE : SAVATIER, 2015) .....	38
FIGURE 27 : SITUATION STÉRÉOSCOPIQUE DANS LE CAS DE DEUX IMAGES.....	41
FIGURE 28 : SCHÉMA DE L'IMAGE 2 DANS LE RÉFÉRENTIEL-IMAGE 2 .....	46
FIGURE 29 : SCHÉMA DE L'IMAGE 2 DANS LE RÉFÉRENTIEL-IMAGE 2 .....	47
FIGURE 30 : POINTS D'INTERSECTION DE LA DROITE ÉPIPOLAIRE AVEC LES BORDS L'IMAGE .....	49
FIGURE 31 : FLOTTEUR CIBLÉ DANS LA PREMIÈRE IMAGE (CANON). .....	50
FIGURE 32 : DROITE ÉPIPOLAIRE PASSANT PAR LE FLOTTEUR CIBLÉ  LA FIGURE 31. (LUMIX72) .....	50
FIGURE 33 : DROITE ÉPIPOLAIRE PASSANT PAR LE FLOTTEUR CIBLÉ  LA FIGURE 31. (LUMIXGH4).....	51
FIGURE 34 : IMAGE DE « RÉFÉRENCE » AVEC UN FLOTTEUR IDENTIFIÉ (LUMIX72).....	52
FIGURE 35 : IMAGE « RECEVEUSE » (CANON) CONTENANT LA DROITE ÉPIPOLAIRE DU PIXEL SÉLECTIONNÉ  LA FIGURE 34. ....	52
FIGURE 36 : IMAGE DE « SÉLECTION » (LUMIXGH4) CONTENANT LA DROITE ÉPIPOLAIRE DU PIXEL SÉLECTIONNÉ  LA FIGURE 34. ....	53
FIGURE 37 : CANDIDATS DANS L'IMAGE « SÉLECTION » (LUMIXGH4).....	53
FIGURE 38 : INTERSECTION DES DROITES ÉPIPOLAIRES (CANON) DANS L'IMAGE « RECEVEUSE ». .....	54
FIGURE 39 : ERREUR DE SYNCHRONISATION DU TIMECODE DU CANON PAR RAPPORT AU TIMECODE DE RÉFÉRENCE SUR UNE PÉRIODE D'UNE SECONDE. ....	57

FIGURE 40 : SCHÉMA SYNTHÉTIQUE DES DIFFÉRENTES ÉTAPES DU TRAITEMENT PERMETTANT DE DÉUDIRE LA VITESSE DES FLOTTEURS.....	59
FIGURE 41 : STRUCTURE DU CODE DÉVELOPPÉ COMPRENNANT LES DIFFÉRENTES PARTIES DU SCRIPT PRINCIPAL AINSI QUE LES FONCTIONS RELATIVES À CHAQUE PARTIE DU SCRIPT PRINCIPAL.....	60
FIGURE 42 : CIBLES.....	63
FIGURE 43 : DISPOSITION DES PC ET PV AU TEMPS INITIAL (PRISE DU VUE DU LUMIX 72).....	63
FIGURE 44 : DISPOSITION DES PC ET PV AU TEMPS FINAL (PRISE DU VUE DU LUMIX 72).....	64
FIGURE 45 : MATÉRIEL À DISPOSITION POUR LE LEVÉ TOPOGRAPHIQUE. DE GAUCHE À DROITE : EMBASE, TRÉPIED, STATION TOTALE, ARAIGNÉE .....	65
FIGURE 46 : AXES D'UNE STATION TOTALE (SOURCE : « LEICA ») .....	66
FIGURE 47 : DE GAUCHE À DROITE : ERREUR DE COLLIMATION HORIZONTALE, ERREUR DE TOURILLONNEMENT, ERREUR DE COLLIMATION VERTICALE ET ERREUR DE MISE EN STATION. (SOURCE : « LEICA ») .....	67
FIGURE 48 : RMSE DE CHAQUE POINT DE CALIBRATION ISSU DE LA PRISE DE VUE DU CANON.....	70
FIGURE 49 : RMSE DE CHAQUE POINT DE CALIBRATION ISSU DE LA PRISE DE VUE DU LUMIX72.....	70
FIGURE 50 : RMSE DE CHAQUE POINT DE CALIBRATION ISSU DE LA PRISE DE VUE DU LUMIXGH4.....	71
FIGURE 51 : RMSE DE CHAQUE POINT DE VÉRIFICATION .....	71
FIGURE 52 : EVOLUTION DE LA HAUTEUR D'EAU ADIMENSIONNELLE (DONNÉES : ROUSSEAU, 2018).....	72
FIGURE 53 : IDENTIFICATION DES 3 PÉRIODES DE TEMPS CHOISIES AVEC LEURS DÉBUTS ET LEURS FINS .....	73
FIGURE 54 : RESTITUTION EN PLANIMÉTRIE DES FLOTTEURS DE LA PÉRIODE 1 .....	74
FIGURE 55 : RESTITUTION EN PLANIMÉTRIE DES FLOTTEURS DE LA PÉRIODE 2 .....	74
FIGURE 56 : RESTITUTION EN PLANIMÉTRIE DES FLOTTEURS DE LA PÉRIODE 3 .....	75
FIGURE 57 : RESTITUTION EN ALTIMÉTRIE DES FLOTTEURS DE LA PÉRIODE 1 .....	75
FIGURE 58 : RESTITUTION EN ALTIMÉTRIE DES FLOTTEURS DE LA PÉRIODE 2 .....	75
FIGURE 59 : RESTITUTION EN ALTIMÉTRIE DES FLOTTEURS DE LA PÉRIODE 3 .....	76
FIGURE 60 : REPRÉSENTATION GÉOMÉTRIQUE DE L'ERREUR DE RESTITUTION. .....	77
FIGURE 61 : EXEMPLE D'UNE OCCULTATION LORS DU PASSAGE DANS LA BRÈCHE DE PLUSIEURS FLOTTEURS (LUMIXGH4). 79	
FIGURE 62 : SURFACE DE TENDANCE DE LA PÉRIODE 1 .....	80
FIGURE 63 : SURFACE DE TENDANCE DE LA PÉRIODE 2 .....	80
FIGURE 64 : SURFACE DE TENDANCE DE LA PÉRIODE 3 .....	80
FIGURE 65 : RÉSIDUS PAR RAPPORT À LA SURFACE DE TENDANCE 1.....	81
FIGURE 66 : RÉSIDUS PAR RAPPORT À LA SURFACE DE TENDANCE 2.....	81
FIGURE 67 : RÉSIDUS PAR RAPPORT À LA SURFACE DE TENDANCE 3.....	81
FIGURE 68 : HISTOGRAMME DES RÉSIDUS PAR RAPPORT À LA SURFACE DE TENDANCE DE LA PÉRIODE 1.....	82
FIGURE 69 : HISTOGRAMME DES RÉSIDUS PAR RAPPORT À LA SURFACE DE TENDANCE DE LA PÉRIODE 2.....	82
FIGURE 70 : HISTOGRAMME DES RÉSIDUS PAR RAPPORT À LA SURFACE DE TENDANCE DE LA PÉRIODE 3 .....	82
FIGURE 71 : POSITIONS SUCCESSIVES D'UN FLOTTEUR EN ALTIMÉTRIE ET AJUSTEMENT DE CES POSITIONS PAR SPLINES CUBIQUES.....	84
FIGURE 72 : TRAJECTOIRES EN PLANIMÉTRIE DES FLOTTEURS DE LA PÉRIODE 1.....	84
FIGURE 73 : TRAJECTOIRES EN PLANIMÉTRIE DES FLOTTEURS DE LA PÉRIODE 2.....	85
FIGURE 74 : TRAJECTOIRES EN PLANIMÉTRIE DES FLOTTEURS DE LA PÉRIODE 3 .....	85
FIGURE 75 : BOÎTE À MOUSTACHES DE LA PÉRIODE 2.....	86
FIGURE 76 : BOÎTE À MOUSTACHES DE LA PÉRIODE 3 .....	87
FIGURE 77 : CHAMPS DE VITESSE EULÉRIENS DES FLOTTEURS DE LA PÉRIODE 1.....	88
FIGURE 78 : CHAMPS DE VITESSE EULÉRIENS DES FLOTTEURS DE LA PÉRIODE 2.....	88
FIGURE 79 : CHAMPS DE VITESSE EULÉRIENS DES FLOTTEURS DE LA PÉRIODE 3 .....	89

## LISTE DE TABLEAUX

TABLEAU 1 : PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DU MATÉRIAUX .....	22
TABLEAU 2 : CARACTÉRISTIQUES DES APPAREILS PHOTOGRAPHIQUES (SOURCE : « PANASONIC » « CANON ») .....	24
TABLEAU 3 : EXEMPLES DE VALEURS SEUIL DE LA TEINTE, DE LA SATURATION ET DE L'INTENSITÉ PERMETTANT D'IDENTIFIER LES FLOTTEURS.....	34
TABLEAU 4 : VALEURS CRITIQUES DE L'AIRE ET DE L'EXCENTRICITÉ À PARTIR DESQUELLES UN GROUPE DE PIXELS EST RECONNNU COMME CORRESPONDANT À DEUX FLOTTEURS CONTIGUS.....	37
TABLEAU 5 : FACTEURS D'ÉCHELLE DES TROIS APPAREILS PHOTOGRAPHIQUES .....	44
TABLEAU 6 : LONGUEURS EN MM DES BORDS DE L'IMAGE 2 RECALCULÉES SUR BASE DES COORDONNÉES MONDE OBTENUES PAR LE MODÈLE GÉOMÉTRIQUE IMPLÉMENTÉ.....	48
TABLEAU 7 : LONGUEURS EN PIXELS DES BORDS DE L'IMAGE 2 RECALCULÉES SUR BASE DES COORDONNÉES MONDE OBTENUES PAR LE MODÈLE GÉOMÉTRIQUE IMPLÉMENTÉ.....	49
TABLEAU 8 : SYNCHRONISATION DES VIDÉOS .....	58
TABLEAU 9 : RÉGLAGES DES DIFFÉRENTS APPAREILS PHOTOGRAPHIQUES.....	62
TABLEAU 10 : NOMBRES DE CIBLES .....	63
TABLEAU 11 : IDENTIFICATION DE L'INTERVALLE DE VARIATION DE LA HAUTEUR DU PLAN D'EAU POUR LES 3 PÉRIODES DE TEMPS SÉLECTIONNÉES.....	73
TABLEAU 12 : ANALYSE STATISTIQUE DES RÉSIDUS PAR RAPPORT AUX TROIS SURFACES DE TENDANCE. LES RÉSULTATS SONT EXPRIMÉS EN MÈTRES.....	83
TABLEAU 13 : BOITE À MOUSTACHES DES VITESSES DE LA PÉRIODE 2 ET 3.....	87

# CHAPITRE I : ELEMENTS INTRODUCTIFS

## I. 1. Introduction

Les ruptures de digues fluviales engendrent des dégâts matériels considérables et la perte de nombreuses vies humaines lors des phénomènes de crues en Europe et dans le monde. La surverse a été identifiée comme une des principales causes de rupture (Vorogushyn *et al.* 2010 ; Fry *et al.* 2012). Elle se produit principalement si le débit de la rivière dépasse la valeur de conception de la digue pendant une inondation, si le niveau d'eau dépasse la crête ou encore si le flux d'écoulement franchit un segment plus faible de la digue (Rifai *et al.* 2017). A l'avenir, ces scénarios risquent de se produire régulièrement car les évènements hydrologiques extrêmes auront une occurrence plus fréquente (Madsen *et al.* 2014 ; IPCC, 2014).

Une modélisation 3D précise et non-intrusive de l'évolution de la brèche est indispensable à la compréhension et la prévision des processus d'érosion qui restent à ce jour relativement mal connus. En outre, des prédictions précises de la géométrie de la brèche et de l'hydrogramme d'écoulement sont importantes pour estimer l'étendue de l'inondation, planifier des plans d'évacuation et concevoir des contre-mesures (Rifai *et al.* 2017).

L'objectif de notre travail de fin d'étude est donc de contribuer à une modélisation 3D précise en s'inscrivant dans la continuité du mémoire de Liénart (2015), étudiant issu de la filière géomatique et géométrologie de l'ULiège (Université de Liège). Ce mémoire avait pour objectif d'implémenter l'algorithme photogrammétrique de la *Direct Linear Transformation* (DLT) afin de restituer de manière tridimensionnelle un modèle réduit d'une retenue d'eau. Au final, le travail a premièrement produit un protocole d'acquisition des données en mode statique. Ensuite, un programme a été implémenté sous Matlab. Il permet de calibrer les prises de vue en prenant également en compte les distorsions optiques engendrées par l'objectif d'un appareil photo, de les positionner et de les orienter, et, enfin de calculer la position 3D de points homologues positionné dans un minimum de 2 prises de vue d'une même scène depuis des points de vues différents. Ainsi, le résultat du script développé est une restitution de la position tridimensionnelle d'une scène à partir de pixels homologues digitalisés sur différentes prises de vue. Cependant dans le travail de Liénart (2015), la recherche de points homologues s'est limitée à une détection visuelle et une digitalisation manuelle par l'utilisateur. Cette intervention de l'opérateur rend évidemment impossible une restitution 3D complète de la scène. Par ailleurs, l'aspect dynamique de l'ouverture de la brèche n'avait pas été considéré par Liénart (2015).

Dès lors, le but de notre mémoire est de reprendre le travail effectué en généralisant la recherche de points homologues. Une fois cette étape automatisée, le protocole dynamique d'acquisition et de traitement a aussi été envisagé pour un Modèle Numérique Dynamique de Surface (MNDS) sur base d'échantillonnage d'objets flottants disséminés à la surface du plan d'eau. L'utilisation d'objets flottants est en effet indispensable car l'aspect textural de l'image de la surface du plan d'eau est très variable d'un point de vue à l'autre en raison de la variation de la configuration géométrique des plans et angles de phases et de la réflexion spéculaire de la lumière sur le plan d'eau, même en condition d'éclairement diffus. De plus, les trajectoires 3D de ces objets flottants permettront d'extraire des

champs de vitesse de l'écoulement lors de la rupture de la retenue d'eau. Toutes les expériences menées dans le cadre de ce mémoire seront réalisées au laboratoire *Hydraulics in Environmental and Civil Engineering* (HECE) de l'ULg qui dispose de modèles réduits d'ouvrages hydrauliques et d'équipements nécessaires à la réalisation d'études hydrauliques. C'est d'ailleurs le laboratoire HECE qui nous a proposé ce sujet de mémoire et son cahier des charges initial.

Notre projet de fin d'études s'articule donc autour de la question de recherche suivante :

**« Quel protocole photogrammétrique permet de restituer un modèle numérique dynamique de la surface libre d'un écoulement résultant d'une rupture d'un modèle réduit de digue en utilisant des appareils vidéographiques ? »**

## I. 2. Etat de l'art

Les barrages sont des ouvrages hydrauliques construits au travers d'un cours d'eau pour répondre aux besoins spécifiques de la population environnante. D'après les publications les plus récentes du Registre Mondial des Grands Barrages, l'irrigation est de loin la raison la plus courante pour construire des barrages (CIGB). Cependant, ils peuvent également être destinés à réguler le débit d'un cours d'eau et donc à contrôler les crues, à la production d'énergie hydro-électrique, à la navigation fluviale,... Les trois formes les plus courantes de barrage sont : les barrages-poids, les barrages-voûtes et les barrages à contreforts. Quand un barrage est construit en terre, en sable ou en enrochements, il porte le nom de digue ou de barrage en remblai. Dans tous les cas, les barrages créent une retenue d'eau qui sollicite la structure de l'ouvrage.

Les données statistiques ont montré que la surverse est la première cause de rupture de ces barrages (Foster *et al.* 2000 ; Fry *et al.* 2012). La plupart des expériences de rupture de digue par surverse en laboratoire ont pour but d'étudier le mécanisme de rupture par flux perpendiculaire à l'axe de la digue en négligeant le flux parallèle. Cependant, le flux dans un champ proche de la brèche est fortement influencé par un flux parallèle (Michelazzo *et al.* 2015). Une reconstitution dynamique 3D précise et non-intrusive de la géométrie de la brèche lors du phénomène de surverse permet d'améliorer la compréhension de ce mécanisme de rupture. Plusieurs méthodes de reconstitution ont dès lors été développées. Rifai *et al.* (2015) ont identifié certaines de ces techniques : la profilométrie laser (Spinewine *et al.* 2004), la projection de franges sur le corps d'un ouvrage (Pickert *et al.* 2011) et la stéréoscopie 3D (Schmocke, 2011 ; Frank et Hager, 2015).

La précision des reconstitutions 3D est en lien avec la capacité à caractériser précisément la variation temporelle et spatiale du plan d'eau. De nombreuses approches ont été tentées afin d'estimer les hauteurs d'eau en utilisant des capteurs acoustiques (Boon *et al.* 2008), la mesure ponctuelle de la hauteur d'eau dans un canal transparent (Schmocke et Hager, 2009) et l'utilisation de capteurs de pression (Rubinato *et al.* 2015). Cependant, ces techniques sont limitées par leur résolution spatiale.

D'autres recherches se sont portées sur la reconstitution 3D dynamique de la surface libre d'un écoulement. Santel *et al.* (2004) et Vries *et al.* (2010) ont exploité la stéréophotogrammétrie en utilisant des méthodes de corrélation d'image pour détecter les points homologues et générer un Modèle Numérique de Surface (MNS). Les auteurs ont notamment mis en évidence l'importance de

l'illumination et de la texture du plan d'eau. Han et Endreny (2014) ont réussi, à l'aide de caméras synchronisées, à extraire un MNS automatiquement à l'aide d'une fine poudre de particules dispersée à la surface de l'eau. Plus récemment, Nichols et Rubinato (2016) ont employés un capteur Kinect initialement créé pour mesurer et interpréter des gestes humains en 3D dans la technologie de jeux vidéo. La difficulté dans l'utilisation de cette technique réside dans le fait que la lumière infrarouge exploitée par le capteur Kinect passe au travers du plan d'eau car celui-ci n'est pas opaque. Dès lors, pour toutes les expériences menées, l'eau est colorée pour augmenter son coefficient de diffusion et son coefficient d'absorption de la lumière. Ainsi, la surface de l'eau s'apparente à une surface opaque. Ferraira *et al.* (2017) ont restitué la surface libre à une résolution spatiale très fine en appliquant deux algorithmes photogrammétriques à travers l'application photogrammétrique, Structure-from-Motion et Multi-view Stereo (SfM et MVS). L'algorithme SfM détecte des points homologues sur plusieurs images 2D et reconstruit en 3D la scène observée. Associé à l'algorithme MVS, la densité des points du modèle 3D est augmentée grâce au nombre plus élevé de prises de vue.

Notre projet de fin d'études s'orientera donc vers la modélisation dynamique de la surface d'un plan d'eau en produisant un MNDS. Initiée à la photogrammétrie lors de mon cursus universitaire, cette technique sera privilégiée pour la modélisation. La lasergrammétrie offre également une alternative intéressante mais cette technique ne sera pas envisagée dans le cadre de notre recherche.

Ainsi, nous exposons dans les 4 sections suivantes, l'état de l'art sur les différents aspects généraux de la photogrammétrie, sur deux aspects spécifiques de la photogrammétrie, la DLT et la recherche de points homologues, et, enfin, sur le calcul de champs de vitesses qui doit constituer un output du MNDS demandé par le laboratoire HECE.

## I. 2. 1. Photogrammétrie

On peut définir la photogrammétrie comme un ensemble de techniques de mesures permettant la reconstruction 3D d'objets de l'espace en utilisant des photographies ou images numériques 2D (Egels et Kasser, 2002). Cette technique de restitution est basée sur le principe de la vision binoculaire et de la stéréoscopie. Ce concept exploite la faculté à percevoir le relief à partir de deux images planes d'un objet, prise de deux points de vue différents. C'est ce que nous faisons quotidiennement grâce à nos yeux, qui, jusqu'à une certaine distance, assez limitée en raison de la base d'observation réduite (la distance entre les yeux étant en moyenne de 65 mm), nous permettent de percevoir les distances relatives nous séparant des différents objets présents dans notre champ d'observation binoculaire.

Le processus photogrammétrique est composé de plusieurs étapes (Collignon, 2014) :

- *L'orientation interne* dont le but est de reconstituer les gerbes de rayons perspectifs des prises de vue en éliminant les différentes sources de non colinéarité produites par le système de lentilles et en assurant la cohérence géométrique du négatif ou du capteur numérique. L'objectif de cette étape est de vérifier la condition de colinéarité de tous les éléments de l'objet photographié, du centre optique de l'appareil de prise de vue et de l'image de cet objet.
- *L'orientation extérieure* qui, en photogrammétrie traditionnelle, consiste en deux opérations, *l'orientation relative* et *l'orientation absolue*.

- L'*orientation relative* consiste à replacer les gerbes de rayons perspectifs dans des positions et orientations relatives similaires à celles des prises de vues réalisées. L'objectif de cette opération est de supprimer la parallaxe transversale et de satisfaire la condition fondamentale de coplanéité. Le modèle stéréoscopique ainsi formé a une échelle quelconque exprimée relativement à une des 3 composantes de la base.
- L'*orientation absolue* permet de mettre à l'échelle et d'orienter le modèle stéréoscopique dans un système de référence choisi. Les facteurs obtenus lors de cette étape sont trois paramètres de translation, trois paramètres de rotation et un ou trois paramètres de mise à l'échelle.

L'orientation interne est réalisée à partir des paramètres caractéristiques métriques intrinsèques de la caméra et de son système optique : les *dimensions* du négatif ou du capteur numérique et le *référentiel métrique* lui correspondant, la position du *point principal* dans ce référentiel, la *focale* et les *distorsions radiales* et *tangentielles* produites par le système optique. La connaissance de ces différents éléments permet de calibrer chaque prise de vue considérée individuellement. Deux types de caméras peuvent être utilisées pour la photogrammétrie : les *caméras métriques* et les *caméras non-métriques* (Zhang *et al.* 2016). Généralement, les caméras métriques ont une orientation interne stable, référencée par l'intermédiaire de marques fiduciaires dont les paramètres internes demeurent constants et sont renseignés dans des certificats de calibration (Karara et Faig, 1980). Cependant, elles sont relativement coûteuses. Dans notre recherche, le choix des appareils d'acquisition s'est donc porté sur des caméras amateurs, non-métriques et numériques. Depuis les années 2000, la résolution de ces caméras n'a cessé de croître ce qui a, dès lors, permis de les utiliser pour la photogrammétrie. Cependant, l'inconvénient dans leur utilisation reste l'absence de marques fiduciaires, des paramètres d'orientation internes inconnus et instables (Ruzgiené, 2005).

Une extension de la photogrammétrie est *la vidéographie en stéréoscopie*. Par définition, il s'agit d'une technique qui permet de calculer les coordonnées 3D d'un objet en fonction du temps à partir d'une séquence d'images (Black *et al.* 2003). La différence majeure avec la photogrammétrie traditionnelle réside dans le fait qu'une série de points de contrôles doivent être suivis de manière continue pendant l'acquisition des données pour obtenir un aspect dynamique de l'objet filmé. Cette technique sera donc employée pour reconstituer un MNS dynamique.

Une extension des méthodes de restitution est l'*aérotriangulation* qui permet de restituer la position d'un bloc de clichés à partir de points communs entre chaque cliché. L'ajustement par faisceaux ou *bundle adjustment*, largement utilisée dans les logiciels de photogrammétrie, permet de réaliser cette opération. Cette méthode calcule simultanément les paramètres d'orientation internes et externes d'un ensemble d'images sur base des coordonnées mondes des points observés (Blonquist et Pack, 2011). Les logiciels photogrammétriques adoptant cette méthode sont nombreux tels que Pix 4D Mapper, Agisoft Photoscan, Correlator3D, Bentley Context Capture... L'inconvénient de la plupart des logiciels commerciaux photogrammétrique est le manque de transparence des calculs qu'ils effectuent, de même que le problème mathématique résolu en amont (Börlin et Grussenmeyer, 2016).

Dans le but d'utiliser les observations d'images synchrones enregistrées par plusieurs caméras depuis différentes points de vue, la position relative, l'orientation des caméras (paramètres externes), la focale et le point principal et les distorsions produites par l'optique de la caméra (paramètres internes) doivent être donnés (Theriault *et al.* 2014). Ces paramètres peuvent être estimés par des méthodes de

calibration. Une méthode photogrammétrique appelée *Direct Linear Transformation* (DLT) permet d'estimer ces paramètres dans un processus intégré de traitements photogrammétrique.

### I. 2. 2. Direct Linear Transformation (DLT)

La DLT est une méthode de calibration introduite par Abdel-Aziz en 1971. Elle est largement exploitée aujourd'hui par la communauté scientifique.

Cette méthode et ses versions enrichies (Hatze, 1988 ; Gazzani, 1993) permettent la détermination de coordonnée 3D d'un point à partir de deux ou plusieurs prises de vue de ce point (P. Pourcelot *et al.* 2000). Comparée à d'autres méthodes de calibration, celle-ci possède une forme mathématique relativement simple, une relative flexibilité dans la configuration géométrique de différentes positions et orientations des caméras et une bonne précision. Un autre avantage réside dans le fait que des caméras additionnelles peuvent facilement être incorporées dans le développement mathématique (Challis et Kerwin, 1992).

La DLT est composée de 2 étapes :

- Une *étape de calibration* dans laquelle les paramètres internes et les positions et orientations de chaque caméra sont représentés par 11 coefficients, qui définissent la transformation linéaire entre les dimensions 3D d'un objet et les dimensions 2D dans le plan de chaque image (Chen *et al.* 1994). Cette étape nécessite au préalable 2 clichés depuis des points de vues différents réalisé par une même caméra ou des caméras différentes et un minimum de 6 points de contrôle connus en coordonnées-image et en coordonnées-monde et suffisamment dispersés en distance vis-à-vis du point de station des caméras.
- Une *étape de restitution* qui utilise les coefficients déterminés à l'étape de calibration. Les coordonnées-image d'un point dans tous les clichés doivent être connues. Cette étape de restitution exploite l'ensemble des équations de colinéarité écrites pour un point donné vu depuis les différents points de vue. Un grand nombre de points de vue (plus de 2) produit un système d'équations surdéterminé permettant une résolution par moindres carrés et le calcul d'une incertitude sur les coordonnées-monde estimées.

Ainsi, la qualité de la restitution par la DLT est influencée par différents facteurs (Kwon, 1998 ; Chen *et al.* 1994 ; Liénart, 2015) :

- Le nombre de caméras utilisées lors de l'expérience puisque l'étape de restitution est effectuée par la résolution d'un système d'équations par moindres carrés. De ce fait, la redondance d'information est utilisée pour affiner la précision de la restitution.
- Le nombre de points de contrôle pour calibrer l'ensemble des prises de vue est également déterminant. Il a été démontré que plus de 20 points de contrôle n'améliorent plus la qualité de la restitution.
- Une distribution homogène de ces points de contrôle sur l'entièreté de la scène.
- Un volume de calibration englobant spatialement et temporellement les points à restituer si l'expérience se veut dynamique.

Les recherches expérimentales ont montré la présence d'erreurs systématiques, appelées erreurs de distorsions optiques, dues au système de lentilles. Dès lors, des versions améliorées de la DLT à 16 paramètres ont vu le jour par l'addition de 5 paramètres additionnels aux 11 paramètres standards. La conséquence directe de ces nouveaux paramètres est la nécessité de disposer non plus de 6 mais de 8 points de contrôle minimum nécessaire à l'étape de la calibration.

### I. 2. 3. Détection de points homologues

L'étape de restitution de la DLT est appliquée à une série de points homologues afin d'obtenir un modèle 3D. Ces points visibles sur plusieurs images doivent idéalement être représentatifs de complexité morphologique de la scène photographié. La recherche de ces points homologues revient à sélectionner un pixel sur une image et à identifier l'image du même objet dans les clichés issus des différentes prises de vue. Cette étape peut se réaliser manuellement mais représente un travail fastidieux. Pour pallier cette recherche manuelle fastidieuse de points homologues, de nombreux algorithmes ont été développés. Parmi ceux-ci, les algorithmes les plus courants en photogrammétrie sont les méthodes SIFT, SURF, le calcul de droites épipolaires détaillées ci-dessous.

Les *méthodes SIFT (Scale Invariant Feature Transform)* et *SURF (Speeded Up Robust Features)* sont largement employées aujourd'hui pour la recherche de points homologues par les logiciels photogrammétriques.

La *méthode SIFT* proposée par Lowe (2004) est composée de trois étapes successives :

- Premièrement, le contenu de l'image est analysé. Les points caractéristiques délimitant un objet sont détectés et leurs coordonnées enregistrées. Ces points sont appelés les points d'intérêt.
- Deuxièmement, chaque point d'intérêt obtient une orientation du gradient local dominant et un vecteur caractérisant le voisinage local. Le but est de pouvoir comparer des images prises de points de vue différents, à des échelles et à des luminosités différentes. Cette opération s'appelle la description des points d'intérêt.
- Troisièmement, les vecteurs décrivant les points d'intérêt reconnus à l'étape précédente sur chaque image sont comparés et les points de chaque image présentant les vecteurs les plus similaires sont appariés.

La *méthode SURF* (Bay *et al.* 2006) utilise une approche analogue à la méthode SIFT mais elle est plus performante en terme de rapidité.

La *géométrie épipolaire* développée par Longuet-Higgins en 1981 permet d'établir une relation géométrique entre deux images d'une même scène. En effet, pour un couple stéréoscopique, un point P situé dans une image aura son point homologue P' dans une seconde image le long d'une droite appelée la droite épipolaire qui est l'intersection entre le plan de la seconde image et le plan constitué par la base et le rayon lumineux joignant le centre optique de la première image au point considéré dans cette même image (condition de coplanéité). Par ailleurs, une orientation interne parfaite doit

assurer la colinéarité du centre optique, de l'objet et de son image dans chaque cliché. Etant donné que les différentes opérations d'orientation interne et externe ne sont pas parfaites, il convient d'adopter une zone tampon de tolérance de part et d'autre de la droite épipolaire. Ainsi, la zone de recherche du point homologue devient une bande étroite dans l'image (Maas, 1997). L'utilisation d'une troisième caméra placée en un troisième point de vue permet de restreindre cette zone de recherche. Cette configuration permet de calculer l'intersection des droites épipolaires ce qui correspond à réduire le domaine de recherche en passant d'une ligne plus sa tolérance à une intersection de deux lignes plus leur tolérance (Maas, 1992).

L'intégration des résultats des méthodes *SIFT* ou autres méthodes couplées à l'utilisation de la géométrie épipolaire peut significativement réduire le temps de calcul, les erreurs de correspondance et par conséquent augmenter la précision (Reiterer *et al.* 2010).

Les erreurs de correspondance entre points homologues peuvent avoir différentes origines (Gales, 2007) :

- Le *bruit* présent dans les images notamment occasionné par une sensibilité ISO trop élevée.
- Les *occultations* qui résultent du fait que les clichés sont réalisés depuis des stations différentes.
- La *discontinuité de profondeur* qui a pour effet de modifier sensiblement le voisinage du pixel considéré.
- Les *zones homogènes*, peu texturées, où les niveaux de gris des pixels voisins sont sensiblement identiques. Cette source d'erreur est importante dans le cas de méthode de corrélation basée sur le voisinage du pixel courant considéré.
- Les *raccourcissements* qui proviennent d'un objet fortement incliné dans un cliché. Plusieurs pixels d'une image peuvent alors être représentés par un seul pixel dans une autre image.

#### I. 2. 4. Large Scale Particles Images Velocimetry (LSPIV)

La vitesse d'écoulement est généralement mesurée par des méthodes intrusives, telles que les moulinets hydrométriques, ou par des méthodes quasi-intrusives, telles que les instruments acoustiques (*Acoustic Doppler Velocimeter* et *Acoustic Doppler Current Profiler*). L'inconvénient de ces techniques est leur limitation à un seul point de mesure, par conséquent la vitesse n'est obtenue que localement et en perturbant le flux initial (Bung et Valero, 2016). Une approche alternative peut être basée sur le traitement d'image. Les images offrent des observations non-intrusives et, potentiellement, spatialement distribuées de la vitesse d'écoulement à une haute résolution temporelle (Tauro *et al.* 2017). Elles permettent donc d'effectuer des mesures de champ plutôt que des mesures ponctuelles de vitesse.

La technique *Large Scale Particles Images Velocimetry* (LSPIV) est une approche image beaucoup moins onéreuse à déployer que les techniques acoustiques grâce à l'apparition des enregistrements vidéo de qualité et à l'augmentation de la puissance des ordinateurs (Lewis *et al.* 2015). Elle permet de mesurer les vitesses de surface d'un écoulement par analyse séquentielle d'images (Hauet *et al.* 2015). De manière pratique, cette technique permet de déterminer instantanément la vitesse en enregistrant et en analysant le mouvement d'un groupe de particules en mouvement avec l'écoulement. La vitesse de

surface est mesurée en identifiant la distance de déplacement des particules en mouvement et en la divisant par l'intervalle de temps parcouru entre deux images successives (Sutarto *et al.* 2015).

Cette méthode est une extension de la vélocimétrie par image de particules (PIV) introduite pour la première fois en 1998 par Fujita *et al.*

Il s'agit d'une technique de mesure de vitesse essentiellement non-intrusive qui quantifie le mouvement de petites particules illuminées à la surface du plan d'eau (Muste *et al.* 2014). L'illumination de ces particules est réalisée à l'aide de fortes sources lumineuses, typiquement des sources lasers. La vitesse est obtenue en utilisant des algorithmes de reconnaissance de *pattern* (reconnaissance de formes ou de motifs) basés sur des méthodes statistiques qui permettent de suivre le mouvement du pattern de l'image originale dans une série d'images enregistrées à des intervalles de temps connus (Muste *et al.* 2014). Les algorithmes sont basés sur des méthodes de corrélation 2D :

- L'autocorrélation spatiale est traditionnellement utilisée pour des images de forte intensité. Cet algorithme analyse la corrélation d'une image enregistrée à une copie identique et qui a été déplacée d'une distance inconnue (Fujita *et al.* 1998)
- La cross-corrélation est quant à elle couramment utilisée pour des images de faible intensité. Cette technique calcule un coefficient de corrélation à l'aide d'une fenêtre d'interrogation dans la première image et d'une zone d'interrogation dans la seconde image. La particule dans la deuxième image possédant le coefficient maximum de cross-corrélation est sélectionnée comme candidate (Fujita *et al.* 1998).

Les principales différences entre la méthode PVI et la méthode LSPIV résident dans la superficie couvertes par les images, la taille et les caractéristiques des traceurs utilisés à la surface du plan d'eau. En effet, dans le cas de la méthode PVI les traceurs utilisés ont une taille de l'ordre du micron et les expériences sont menées en laboratoire. L'algorithme LSPIV traite des images couvrant une superficie plus importante et les conditions d'éclairement se font à la lumière naturelle. Une complexité s'ajoute par le fait que les traceurs sont imaginés par des prises de vues obliques, ce qui induit des distorsions dans l'image dues aux effets perspectifs. Par conséquent, une première étape d'orthorectification est nécessaire à l'algorithme LSPIV.

Des études précédentes ont démontré que les erreurs de mesure liées à la technique LSPIV sont de l'ordre de 3.5 – 5 % en conditions de laboratoires et de 5 – 15% dans les rivières. Elles dépendent du site et des conditions au moment des mesures (Kim *et al.* 2006). D'autres études qui avaient pour objectif d'améliorer la technique ont démontré qu'un angle de prise de vue de moins de 10 degrés doit être évité sinon l'orthorectification des images induit des erreurs (Kim *et al.* 2006 ; Hauet *et al.* 2008 ; Legout *et al.* 2010). Différentes sources d'erreur ont également été identifiées par Kim *et al.* (2006) et classées par ordre croissant d'importance : la densité de la dissémination des particules sur la zone observée par la caméra, l'identification des points de contrôle permettant l'orthorectification, la précision du suivi du mouvement des particules et l'échantillonnage de temps.

### I. 3. Hypothèse de recherche

A la lumière de cet état de l'art bibliographique et de la question de recherche posée précédemment, l'hypothèse de travail à vérifier est donc la suivante :

**« La vidéographie en stéréoscopie couplée aux algorithmes de la *Direct Linear Transformation (DLT)* et la recherche de points homologues en géométrie épipolaire permet une restitution précise d'un Modèle Numérique Dynamique de Surface (MNDS) représentant la surface libre de l'écoulement résultant d'une rupture de digue simulée à l'aide d'un modèle réduit. Cette restitution à partir des acquisitions vidéo Haute Définition (HD) au rythme de 60 *Frames Per Second (FPS)* associée à l'algorithme *Large Scale Particule Image Velocimetry (LSPIV)* rendra aussi possible le calcul de champ de vitesses de l'écoulement. »**

Chaque terme qui compose cette hypothèse est décrit ci-dessous :

La *vidéographie en stéréoscopie* consiste à appliquer le principe de la photogrammétrie en utilisant comme outils d'acquisition des appareils vidéographiques.

La *Direct Linear Transformation* est un algorithme qui permet de calibrer les prises du vues ainsi que de restituer en trois dimensions les objets d'une scène photographiée.

Un *Modèle Numérique Dynamique de Surface* est une reconstitution en trois dimensions de la surface du plan d'eau sur base d'échantillonnage d'objets disséminés à la surface de l'écoulement. L'aspect dynamique associé à ce modèle numérique se traduit par la variation de position à chaque instant de ces objets et par l'évolution du chenal dans lequel l'écoulement se produit.

Un *modèle réduit d'une rupture de digue* représente une structure de retenue d'eau, en l'occurrence une digue, à échelle réduite. La rupture de cet ouvrage est effectuée de manière contrôlée en laboratoire.

Une *vidéo HD au rythme de 60 FPS* représente une acquisition continue de 60 images par seconde ayant une définition d'au moins 1280 par 720 pixels.

La *Large Scale Particule Image Velocimetry* est une méthode non-intrusive qui permet de déterminer les champs de vitesse à la surface libre d'un écoulement par analyse séquentielle d'image sur base d'objets disséminés sur le plan d'eau.

Les *champs de vitesses de l'écoulement* signifient que chaque point de l'écoulement, constituant le modèle numérique de surface, est associé à une valeur de vitesse.

### I. 4. Environnement de travail

Différents éléments sont nécessaires à la réalisation de ce mémoire. Il s'agit des infrastructures et équipement mis à notre disposition, du modèle réduit de retenue d'eau, des éléments flottants dispersés à la surface de l'eau, du dispositif conçu pour disperser les flotteurs, des caméras, de l'instrument de mesures pour réaliser le levé topographique de référence et, enfin, du logiciel utilisé

pour l'implémentation des différentes étapes photogrammétriques. Chacun de ces éléments sont décrits dans les sections suivantes.

#### I. 4. 1. Infrastructures et équipements

Les tests hydrauliques réalisés pour ce travail ont été menés au laboratoire HECE de l'Université de Liège. Ce laboratoire dispose des infrastructures et des équipements nécessaires pour mener à bien des études expérimentales sur des modèles d'ouvrages hydrauliques à échelle réduite.

Les infrastructures utilisées sont un canal principal rectiligne de 10 m de long et de 1 m de large avec une ouverture de 3 m sur un des côtés (figure 1). Cette ouverture débouche sur une plateforme de 4.3 m sur 2.5 m (figure 2). Cette ouverture est fermée par un modèle réduit de retenue d'eau, en l'occurrence une digue. Cette configuration va permettre de provoquer la rupture de l'ouvrage par flux transversal. L'ensemble du modèle est également surélevé de 0.7 m pour évacuer de manière efficace l'eau qui passe à travers la brèche et récupérer le matériel érodé lors de la déverse et de l'incision dans la digue.



Figure 1 : Canal principal de l'essai au laboratoire HECE

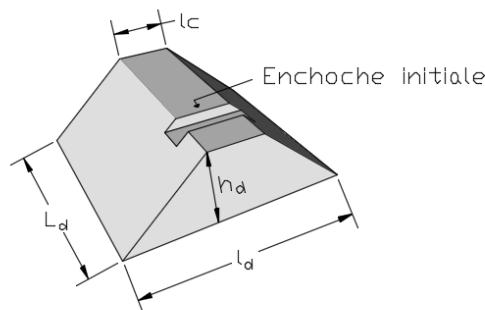


*Figure 2 : Vue d'ensemble des infrastructures au laboratoire HECE*

## I. 4. 2. Modèle réduit de retenue d'eau

### I. 4. 2. 1. Dimensions

Une digue de forme trapézoïdale est construite dans l'ouverture du canal principal. Les dimensions de l'édifice sont reprises à la figure 3.



*Figure 3 : Esquisse 3D de la digue.  $L_d = 3 \text{ m}$  ;  $l_d = 1.05 \text{ m}$  ;  $h_d = 0.3 \text{ m}$  ;  $l_c = 0.15 \text{ m}$*

Une encoche initiale de 0.02 m de profondeur et de 0.1 m de large est effectuée dans la crête à 0.55 m  partir de l'extrémité amont de la digue. Cette incision permettra de provoquer le mécanisme de déverse et de formation de la brèche lorsque le niveau d'eau augmentera dans le canal principal et submergera l'encoche initiale. Les pentes de la digue ont une inclinaison de 1 m sur 1.5 m (V:H).

### I. 4. 2. 2. Matériaux constitutifs

Schmocker et Hager (2012) ont recommandé un matériaux dont la granulométrie est caractérisée par un diamètre médian compris entre 1 et 5.5 mm pour des tests d'érosion afin de prévenir une infiltration excessive et les effets d'échelle. La digue est donc constituée de sable homogène. Ce

matériau peut être réutilisé pour des expériences ultérieures. Les propriétés du matériau sont reprises dans le tableau 1.

*Tableau 1 : Propriétés physiques du matériau*

	<b>SABLE</b>
<b>DIAMÈTRE MÉDIAN (MM)</b>	1
<b>DENSITÉ (KG/M<sup>3</sup>)</b>	2.6
<b>DENSITÉ APPARENTE (KG/M<sup>3</sup>)</b>	1.6
<b>POROSITÉ (-)</b>	0.37
<b>ANGLE DE FROTTEMENT SEC (°)</b>	28
<b>ANGLE DE FROTTEMENT HUMIDE (°)</b>	55

#### I. 4. 2. 3. Drainage

Un système de drainage, composé d'une couche de géotextile de 4 cm d'épaisseur, est installé sous la digue. Ce dispositif placé sur une grille permet d'assurer la stabilité de la digue en évacuant l'écoulement d'infiltration. Ce flux d'eau est par la suite récolté dans un réservoir sous la membrane et évacué.

#### I. 4. 3. Eléments flottants

Le choix des éléments flottants est primordial car le MNDS sera reconstitué sur base d'échantillonnage de ces objets dispersés sur le plan d'eau. Dès lors, plusieurs critères ont été identifiés afin de choisir les éléments les plus adéquats à l'expérience :

- Le premier critère indispensable est *la flottabilité*. En effet, les éléments doivent flotter à la surface de l'eau pour pouvoir être visibles sur les images lors du traitement et représenter un échantillonnage à la surface ou quelques millimètres au-dessus de la surface en fonction de la taille du flotteur et de la part immersée de son volume.
- Le deuxième critère est *la forme*. Les éléments choisis doivent idéalement se rapprocher de la forme sphérique. Cette restriction permettra de cibler le centre de l'objet, appelé centroïde, de manière précise, de réduire les erreurs de digitalisation et d'assurer autant que possible une mesure de la hauteur constante au-dessus du plan d'eau.
- Le troisième critère à prendre en compte est *la dimension*. Les éléments flottants doivent être suffisamment grands pour représenter plusieurs pixels sur l'image, mais pas trop grand pour que son centroïde soit le plus proche possible de la surface d'eau et pour qu'il soit possible de densifier au maximum l'échantillonnage spatial et temporel.
- Le dernier critère identifié est *la couleur*. Une couleur saturée permettra de distinguer aisément les éléments sur le plan d'eau. En colorimétrie dans l'espace RGB (*Red-Green-Blue*), la saturation correspond à l'angle du vecteur couleur par rapport à la diagonale des gris, plus cet angle est élevé plus la couleur est saturée. Une couleur fortement saturée représente une couleur vive tandis qu'une couleur faiblement saturée représente une couleur grisâtre.

Idéalement, les couleurs choisies doivent se trouver le plus éloignées possibles de l'axe des gris. Les couleurs idéales sont par exemple le bleu, le cyan, le magenta, le rouge, le jaune ou le vert.

Au vu des critères mentionnés précédemment, le choix s'est orienté sur des flotteurs de pêche Caperlan<sup>1</sup> (Figure 4).



Figure 4 : Flotteurs de pêche Caperlan - 2.00 g

En effet, ceux-ci correspondent à la majorité des critères. Les flotteurs sont de formes parfaitement sphériques. Ils possèdent un diamètre de 1.9 cm ce qui correspond à quelques pixels sur une image en HD suivant la configuration des caméras au laboratoire. Ces flotteurs sont fabriqués en polystyrène expansé, plus couramment appelé frigolite. Une fine pellicule de couleur en acrylonitrile butadiène styrène recouvre également les flotteurs. Ce polymère offre une bonne résistance chimique et une résistance élevée aux chocs. Concernant la couleur, les flotteurs sont disponibles en deux coloris différents : jaune et orange. Bien que l'orange ne soit pas une couleur saturée, contrairement au jaune, ces couleurs vives permettent de visualiser efficacement les flotteurs sur le plan d'eau. Une quantité limitée de 120 flotteurs sera exploitée lors de l'établissement du protocole expérimentale de notre mémoire vu le coût relativement onéreux de ce matériel de pêche utilisé en grande quantité.

#### I. 4. 4. Dispositif pour disperser les flotteurs

Comme expliqué précédemment, le MNDS sera reconstitué sur base d'échantillonnage de la position tridimensionnelle des flotteurs. Par conséquent, ceux-ci doivent être disséminés de manière homogène, continue et suffisamment dense pour assurer une bonne représentativité spatiale et temporelle du plan d'eau.

<sup>1</sup> [https://www.decathlon.fr/float-ww-1-stab-2g-id\\_8362888.html](https://www.decathlon.fr/float-ww-1-stab-2g-id_8362888.html)



*Figure 5 : Dispositif pour lâcher les flotteurs*

L'opération sera réalisée par le dispositif à la figure 5 installé en amont de la digue. Des rangées de 10 flotteurs, espacés de 5 cm, seront lâchées manuellement sur la largeur du canal principal à intervalle de temps régulier.

#### I. 4. 5. Appareils photographiques

Trois appareils photographiques numériques grand public (figure 6) seront utilisés pour filmer la rupture de la digue. Les caractéristiques techniques de chaque appareil sont reprises dans le tableau 2.

*Tableau 2 : Caractéristiques des appareils photographiques (Source : « Panasonic » « Canon »)*

Appellation dans ce mémoire	Boîtier	Capteur	Objectif	Taille du capteur (mm)	Taille maximale du capteur en mode vidéo (pixels)	Images par seconde	Ratio
Canon	Canon EOS 5D Mark III	CMOS	EF 24 - 105 mm 1:4	36 x 24	1920 x 1080 (2 Mpx)	25	16 : 9
Lumix 72	Panasonic DC-FZ82	CMOS	20-1200 mm 1:2.8-5.9	6.16 x 4.62	3840x2160 (8 Mpx)	30	16 : 9
Lumix GH4	Panasonic DMC-GH4	CMOS	14-140 mm 1:3.5-5.6	17.3 x 13	3840x2160 (8 Mpx)	30	16 : 9



*Figure 6 : Appareils photographiques. De gauche à droite : Lumix GH4, Lumix FZ82, Canon*

Différents modes d'enregistrement vidéo peuvent être sélectionnés sur les appareils : vidéo 4K, vidéo HD ou vidéo haute vitesse. Les différences principales entre ces modes vidéo résident dans la résolution d'acquisition des images et le nombre d'Images Par Seconde (IPS) ou *Frame Per Second* (FPS).

- Vidéo 4K : 3840x2160 pixels à 30 IPS ou 25 IPS
- Vidéo HD : 1920x1080 pixels à 60 IPS ou 30 IPS ; 1280x720 pixels 30 IPS ou 25 IPS
- Vidéo haute vitesse : 1280x720 pixels à 100 IPS ; 640x480 pixels à 200 IPS

On constate que plus la résolution des images est fine plus le nombre d'images par seconde diminue et inversement. Le mode vidéo sélectionné dépend donc de la dynamique du mouvement filmé. Si le mouvement est rapide, l'utilisateur privilégiera un nombre élevé d'IPS au dépend de la résolution d'image pour obtenir une certaine fluidité visuelle du mouvement. Au contraire, si le mouvement est lent, l'utilisateur peut se permettre un nombre faible d'IPS et une résolution maximale.

Un appareil photo numérique est composé de différents composants :

- Un *objectif* qui constitue le corps de l'appareil photo. L'objectif est formé de plusieurs lentilles destinées à transmettre une image réelle sur le plan focal. Ce plan correspond au plan perpendiculaire à l'axe optique passant par le foyer image. Le foyer image se situe à une distance variable du plan focal, appelé *distance focale*. Cette notion, généralement exprimée en mm, est également associée au champ d'observation. Lorsque la distance focale augmente, le champ d'observation de l'appareil diminue et inversement.
- Un *capteur d'image* qui est une composante électronique constitué de photosites sensibles à la lumière. Le capteur est capable de convertir la lumière reçue sur les cellules photosensibles en un signal électrique puis de le transformer en une valeur numérique. La taille du capteur a un impact sur la *sensibilité ISO*. Plus le nombre ISO est élevé, plus le capteur est sensible à la lumière. Or, une sensibilité élevée engendre un bruit numérique qui dégrade la qualité des images.
- Un *diaphragme* est une ouverture circulaire réglable placée au centre de l'objectif. Il a pour rôle de gérer la quantité de lumière qui arrive sur les photosites du capteur. Le diamètre de l'ouverture est caractérisé par le *nombre d'ouverture*, noté f/N. Pour une même sensibilité, une diminution du nombre d'ouverture sera compensée par une durée de pose plus longue. Le nombre d'ouverture a aussi une influence directe sur la profondeur de champ, c'est-à-dire la zone de netteté de l'image.

- Un obturateur qui permet également de gérer la quantité de lumière frappant les photosites en jouant sur la durée d'exposition de la surface photosensible. Cette durée d'exposition est appelée le *temps de pose*, généralement exprimé en secondes.

En photographie, le temps de pose, l'ouverture et le nombre ISO forme le triangle d'exposition. Si un de ces trois paramètres est modifié, il faut régler les 2 autres pour conserver une bonne exposition de la photo.

Les paramétrages de ces éléments ainsi que le mode vidéo choisi lors de l'expérience seront explicités à la section IV. 2. 1.

#### I. 4. 6. Appareil de mesure

Une station totale Leica TPS 1202 + (figure 7) est utilisée pour obtenir la position tridimensionnelle des points de calibration nécessaires à la première étape de l'algorithme de la DLT. Les positions sont calculées sur base de mesures d'angles et de distances. Ce matériel, relativement onéreux, est emprunté à l'Unité de Géomatique de l'Université de Liège.



Figure 7 : Station totale Leica

Les caractéristiques techniques de l'instrument sont reprises ci-dessous (Source : « Leica ») :

- Précision angulaire : 0.6 mgon
- Précision sur les distances : 1 mm + 1.5 ppm

#### I. 4. 7. License Matlab

Les codes fournis pour débuter ce travail ont été implémentés dans l'environnement Matlab. Par conséquent, les algorithmes développés dans le cadre de notre mémoire seront également implémentés à l'aide de ce logiciel afin de garantir une utilisation efficace et permettre une intégration rapide de nos produits dans la chaînes de traitements photogrammétriques complète mise en place au laboratoire HECE et qui a fait intervenir plusieurs mémorants et doctorants. La version de Matlab exploitée dans le cadre de ce travail est la version R2015a.

# CHAPITRE II : CODES FOURNIS ET MODIFICATIONS

## II. 1. Introduction

Différents codes provenant du département ArGENCo (*Architecture, Géologie, Environnement et Construction*) et de l'Unité de Géomatique de l'ULiège ont été mis à notre disposition pour débuter ce mémoire. Pour rappel, tous ces scripts sont implémentés sous Matlab.

Le contexte général de recherche dans lequel ces codes ont été développés sera expliqué dans ce chapitre. Ensuite, les codes ou parties de codes réutilisés notamment via des fonctions seront précisés. Cela permettra de bien distinguer ultérieurement nos nouveaux scripts de ceux déjà existants. Les quelques modifications à apporter aux scripts existants seront également précisées.

## II. 2. Contexte général

Les codes fournis sont au nombre de trois :

- Un code implémentant l'algorithme de la DLT à 16 paramètres (Liénart, 2015)
- Un code implémentant une technique de profilométrie laser (Rifai, 2016)
- Un code implémentant l'algorithme de la LSPIV (Peltier, 2011)

### II. 2. 1. DLT à 16 paramètres

La méthode de la DLT implantée par Liénart (2015) permet de restituer de manière non-intrusive une retenue d'eau avant et après sa rupture par surverse à l'aide de deux appareils photographiques au minimum. Ce script prend en compte, en plus des 11 paramètres standards de la DLT, les 5 paramètres additionnels modélisant les distorsions optiques de la lentille de l'appareil photo.

Le code est composé de quatre scripts :

- backsub.m
- DLT\_Calibration\_16p.m
- DLT\_Restitution\_16p.m
- DLTcameraPosition.m

Les scripts repris dans notre mémoire sont les suivants : DLT\_Restitution\_16p.m et DLTcameraPosition.m. Le script DLT\_Restitution\_16\_p permet de restituer la position tridimensionnelle des points homologues digitalisés manuellement par l'utilisateur sur plusieurs prises de vue. Quant à la fonction DLTcameraPosition.m, elle fournit les outputs (la position du point principal, la distance principale, les coefficients de la matrice de rotation du système monde vers le système image, les angles de rotation de l'axe optique et les coordonnées du centre de projection) indispensables au calcul des coordonnées 3D d'un point vu depuis différents points de vue. Ces

paramètres d'orientation calculés par cette fonction seront utilisés dans notre mémoire pour le calcul de la droite épipolaire et la recherche de points homologues.

## II. 2. 2. Profilométrie laser

Rifai (2016) a développé dans sa thèse de doctorat une méthode non-intrusive de profilométrie laser qui permet de restituer de manière dynamique l'évolution de la rupture de la brèche. Le principe du système de profilométrie laser consiste en un balayage laser rotatif de la digue filmé par une caméra. A chaque balayage un nuage de points de l'objet est produit, ce qui permet de créer un modèle numérique 3D de la digue. Les rayons optiques doivent être corrigés du phénomène de réfraction pour les parties immergées de la digue ce qui nécessite une connaissance détaillée du plan d'eau. Pour cela, l'élévation du plan d'eau dans le canal principal du modèle est mesurée de manière ponctuelle par des sondes à ultrason. La surface du plan d'eau est ensuite reconstruite sur base de la moyenne de ces mesures. Des champs de vitesses eulériens de l'écoulement au voisinage de la brèche ont également été déterminés dans le but de comprendre l'ouverture de la brèche. Ces vitesses d'écoulement en surface ont été obtenues par une dispersion homogène de plusieurs balles de ping-pong en amont de l'écoulement. Une étape fastidieuse de détection manuelle de chaque flotteur a ensuite été réalisée sur chaque frame de la vidéo. Les paramètres de la DLT de l'étape de la calibration ont ensuite permis d'établir l'équation du rayon optique relatif à chaque flotteur. Les coordonnées-monde des balles de ping-pong sont alors obtenues par l'intersection de l'équation du plan d'eau et du rayon optique. A partir des coordonnées-monde et du nombre de frames par seconde, les vitesses des objets ont pu être déduites.

Ce code de profilométrie laser est composé de deux parties. La première partie du code consiste à calibrer la prise de vue de l'appareil photo par la DLT. Rifai a repris le script DLT\_Calibration\_16p.m de Liénart en y apportant certaines modifications. Cette partie constitue donc la dernière version du code de la calibration par la DTL. La deuxième partie du code correspond à l'implémentation de la partie lasergrammétrie pour la restitution 3D. Cette partie ne sera pas utilisée dans notre mémoire. Globalement, la structure du code correspond à un script principal divisé en 2 parties, calibration et lasergrammétrie, dans lequel toutes les fonctions relatives à chaque étape du traitement sont appelées.

## II. 2. 3. LSPIV

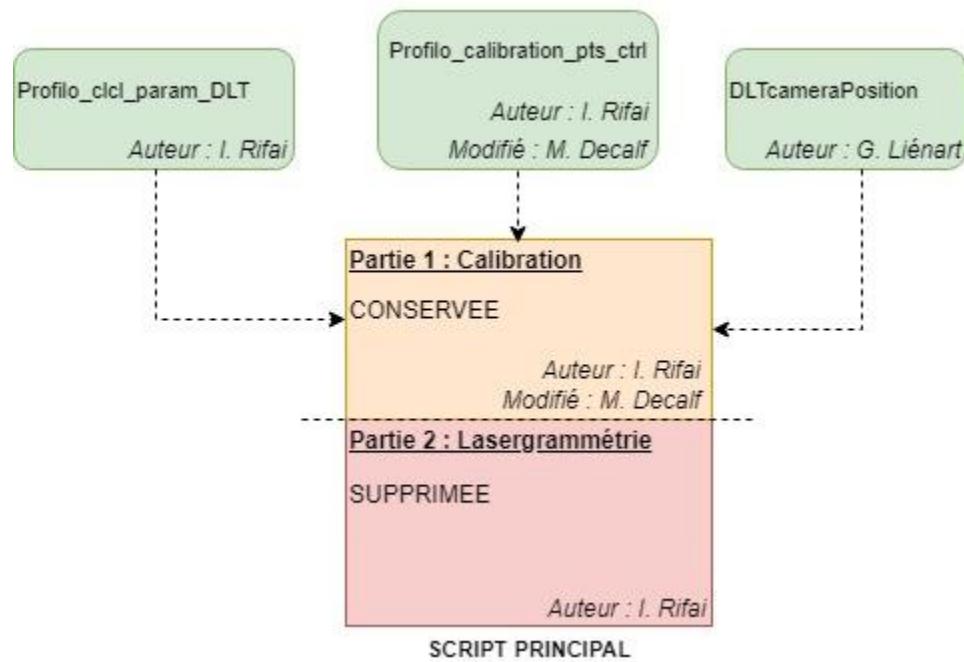
Peltier (2011) a développé le code de LSPIV dans l'environnement Matlab dans le cadre de sa thèse de doctorat au laboratoire HECE. Les opérations relativement lourdes en temps sont programmées en Fortran, parallélisées et appelées dans Matlab à l'aide de l'interface graphique. Le résultat permet dès lors d'obtenir des champs de vitesse 2D de l'écoulement par corrélation d'images sur base d'objets disséminés à la surface du plan d'eau.

## II. 3. Modifications à apporter

Plusieurs modifications doivent être apportées aux codes fournis afin de les intégrer au code que nous avons développés afin de les exploiter de manière efficace.

- Premièrement, la partie du code de Rifai relative à la calibration est conservée car elle constitue la dernière version de la calibration par la DLT. Cependant, cette partie ne fonctionne que pour une seule caméra. Plusieurs boucles devront être ajoutées dans les fonctions appelées pour la calibration et dans cette première partie du script principal afin de calibrer les trois prises de vue réalisées pour l'expérience.
- Deuxièmement, la seconde partie du script principal concernant la lasergrammétrie devra être supprimée car la reconstruction 3D sera réalisée à partir du code DLT\_Restitution\_16\_p développé par Liénart.
- Troisièmement, la fonction DLTcameraPosition.m devra être appelée dans la partie calibration du script principal de Rifai pour avoir tous les outputs nécessaires au modèle géométrique développé ultérieurement.
- Enfin, le script DLT\_Restitution\_16\_p.m demande en input des données contenues dans des fichiers Excel et écrit des outputs également écrit dans des fichiers Excel. Ce processus d'écriture et de lecture de fichiers s'avère peu performant principalement à cause du nombre important d'images à traiter. Par conséquent, les inputs et les outputs devront être gérés dans l'environnement Matlab.

Le schéma ci-dessous permet de se rendre compte visuellement de la structure du code avec les modifications de base apportées aux codes initiaux. Ce schéma sera par la suite progressivement complété par les nouvelles fonctions développées.



*Figure 8 : Structure du programme de base après les modifications.*

## CHAPITRE III : DEVELOPPEMENTS THEORIQUES

### III. 1. Introduction

Le but de ce chapitre est de présenter un modèle géométrique qui automatise la recherche de points homologues sur différentes prises de vue d'un même objet. Ces points correspondent aux flotteurs de pêche disséminés à la surface du plan d'eau lors de la rupture de la digue. Les coordonnées-image des flotteurs homologues sur chaque frame de 3 vidéos enregistrés par 3 caméras seront ensuite injectées dans un algorithme de restitution 3D à l'aide de 3 images synchrones depuis 3 points de vue différents. Les coordonnées 3D successives appartenant à un même flotteur à différent moment seront ensuite associées les unes aux autres pour former les trajectoires 3D des flotteurs au cours du temps. A partir de ces trajectoires et connaissant le nombre de frames par seconde, des champs de vitesses eulériens pourront être déduits.

Ce modèle géométrique est basé sur les outputs de la *Direct Linear Transformation* (DLT) imaginé par Aziz et Karara en 1971. Cette méthode est utilisée afin de calibrer les prises de vue des différents appareils vidéographiques et de restituer tridimensionnellement les points homologues identifiés. Plusieurs mémoires au sein de l'Unité de Géomatique ont déjà traité de ce sujet (Laplanche, 2008, et Liénart, 2015). Par conséquent, le développement théorique de cette méthode ne sera pas rappelé dans notre recherche.

### III. 2. Détection et identification des flotteurs

Les flotteurs doivent pouvoir être ciblés en leur centre sur chaque frame des vidéo. Les différentes étapes du traitement des images menant à la détection et à l'identification automatiques et précises du centroïde sont détaillées dans cette section.

Ces étapes sont implémentées dans le script *classification\_flotteur.m* (annexé à ce mémoire).

#### III. 2. 1. Sélection de la partie traitée sur la première image de chaque vidéo

Tout d'abord, la zone du plan d'eau et de la digue est digitalisée manuellement par l'utilisateur (figure 9) pour la première image de chaque séquence d'image issue d'une caméra. Cette première étape a pour objectif de créer un masque binaire en attribuant une valeur égale à 1 aux pixels de la zone sélectionnée et égale à 0 pour tous les pixels en dehors de cette zone (figure 10). Ce masque multiplie ensuite chaque image de la séquence d'images à traiter (figure 11). Le résultat ne contient donc plus que la zone isolée par l'utilisateur en adoptant la valeur 0 comme une valeur d'absence de donnée. Ce traitement préalable permet d'extraire les histogrammes de saturation, de teinte et d'intensité (figure 13, 14 et 15) correspondant uniquement à la zone étudiée pour la première image de la séquence. La zone doit donc être digitalisée précisément. L'utilisateur doit être attentif à ne pas sélectionner les

murs de part et d'autre de la digue car l'essai est arrêté avant que la brèche ne touche un de ces murs. De plus, la partie de la plateforme en aval de la digue ne doit pas figurer dans la zone sélectionnée.



Figure 9 : Exemple de digitalisation du plan d'eau et de la digue à partir de la prise de vue du Canon.

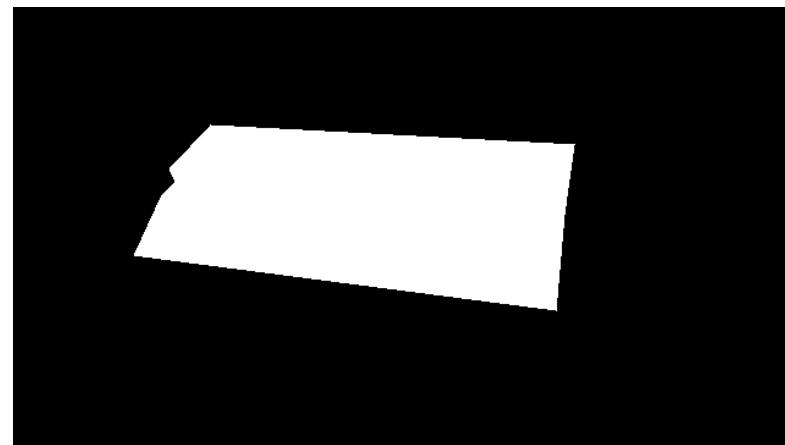


Figure 10 : Masque binaire de la zone sélectionnée par l'utilisateur.

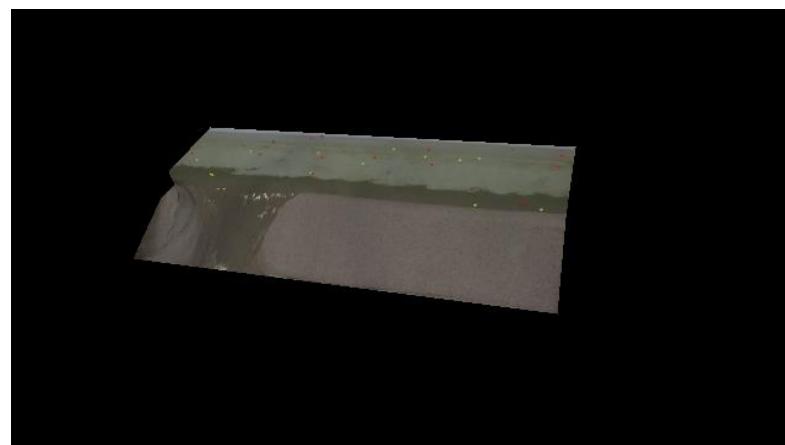
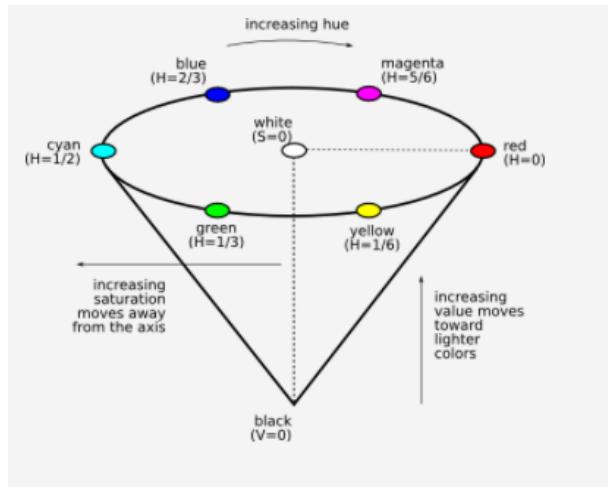


Figure 11 : Image sur base de laquelle les flotteurs seront identifiés.

### III. 2. 2. Détection des flotteurs par classification d'image

La deuxième étape du traitement consiste à détecter les flotteurs sur base de la saturation, de la teinte et de l'intensité. Cette étape est réalisée via l'application de traitement d'image *Color Thresholder* de Matlab.

Tout d'abord, un changement d'espace colorimétrique est effectué en passant de l'espace colorimétrique des couleurs additives Rouge (*Red*), Vert (*Green*) et Bleu (*Blue*) (*RGB*)  l'espace perceptuel Teinte (*Hue*), Saturation (*Saturation*) et Intensité (*Value*) (*TSI*). L'espace *TSI* est illustré ci-dessous :

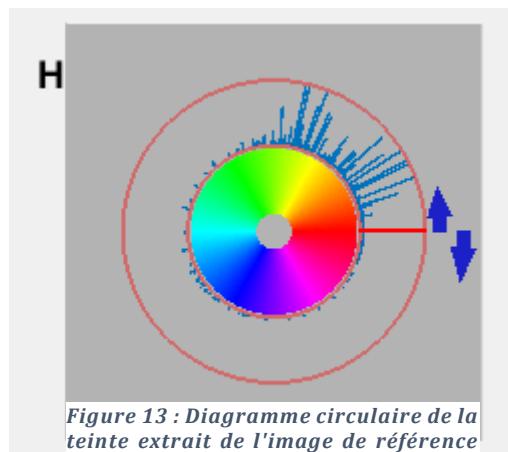


*Figure 12 : Espace colorimétrique HSV (Source : Matlab)*

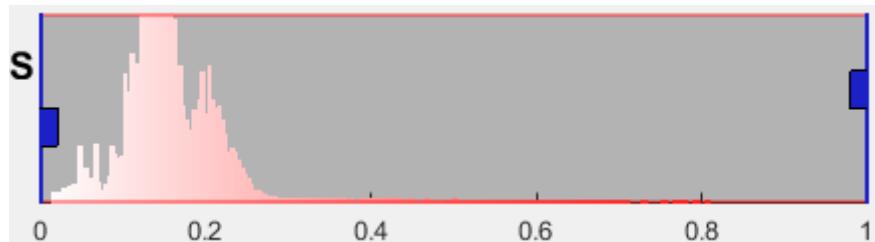
La teinte est un angle mesuré dans le sens horaire entre une direction de référence (ici le rouge) et le point de percée du vecteur couleur dans le plan de Maxwell. Cet angle est compris entre 0 et 1 (1 : 360°).

La saturation est également comprise entre 0 et 1. La valeur 0 indique que le vecteur couleur est colinéaire de la droite des gris. Au plus, la valeur tend vers 1, c'est-à-dire que l'angle entre le vecteur couleur et la droite des gris augmente, au plus la couleur est saturée.

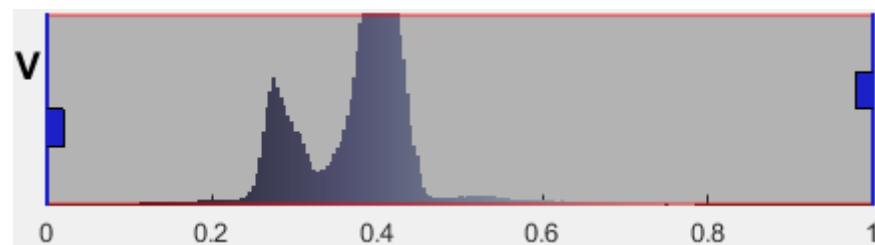
L'intensité se situe aussi dans un intervalle de 0 à 1. Plus la couleur est claire, plus les valeurs tendent vers 1.



*Figure 13 : Diagramme circulaire de la teinte extrait de l'image de référence (Figure11).*



*Figure 14 : Histogramme de la saturation extrait de l'image de référence (Figure 11).*



*Figure 15 : Histogramme de l'intensité extrait de l'image de référence (Figure 11).*

En combinant ces trois variables colorimétriques, les flotteurs de pêche de couleur orange et jaune peuvent facilement être détectés.

Les valeurs-seuil sur chaque critère sont déterminées pour chaque prise de vue manuellement sur base d'une image de référence au début de la séquence d'images à traiter.

Tableau 3 : Exemples de valeurs seuil de la teinte, de la saturation et de l'intensité permettant d'identifier les flotteurs.

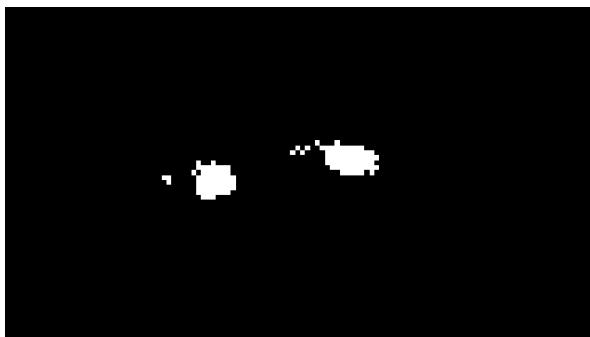
	Flotteurs	Teinte		Saturation		Intensité	
		Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
<b>Canon</b>	<b>Orange</b>	0.943	0.036	0.354	1.000	0.346	1.000
	<b>Jaune</b>	0.131	0.241	0.296	1.000	0.391	1.000
<b>Lumix 72</b>	<b>Orange</b>	0.946	0.048	0.485	1.000	0.313	1.000
	<b>Jaune</b>	0.086	0.259	0.272	1.000	0.458	1.000
<b>Lumix GH4</b>	<b>Orange</b>	0.940	0.056	0.350	1.000	0.106	1.000
	<b>Jaune</b>	0.110	0.251	0.322	1.000	0.208	1.000

On peut constater que la valeur-seuil inférieure de la saturation pour les flotteurs oranges est plus élevée que celle des flotteurs jaunes. Par contre, les flotteurs jaunes présentent une valeur-seuil inférieure plus élevée d'intensité. La couleur jaune des flotteurs est plus claire mais moins saturée. Alors que la couleur orange est plus foncée mais plus saturée. En combinant les valeurs seuils de la teinte, de la saturation et de l'intensité, les flotteurs sont parfaitement identifiables sur les images. Dès lors, cette étape permet de réaliser un masque binaire des pixels correspondant aux flotteurs auxquels la valeur 1 est assignée (0 étant assignée aux autres pixels).

Notons que lors de la reconstruction 3D, l'opération réalisée ultérieurement, une source d'erreur peut provenir de la délimitation des flotteurs par seuillage car les valeurs-seuil permettant de les identifier ne sont pas tout à fait similaires d'un endroit à un autre dans l'image. Cette source d'erreur provient notamment des conditions d'éclairement mais ces différences sont fixes dans le temps ce qui rendrait possible de faire varier spatialement le seuil.

### III. 2. 3. Erosion et dilatation des groupes de pixels correspondants aux flotteurs

La troisième étape du traitement est l'application de filtres morphologiques consistant à éroder et à dilater les groupes de pixels de valeur 1 du masque binaire des flotteurs obtenu à l'étape précédente (figures 16 à 21). L'objectif est de réduire le bruit correspond à des pixels mal classés lors du processus de seuillage. Cependant, aucun pixel isolé représentant du bruit n'est visible sur les images. Les filtres sont donc utilisés dans notre cas pour régulariser la forme de l'image des flotteurs dans le masque binaire afin d'extraire précisément leur centroïde. Le filtre d'érosion consiste à rétrécir le groupe de pixels représentant un flotteur tandis que le filtre de dilatation permet de le grossir. L'érosion est mise en œuvre par recherche du minimum dans une fenêtre de convolution 3x3, tandis que la dilatation fait appel à une recherche du maximum dans une même fenêtre. Plusieurs étapes successives d'érosion et de dilatation peuvent être appliquées afin d'obtenir des flotteurs parfaitement circulaire. Cependant dans certaine partie de l'image, des flotteurs peuvent être représentés uniquement par quelques pixels à cause des valeurs seuils trop restrictives sur cette partie de l'image, notamment dû aux conditions d'éclairement différentes. Par conséquent, une succession de filtres d'érosion et de dilation aurait pour conséquence de faire disparaître les pixels représentant le flotteur.



*Figure 16 : Masque binaire initial des flotteurs oranges*



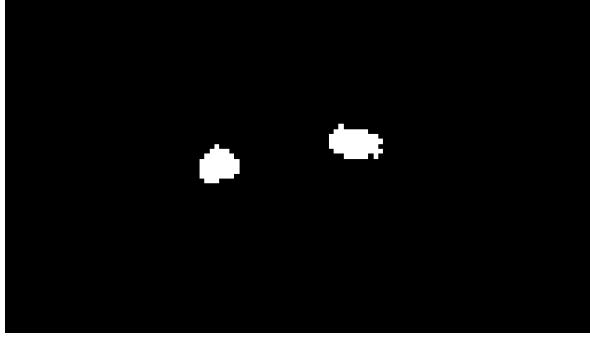
*Figure 19 : Masque binaire initial des flotteurs oranges multiplié par l'image originale.*



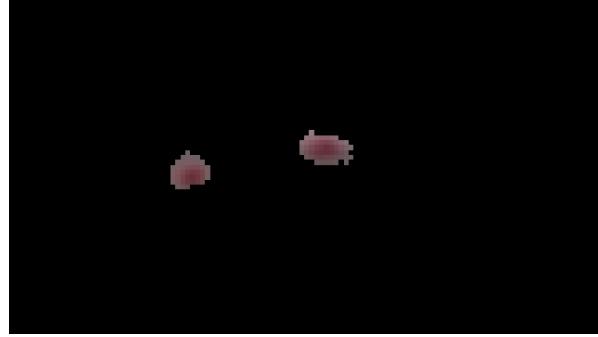
*Figure 17 : Masque binaire érodé des flotteurs oranges*



*Figure 20 : Masque binaire érodé des flotteurs oranges multiplié par l'image originale*



*Figure 18 : Masque binaire dilaté des flotteurs oranges*



*Figure 21 : Masque binaire dilaté des flotteurs oranges multiplié par l'image originale*

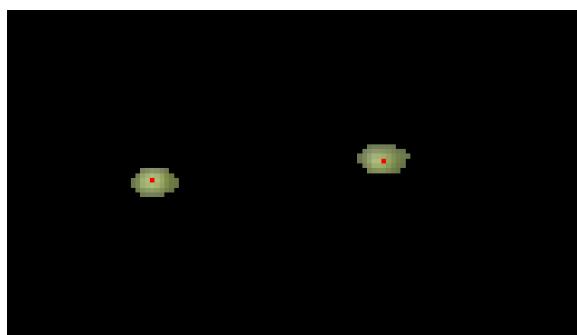
### III. 2. 4. Identification du centroïde

La dernière étape du traitement consiste à identifier chaque groupe de pixels interconnectés représentant chaque flotteur et d'extraire les coordonnées-image ( $u, v$ ) de son centroïde.

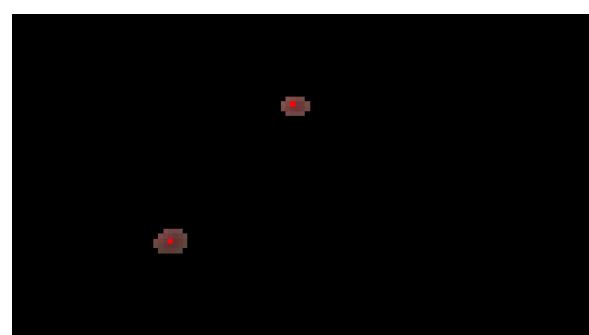
Chaque groupe de pixels est identifié par une analyse de voisinage et en regroupant les pixels connexes ayant une valeur numérique identique dans le masque. La recherche de ces pixels peut se faire sur base de 4 ou 8 pixels voisins. On parle de connexité d'ordre 4 pour un voisinage par les côtés des pixels et de connexité d'ordre 8 si le voisinage par les sommets des pixels est aussi considéré. Tous les pixels connectés obtiendront une valeur numérique entière identique identifiant le groupe d'appartenance. Cette valeur est une étiquette, d'où le terme de *labelling* parfois utilisé pour dénommer cette procédure. Nous avons adopté une connexité d'ordre 8 pour réaliser cette opération. Au terme de celle-ci, le nombre de flotteurs oranges et jaunes présents dans l'image est connu.

L'image issue du *labelling* est ensuite convertie en niveau de gris. Cette étape permet de déterminer le centroïde des flotteurs en recherchant le pixel avec le maximum d'intensité dans chaque groupe de pixels (figure 22 et 23). Cette solution radiométrique pour détecter le centroïde est préférée à une solution géométrique à cause des valeurs-seuil trop restrictives par endroit dans l'image. A certains endroits, par exemple, il se peut qu'un flotteur se retrouve délimité par un demi-cercle plutôt qu'un cercle plein. La solution radiométrique permet donc de situer le centroïde sur l'extrémité du demi-cercle correspondant au centroïde du flotteur.

Pour chaque flotteur, les coordonnées-image ( $u, v$ ) du centroïde, l'aire, l'excentricité et les coordonnées extrêmes du groupe de pixel représentant le flotteur sont extraits et stockés dans une structure Matlab.



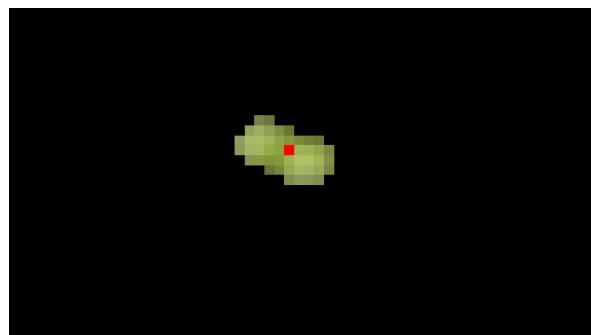
*Figure 22 : Classification des flotteurs jaune et identification de leur centroïde*



*Figure 23 : Classification des flotteurs orange et identification de leur centroïde*

### III. 2. 5. Cas particuliers

Certaines confusions apparaissent dans le résultat du traitement des images (figure 24). Par exemple, lorsque deux flotteurs de la même couleur se touchent. La détection des deux flotteurs se fait en un seul groupe de pixels. Par conséquent, un seul centroïde est calculé au lieu de deux, un pour chaque flotteur contigu.



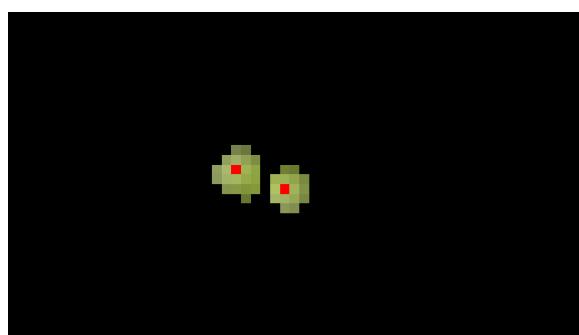
*Figure 24 : Confusion entre deux flotteurs de même couleur*

Ces groupes de pixels erronés sont reconnus sur base de l'excentricité et de l'aire. En effet, l'aire est deux fois plus grande et l'excentricité se rapproche d'une ellipse (valeur 1) au lieu d'un cercle (valeur 0). Le tableau 4 donne les valeurs-seuil adoptées pour reconnaître cette configuration de flotteurs.

*Tableau 4 : Valeurs critiques de l'aire et de l'excentricité à partir desquelles un groupe de pixels est reconnu comme correspondant à deux flotteurs contigus.*

	Valeurs
Aire	40 pixels
Excentricité	0.80

Une fois que l'on a reconnu ce type de groupe de pixels correspondant à deux flotteurs contigus, la solution consiste à diviser ce groupe par une ligne de code numérique égale à 0 passant par le centroïde. Les coordonnées minimales et maximales en ordonnée et en abscisse du groupe de pixels sont extraites ce qui permet de déterminer l'orientation du groupe de pixels. En fonction de l'orientation, la ligne de code numérique égal à 0 est tracée en prenant la coordonnée en abscisse ou en ordonnée du centroïde du groupe de pixel. Le nouveau masque binaire subit ensuite un filtre d'érosion et de dilatation pour donner une forme circulaire aux images des deux flotteurs (figure 25).



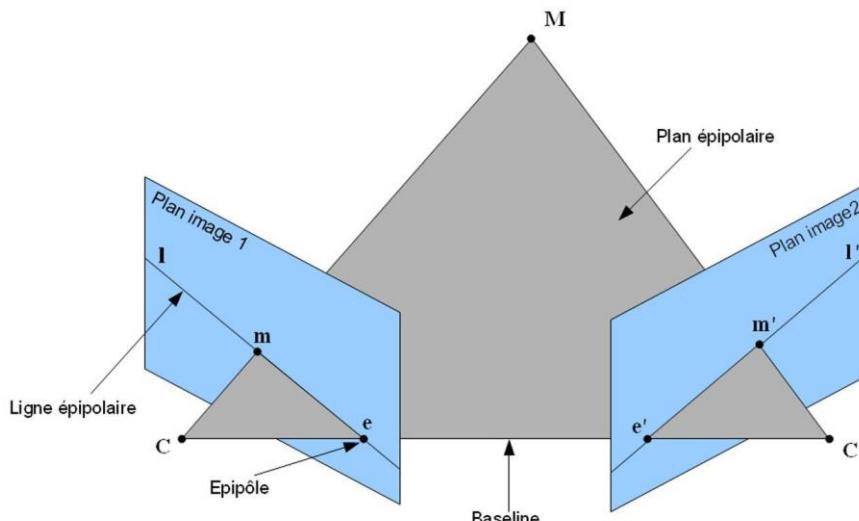
*Figure 25 : Séparation du groupe de pixels correspondant à 2 flotteurs contigus en deux flotteurs distincts.*

### III. 3. Développement mathématique du modèle géométrique de recherche de points homologues

Le modèle géométrique de recherche de points homologues que nous proposons dans notre mémoire exploite la DLT et le concept de géométrie épipolaire. Par conséquent, la théorie de la géométrie épipolaire sera exposée dans la section suivante. Un rappel des équations fondamentales et des outputs de la DLT semble également indispensable avant de développer les principes théoriques de notre modèle.

#### III. 3. 1. Théorie de la géométrie épipolaire

La géométrie épipolaire permet dtablir une relation géométrique entre deux images d'une même scène issues de prises de vue depuis des stations différentes. Le point homologue  $m'$  dans le plan image 2, d'un point  $m$  identifié dans le plan image 1, se situe le long d'une droite dans le plan image 2. Cette droite est appelle *la droite épipolaire*. Cette relation géométrique est illustrée par la figure 26.



*Figure 26 : Illustration du concept de la géométrie épipolaire. (Source : Savatier, 2015)*

Si on considère ce modèle stéréoscopique et que les deux prises de vue sont orientées de façon relative comme elles l'étaient au moment de leur acquisition (coplantude de la base et des rayons homologues considérés) :

- La droite  $CC'$  représente *la base*. Elle est constituée du centre de projection ( $C$ ) de la caméra 1 et du centre projection ( $C'$ ) de la caméra 2.
- Les *piples* ( $e$  et  $e'$ ) sont les points d'intersection de la base avec respectivement les plans images 1 et 2. Les piples sont reportés à l'infini si les axes optiques des caméras sont

parallèles. Les piples restent également fixes tant que l'orientation et la position relative des caméras ne sont pas modifiées.

- Le *plan épipolaire* contient la base et les rayons optiques issus des centres de projection des 2 caméras passant par le point M. Ce plan passe également par les piples.
- L'intersection du plan épipolaire avec le plan image 2 est *la droite épipolaire e'm'*, et l'intersection avec le plan image 1 est *la droite épipolaire em*. Ces droites épipolaires sont appelées *les droites épipolaires conjuguées* du point M. Chaque droite épipolaire passe par l'piple de son plan image.
- L'orientation de la droite épipolaire dépend des paramètres d'orientations interne et relative des 2 prises de vue. La forme de la scène photographie ne modifie en rien l'orientation de la droite.

La géométrie épipolaire présente l'avantage majeur de réduire le temps de recherche d'un point homologue. En effet, la contrainte épipolaire permet de restreindre la zone de recherche à une seule droite. De plus, elle a pour effet de diminuer les erreurs de correspondance car le domaine de recherche est considérablement réduit.

Dans certaines conditions, elle doit cependant être complétée par un autre critère de localisation du point homologue dans la seconde prise de vue en utilisant par exemple de la corrélation d'images permettant de détecter des voisinages semblables. Dans notre cas, ce second critère n'a pas raison d'être étant donné le nombre réduit de flotteurs. Par ailleurs, comme nous allons le montrer l'utilisation d'une troisième prise de vue constitue une autre raison ne justifiant pas cette opération de corrélation d'images.

### **Condition de coplanarité**

Pour appliquer la recherche de point homologues en géométrie épipolaire, il faut évidemment s'assurer que l'orientation relative des prises de vues est correcte. Pour cela, on contrôle que la parallaxe transversale a disparu pour chaque couple de points homologues. Cela revient à vérifier que les vecteurs CM et C'M appartiennent à un même plan. Ce principe est la condition fondamentale de coplanarité. Elle est exprimée par l'équation suivante :

$$(CM \wedge C'M) \cdot Base = 0$$

[1]

### **III. 3. 2. Direct Linear Transformation (DLT)**

La méthode de calibration de la DLT fournit les outputs suivants :

- 11 coefficients ( $L_1, L_2, \dots$ ) qui permettent d'exprimer la relation entre la position d'un objet dans le référentiel-monde et la projection de celui-ci dans le référentiel-image.
- La position du point principal ( $u_0, v_0$ ) exprimée en coordonnées-image (position en colonne et ligne), l'unité de mesure est donc le pixel. Ce point résulte de l'intersection entre l'axe optique et le plan de l'image.

- La distance principale (d) entre le cliché et le centre de projection exprimée en pixels. Cette distance représente la valeur de la focale pour une mise au point à l'infini.
- Les coordonnées du centre de projection ( $x_0, y_0, z_0$ ) en coordonnées-monde.
- Les angles orientant l'axe optique de la caméra dans le référentiel-monde ( $\Omega, \phi, \kappa$ ).

Et les équations fondamentales de la DLT sont les suivantes :

$$u = \frac{L_1x + L_2y + L_3z + L_4}{L_9x + L_{10}y + L_{11} + 1}$$

[2]

$$v = \frac{L_5x + L_6y + L_7z + L_8}{L_9x + L_{10}y + L_{11} + 1}$$

[3]

Avec, x, y et z en unités métriques,

u et v position d'un point dans l'image en colonne et ligne (l'unité est le pixel).

### **III. 3. 3. Modèle mathématique dans le cas de 2 images**

#### **III. 3. 3. 1. Développement théorique**

Le but du modèle géométrique de recherche de points homologues dans le cas de 2 clichés est d'obtenir l'équation de la droite pипolaire dans le plan de l'image 2 à partir d'un point localisé dans l'image 1. Dans la pratique de notre recherche, ce point correspond au centroïde de l'image d'un flotteur reconnu et identifié par le script *classification\_flotteur.m*. La droite pипolaire dans l'image 2 correspond quant à elle à la droite passant par le centroïde du flotteur homologue de l'image 1.

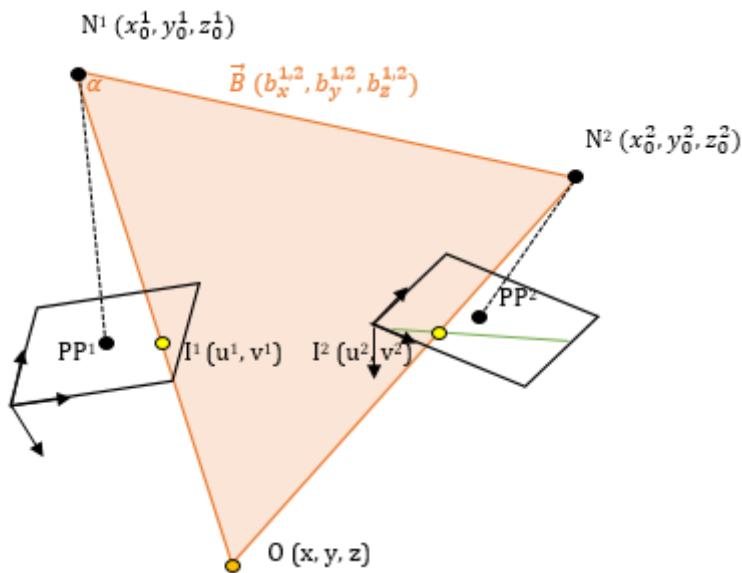
Les équations établies peuvent être formulées dans trois référentiels distincts :

- Le référentiel-monde [XYZ] orthogonal dont l'origine est placé arbitrairement dans le monde réel (le référentiel de notre levé topographique).
- Le référentiel-image 1 [U<sub>1</sub>V<sub>1</sub>W<sub>1</sub>] orthogonal dont l'origine est placée en bas à gauche dans l'image 1. Le sens de l'axe W<sub>1</sub> pointe en direction du positif.
- Le référentiel-image 2 [U<sub>2</sub>V<sub>2</sub>W<sub>2</sub>] orthogonal dont l'origine est placée en bas à gauche dans l'image 2. Le sens de l'axe W<sub>2</sub> pointe en direction du positif.

Il est important de noter que toutes les équations doivent être exprimées dans un référentiel commun. Le référentiel choisi est le référentiel-monde. Toutes les équations relatives à la l'expression de la droite pипolaire dans l'image 2 seront donc établies dans le référentiel-monde.

A la fin du développement, celles-ci seront transformées dans le référentiel-image 2 afin de pouvoir tracer la droite dans le plan de l'image 2 et dans le référentiel de cette dernière.

Le schéma de la figure 27 permet d'illustrer la disposition stéréoscopique dans le cas de 2 clichés avec les notations qui seront utilisées dans les équations suivantes.



*Figure 27 : Situation stéréoscopique dans le cas de deux images*

### 1 - quation du plan $\alpha$ contenant le vecteur BASE et le vecteur NI<sup>1</sup> dans le référentiel-monde

La première étape consiste à calculer les composantes du vecteur NI dans le référentiel-image 1.

$$\overrightarrow{NI_I^1} = \begin{pmatrix} u_i^1 \\ v_i^1 \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} u_0^1 \\ v_0^1 \\ -d^1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_i^1 - u_0^1 \\ v_i^1 - v_0^1 \\ d^1 \end{pmatrix}$$

[4]

Avec,  $d^1$  la distance entre le point principal (PP<sup>1</sup>) et le centre de projection (N<sup>1</sup>)

$u_0^1$  et  $v_0^1$  la position du point principal de l'image 1,

$u_i^1$  et  $v_i^1$  la position du pixel sélectionné dans l'image 1.

Ces composantes sont ensuite exprimées dans le référentiel-monde à l'aide d'une matrice de transformation.

$$\overrightarrow{NI_M^1} = T_{M/I}^1 * \overrightarrow{NI_I^1}$$

[5]

Où,  $\overrightarrow{NI_I^1}$  est défini dans le référentiel-image

$\overrightarrow{NI_M^1}$  est défini dans le référentiel-monde,

$T_{M/I}^1$  représente la matrice de transformation du référentiel-image vers le référentiel-monde.

La matrice de transformation T a pour équation :

$$T_{M/I} = (T_{I/M})^{-1}$$

$$T_{M/I} = D^{-1} \cdot \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}^{-1}$$

[6]

En injectant [4] et [6] dans [5], on obtient :

$$\overrightarrow{NI_M^1} = D^{-1} \cdot \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} u_i^1 - u_0^1 \\ v_i^1 - v_0^1 \\ d^1 \end{pmatrix}$$

[7]

Avec,

$$r_{11} = \frac{u_0^1 L_9^1 - L_1^1}{d_u}$$

$$r_{12} = \frac{u_0^1 L_{10}^1 - L_2^1}{d_u}$$

$$r_{13} = \frac{u_0^1 L_{11}^1 - L_3^1}{d_u}$$

$$r_{21} = \frac{v_0^1 L_9^1 - L_5^1}{d_v}$$

$$r_{22} = \frac{v_0^1 L_{10}^1 - L_6^1}{d_v}$$

$$r_{23} = \frac{v_0^1 L_{11}^1 - L_7^1}{d_v}$$

$$r_{31} = L_9^1$$

$$r_{32} = L_{10}^1$$

$$r_{33} = L_{11}^1$$

Dans l'équation [7], D représente un facteur d'échelle. Cette valeur peut être positive ou négative. Si le déterminant de la matrice de transformation est positif, alors D doit être positif. Dans le cas contraire, si le déterminant est négatif, la valeur de D doit être négative.

$$D^2 = \frac{1}{L_9^1{}^2 + L_{10}^1{}^2 + L_{11}^1{}^2}$$

[8]

$d_u$  et  $d_v$  ont pour équation :

$$d_u^2 = D^2 \cdot [(u_0^1 L_9^1 - L_1^1)^2 + (u_0^1 L_{10}^1 - L_2^1)^2 + (u_0^1 L_{11}^1 - L_3^1)^2]$$

[9]

$$d_v^2 = D^2 \cdot [(v_0^1 L_9^1 - L_5^1)^2 + (v_0^1 L_{10}^1 - L_6^1)^2 + (v_0^1 L_{11}^1 - L_7^1)^2]$$

[10]

Par convention, le produit de  $d_u$  et  $d_v$  doit être positif.

Ensuite, les composantes du vecteur de la BASE sont simplement définies en soustrayant les coordonnées-monde des centres de projection des deux caméras.

$$\overrightarrow{B_M^{1,2}} = \begin{pmatrix} x_0^2 - x_0^1 \\ y_0^2 - y_0^1 \\ z_0^2 - z_0^1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_x^{1,2} \\ b_y^{1,2} \\ b_z^{1,2} \end{pmatrix}$$

[11]

Comme les vecteurs  $\overrightarrow{B_M^{1,2}}$  et  $\overrightarrow{NI_M^1}$  définissent le plan BASE-NI, le produit vectoriel de ces vecteurs permet de déterminer les composantes du vecteur normal à ce plan.

$$\overrightarrow{B_M^{1,2}} \wedge \overrightarrow{NI_M^1} = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix}$$

[12]

Dès lors, les composantes (a, b et c) du vecteur normal au plan et un point connu en coordonnées monde appartenant à ce plan (centre de projection 1 ou 2) permettent de calculer d, la constante de l'équation cartésienne du plan  $\alpha$  de la figure 27 :

$$\alpha \equiv ax + by + cz + d = 0$$

[13]

## 2 - Equation du plan image 2 dans le référentiel-monde

Comme ci-dessus, il faut déterminer les composantes du vecteur normal au plan de l'image 2 ainsi qu'un point quelconque appartenant à ce plan pour en trouver son équation cartésienne.

Les composantes du vecteur normal  $\overrightarrow{N^2PP_I^2}$  au plan de l'image 2 sont définies par le vecteur passant par le point principal et le centre de projection de la prise de vue 2. Ces composantes sont définies dans le référentiel-image 2 par l'équation :

$$\overrightarrow{N^2PP_I^2} = \begin{pmatrix} u_0^2 \\ v_0^2 \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} u_0^2 \\ v_0^2 \\ -d^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ d^2 \end{pmatrix}$$

[14]

Ces composantes sont, par la suite, transformées en coordonnées-monde ( $e, f, g$ ) via la matrice de transformation à l'aide de l'équation [5].

L'équation cartésienne du plan image 2 s'écrit sous la forme :

$$\beta \equiv ex + fy + gz + h = 0$$

[15]

Cependant, le quatrième paramètre ( $h$ ) de l'équation reste inconnu. En substituant  $x, y$  et  $z$  dans l'équation [15] par un point en coordonnée-monde et les composantes du vecteur normal ( $e, f, g$ ), la valeur de  $h$  peut être déterminée. L'idée est d'exploiter les coordonnées-monde du point principal de la prise de vue 2.

Pour cela, il est nécessaire de connaître la valeur de la distance principale et les facteurs d'échelle ( $\lambda_u$  et  $\lambda_v$ ) selon respectivement les axes des ordonnées et des abscisses de référentiel image 2. Ces facteurs sont obtenus sur base du rapport des dimensions des capteurs des appareils photographiques sur leur résolution maximale.

*Tableau 5 : Facteurs d'échelle des trois appareils photographiques*

	Dimensions capteurs (mm)	Résolution maximale (pixels)	Facteur d'échelle selon l'axe des x ( $\lambda_u$ )	Facteur d'échelle selon l'axe des y ( $\lambda_v$ )	Moyenne des facteurs d'échelle
<b>Canon</b>	36 x 24	5760 x 3840	0.00625	0.00625	0.00625
<b>Lumix72</b>	6.16 x 4.62	4608 x 3456	0.00134	0.00134	0.00134
<b>LumixGH4</b>	17.3 x 13	4608 x 3456	0.00375	0.00376	0.00376

La distance principale,  $d$  provenant de la DLT et exprimée en pixels, est convertie en mètres ( $d'$ ) en utilisant l'équation ci-dessous :

$$d' = \lambda_{Moyen} * d^2 * 0.001$$

[16]

Les coordonnées du point principal sont obtenues en normalisant le vecteur issu du centre de projection vers le point principal. Cette distance normalisée est ensuite multipliée par la valeur de la distance principale,  $d'$ .

$$PP_M^2 = \begin{pmatrix} x_0^2 \\ y_0^2 \\ z_0^2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{e}{\sqrt{e^2 + f^2 + g^2}} \\ \frac{f}{\sqrt{e^2 + f^2 + g^2}} \\ \frac{g}{\sqrt{e^2 + f^2 + g^2}} \end{pmatrix} * d'$$

[17]

### **3- Equation de la droite ipolaire dans le référentiel-monde**

La droite ipolaire résulte de l'intersection de deux plans, le plan BASE-NI<sup>1</sup> et le plan IMAGE 2. L'équation de la droite ipolaire est donc obtenue en résolvant le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \beta \equiv ex + fy + gz + h = 0 \\ \alpha \equiv ax + by + cz + d = 0 \end{cases}$$

$\Leftrightarrow$

$$\text{droite ipolaire } \equiv y = mx + p$$

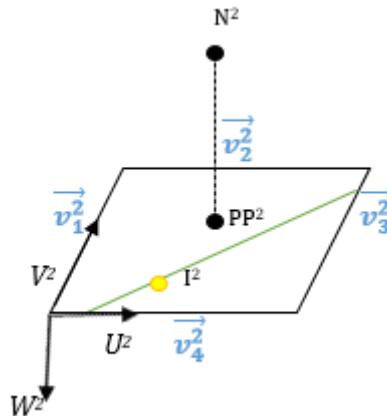
[18]

Avec,  $m = \left( \frac{\frac{ga}{c} - e}{f - \frac{gb}{c}} \right)$

$$p = \left( \frac{\frac{gd}{c} - h}{f - \frac{gb}{c}} \right)$$

#### 4- Intersection de la droite polaire avec les bords de l'image 2 dans le référentiel-monde

L'objectif de cette section est de résoudre le système composé des équations paramétriques des vecteurs supportant les bords de l'image ( $\vec{v}_1^2; \vec{v}_2^2; \vec{v}_3^2; \vec{v}_4^2$ ) (figure 28) et de l'équation de la droite polaire [18].



*Figure 28 : Schéma de l'image 2 dans le référentiel-image 2*

En effet, les coordonnées de l'intersection de la droite avec les bords de l'image 2 sont nécessaires afin de pouvoir représenter cette droite dans le plan IMAGE 2.

Pour écrire l'équation paramétrique d'un bord de l'image 2, nous devons connaître les composantes du vecteur directeur de ce bord ainsi qu'un point appartenant à ce vecteur.

Premièrement, les composantes des vecteurs directeurs des bords de l'image dans le référentiel-image 2 ont pour équation :

$$\vec{v}_2^2 = \vec{v}_4^2 = \begin{pmatrix} X_{pixel} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\vec{v}_1^2 = \vec{v}_3^2 = \begin{pmatrix} 0 \\ Y_{pixel} \\ 0 \end{pmatrix}$$

[19]

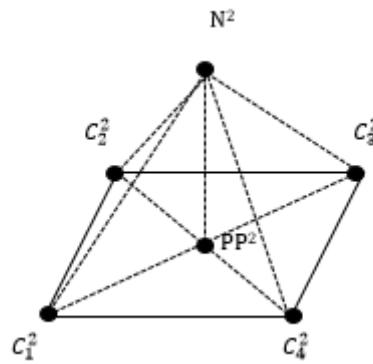
Avec, ( $X_{pixel}, Y_{pixel}$ ) la résolution des images (1920 x 1080)

$\vec{v}_2^2$  et  $\vec{v}_4^2$  les bords hauts et bas de l'image 2

$\vec{v}_1^2$  et  $\vec{v}_3^2$  les bords gauche et droit de l'image 2

Enste, les composantes de ces vecteurs directeurs des bords de l'image sont transformées en coordonnées-monde par l'équation [5].

Deuxièmement, les coordonnées-monde d'un point appartenant  chaque vecteur directeur monde doivent être calculées. Le principe est d'obtenir les coordonnées-monde des 4 coins de l'image 2 (figure 29). Cette étape est basée sur l'équation [17]. Le but est de déterminer les composantes des vecteurs allant des coins de l'image vers le centre de projection dans le système monde, de normaliser ces vecteurs et multiplier la distance normalisée par la distance en mm joignant le centre de projection aux coins de l'image.



*Figure 29 : Schéma de l'image 2 dans le référentiel-image 2*

Dans un premier temps, les distances ( $C_1^2N^2, C_2^2N^2, C_3^2N^2, C_4^2N^2$ ) sont exprimées dans le référentiel-image 2 en unités pixels via le théorème de Pythagore :

$$C_i^2N^2 = \sqrt{(C_i^2PP^2)^2 + (N^2PP^2)^2}$$

[20]

Avec,  $i$  l'identifiant du coin

$N^2PP^2$  la distance principale de l'image 2 fournie par la DLT

$C_i^2PP^2$  la distance entre un le coin  $i$  de l'image 2 et de son point principal dont la position est calculée par la DLT

Les distances  $C_i^2PP^2$  sont calculées en unités pixels par les équations suivantes :

$$C_1^2PP^2 = \sqrt{(u_0^2)^2 + (v_0^2)^2}$$

$$C_2^2PP^2 = \sqrt{(Y_{pixel} - v_0^2)^2 + (u_0^2)^2}$$

$$C_3^2PP^2 = \sqrt{(X_{pixel} - u_0^2)^2 + (Y_{pixel} - v_0^2)^2}$$

$$C_4^2 PP^2 = \sqrt{(X_{pixel} - u_0^2)^2 + v_0^2}$$

[21]

Les distances de l'équation [20] sont ensuite converties en unités métriques à l'aide de l'équation [16].

Dans un deuxième temps, les composantes des vecteurs directeurs supportant les bords  $\vec{v}_j^2$  sont obtenues dans le référentiel-image 2 à partir des équations suivantes :

$$\vec{v}_1^2 = \begin{pmatrix} -u_0^2 \\ -v_0^2 \\ -d^2 \end{pmatrix}$$

$$\vec{v}_2^2 = \begin{pmatrix} -u_0^2 \\ Y_{pixel} - v_0^2 \\ -d^2 \end{pmatrix}$$

$$\vec{v}_3^2 = \begin{pmatrix} X_{pixel} - u_0^2 \\ Y_{pixel} - v_0^2 \\ -d^2 \end{pmatrix}$$

$$\vec{v}_4^2 = \begin{pmatrix} X_{pixel} - u_0^2 \\ -v_0^2 \\ -d^2 \end{pmatrix}$$

[22]

Ces composantes sont transformées en coordonnées-monde par l'équation [5].

A partir des équations [20] et [22] converties dans le système monde, les coordonnées des coins de l'image sont obtenues en appliquant l'équation [17].

Pour vérifier les équations établies, les dimensions du capteur pour chaque appareil sont recalculées à partir des coordonnées-monde des coins de l'image 2 obtenues (tableau 6).

*Tableau 6 : Longueurs en mm des bords de l'image 2 recalculées sur base des coordonnées monde obtenues par le modèle géométrique implémenté.*

	<b>Canon</b>	<b>Lumix72</b>	<b>LumixGH4</b>
<b>Distance <math>C_1^2 C_2^2</math></b>	6.750	1.444	7.215
<b>Distance <math>C_2^2 C_3^2</math></b>	12.000	2.567	4.058
<b>Distance <math>C_3^2 C_4^2</math></b>	6.750	1.444	7.215
<b>Distance <math>C_4^2 C_1^2</math></b>	12.000	2.567	4.059

On peut constater que les dimensions trouvées ne correspondent pas aux dimensions des capteurs de la page 77. Cependant en mode vidéo, le capteur n'est pas utilisé à la pleine résolution. De ce fait, les dimensions doivent être transformées en coordonnées-image (tableau 7) pour vérifier si on obtient bel et bien les dimensions en pixels du mode vidéo utilisé.

**Tableau 7 : Longueurs en pixels des bords de l'image 2 recalculées sur base des coordonnées monde obtenues par le modèle géométrique implémenté.**

	<b>Canon</b>	<b>Lumix72</b>	<b>LumixGH4</b>
<b>Distance <math>C_1^2C_2^2</math></b>	1080.066	1080.005	1079.973
<b>Distance <math>C_2^2C_3^2</math></b>	1919.994	1919.989	1919.984
<b>Distance <math>C_3^2C_4^2</math></b>	1079.937	1080.004	1080.032
<b>Distance <math>C_4^2C_1^2</math></b>	1920.015	1920.045	1920.028
<b>Mode vidéo</b>	1920x1080	1920x1080	1920x1080

La dernière étape consiste donc à résoudre le système suivant pour chaque bord j de l'image :

$$\begin{cases} x_j^2 = t * v_j^2 + C_i^2 \\ y_j^2 = t * v_j^2 + C_i^2 \\ z_j^2 = t * v_j^2 + C_i^2 \\ x_j^2 = t * M_{u,v}^2 + E_{u,v}^2 \\ y_j^2 = t * M_{u,v}^2 + E_{u,v}^2 \end{cases}$$

[23]

Avec,  $x_j^2, y_j^2, z_j^2$  les coordonnées monde de l'intersection de la droite épipolaire et du bord de l'image j considéré.

$C_i^2$  le coin i de l'image par lequel passe le vecteur correspondant au bord l'image

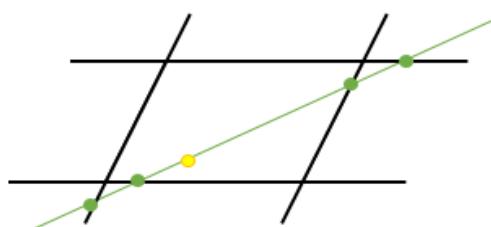
$v_j^2$  le vecteur directeur correspondant au bord j de l'image

$E_{u,v}^2$  le point par lequel passe la droite épipolaire (obtenu via l'équation [18])

$M_{u,v}^2$  le vecteur directeur de la droite épipolaire (obtenu via l'équation [18])

Les trois premières équations du système [23] sont les équations paramétriques du bord de l'image et les deux dernières sont les équations paramétriques de la droite épipolaire. Le système comporte 5 équations pour 4 inconnues. Les 4 premières équations sont donc suffisantes pour résoudre le système.

La résolution de ce système d'équations pour chaque bord de l'image fournit au total 4 coordonnées d'intersections représentées ci-dessous :



**Figure 30 : Points d'intersection de la droite épipolaire avec les bords l'image**

La résolution du système [23] pour chaque bord de l'image fourni 4 points d'intersections. Les points dont les abscisses et les ordonnées sont respectivement compris entre  $[0, X_{\text{pixel}}]$  et  $[0, Y_{\text{pixel}}]$  sont sélectionnés pour tracer la droite épipolaire.

### **5- Transformation des points d'intersection dans le référentiel-image 2**

Les coordonnées des deux points sélectionnés précédemment sont converties dans le référentiel-image 2 à l'aide des relations fondamentales de la DLT, équations [2] et [3].

#### **III. 3. 3. 2. Résultats**

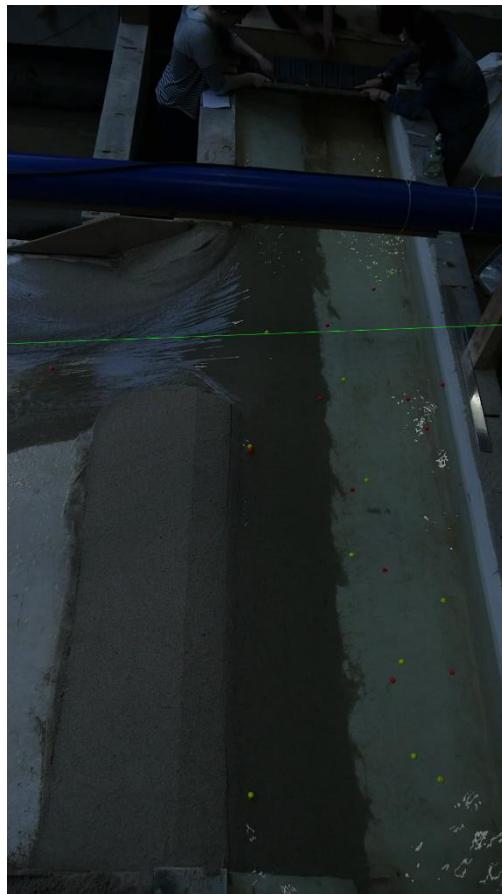
Le modèle géométrique de recherche de point homologue exploitant la droite épipolaire est implmt dans la fonction *geometrie\_epipolaire.m*. Le résultat de cette fonction est illustré aux figures 31 à 33.



*Figure 31 : Flotteur ciblé dans la première image (Canon).*



*Figure 32 : Droite épipolaire passant par le flotteur ciblé à la figure 31. (Lumix72)*



*Figure 33 : Droite épipolaire passant par le flotteur ciblé à la figure 31. (LumixGH4)*

### **III. 3. 4. Modèle mathématique dans le cas de trois images**

L'apport d'une troisième image dans le modèle géométrique implémenté permet de restreindre considérablement le domaine de recherche en aboutissant à un résultat univoque grâce à l'intersection des droites épipolaires. Ce principe de détection de points homologues sur base de trois caméras est détaillé dans les sections suivantes.

Au niveau de l'implémentation dans Matlab, les fonctions *classification\_flotteur.m* et *geometrie\_epipolaire.m* expliquées dans les sections précédentes sont régulièrement appellées dans la partie II du script principal afin d'aboutir aux résultats décrits de manière théorique dans cette section.

#### **III. 3. 4. 1. Développement théorique et résultats**

##### **1- Choix des images « référence », « receveuse » et « sélection »**

Premièrement, une image « référence » doit être sélectionnée parmi les trois images. C'est à partir des flotteurs ciblés sur cette image (figure 34) que les flotteurs homologues seront identifiés au sein des deux autres images. Ensuite, la droite épipolaire de chaque flotteur sélectionné dans cette image « référence » est tracée de manière indépendante sur les deux autres images (figures 35 et 36).



*Figure 34 : Image de « référence » avec un flotteur identifié (Lumix72).*

Parmi ces deux autres images, l'une est considérée comme image « receveuse » et l'autre comme image « sélection ». L'image de « sélection » permet de tracer sur l'image « receveuse » plusieurs droites épipolaires issues des flotteurs considérés comme candidats potentiels au statut de point homologue. L'image « receveuse » contient donc l'intersection de plusieurs droites épipolaires issues d'une part du flotteur identifié dans l'image de « référence » et d'autre part des flotteurs candidats de l'image de « sélection ».

Le choix des images est arbitraire mais ce choix reste identique tout au long du processus de traitement.

## 2- Candidats de l'image « sélection »

Dans le cas d'images parfaitement synchrones, la droite épipolaire de l'image de « sélection » passe par le flotteur homologue du flotteur ciblé dans l'image de « référence ». Cependant en pratique, le déplacement des flotteurs est extrêmement rapide lors du passage dans la brèche et une très petite erreur de synchronisation entre les caméras provoque un décalage de la position du flotteur par rapport à la droite épipolaire. D'autre part, la condition de coplanarité n'est pas parfaitement respectée. Dès lors, un intervalle de recherche de 10 pixels de part et d'autre de la droite épipolaire est considéré afin de se donner une marge de sécurité. Plusieurs flotteurs de la même couleur peuvent également se situer le long de la droite épipolaire. Par conséquent, plusieurs candidats doivent être



*Figure 35 : Image « receveuse » (Canon) contenant la droite épipolaire du pixel sélectionné à la figure 34.*

considérés comme candidat homologue (figure 37). L'apport de la troisième image permet d'identifier le bon flotteur parmi cette série de candidats par l'intersection de droites épipolaires.



*Figure 36 : Image de « sélection » (LumixGH4) contenant la droite épipolaire du pixel sélectionné à la figure 34.*



*Figure 37 : Candidats dans l'image « sélection » (LumixGH4).*

### 3- Intersection des droites épipolaires

La droite épipolaire issue de chaque flotteur candidat de l'image de « sélection » est tracée dans l'image « receveuse » (figure 38). Chaque pixel de cette image, correspondant au centroïde d'un flotteur, se situant le plus proche d'une intersection est considéré comme candidat homologue potentiel. On obtient donc autant de candidats que d'intersections. En théorie, le candidat le plus proche d'une intersection correspond au pixel homologue. Cependant en pratique, il se peut qu'un flotteur ne correspondant pas à cette position homologue se situe plus près de l'intersection. Pour lever toute ambiguïté, la condition de coplanarité (quation [1]) est vérifiée pour chaque flotteur candidat. Le flotteur ayant donc le produit scalaire le plus proche de zéro est sélectionné comme l'homologue à conserver.

Cette condition est implémentée dans la fonction *erreur\_coplanarite\_jaune.m* pour les flotteurs jaunes et *erreur\_coplanarite\_orange.m* pour les flotteurs oranges.

A partir de la bonne intersection, on peut remonter au pixel candidat de l'image de « sélection » qui a permis de tracer la droite épipolaire dans l'image « receveuse ». On obtient au final les coordonnées-image des points homologues du flotteur sélectionné dans l'image de « référence ».



*Figure 38 : Intersection des droites épipolaires (Canon) dans l'image « receiveuse ».*

### **III. 3. 5. Modèle mathématique dans le cas de quatre images ou plus**

L'apport d'une quatrième image ou plus ne modifie en rien le processus de la recherche des points homologues. Ce processus de détection reste quasi identique au cas de trois images. Parmi toutes les images à disposition, deux images de base doivent être sélectionnées comme image de « référence » et image « receveuse ». Les autres images sont sélectionnées successivement comme image de « sélection » afin d'identifier les points homologues dans chacune d'entre elles.

Un apport supplémentaire d'images permet par contre d'obtenir un gain en précision sur la position tridimensionnelle des flotteurs. Cela s'explique par le fait que le système d'équations de restitution de la DLT est résolu par moindres carrés. Cet aspect de la restitution 3D est développé dans la section suivante.

## **III. 4. Reconstitution 3D**

La restitution tridimensionnelle consiste à obtenir les coordonnées-monde d'un flotteur à partir de ses coordonnées-image identifiées dans les trois images grâce au modèle géométrique de recherche de points homologues. La reconstruction 3D réalisée dans notre travail inclut les distorsions radiales et tangentielles induites par l'objectif des appareils photographiques. Ces distorsions induisent des erreurs systématiques qui sont corrigées par l'utilisation des 16 paramètres de calibration au lieu des 11 paramètres standards.

Cette étape de restitution est implémentée par la fonction *DLT\_Restitution\_16p\_modif.m*. Cette fonction est principalement issue de la fonction *DLT\_Restitution\_16p.m* implémentée par Liénart (2015). Quelques modifications ont été apportées afin d'intégrer efficacement cette fonction dans notre code (Cfr. II. 3.).

### III. 4. 1. Equations de restitution

En incluant les distorsions optiques ( $\Delta u$  et  $\Delta v$ ), les équations fondamentales [2] et [3] de la DLT se transforment en :

$$u - \Delta u = \frac{L_1x + L_2y + L_3z + L_4}{L_9x + L_{10}y + L_{11}z + 1}$$

$$v - \Delta v = \frac{L_5x + L_6y + L_7z + L_8}{L_9x + L_{10}y + L_{11}z + 1}$$

[24]

Les distorsions optiques ont pour équation :

$$\Delta u = \varepsilon(L_{12}r^2 + L_{13}r^4 + L_{14}r^6) + L_{15}(r^2 + 2\varepsilon^2) + L_{16}\varepsilon\eta$$

$$\Delta v = \eta(L_{12}r^2 + L_{13}r^4 + L_{14}r^6) + L_{15}\eta\varepsilon + L_{16}(r^2 + 2\eta^2)$$

[25]

Avec,  $[\varepsilon, \eta] = [u - PP_{u,0}, v - PP_{v,0}]$

$$r^2 = \varepsilon^2 + \eta^2$$

En mettant en évidence x, y et z dans l'équation [24] et en exprimant ces équations sous forme matriciel, on obtient :

$$\begin{pmatrix} \mu^1 L_9^1 - L_1^1 & \mu^1 L_{10}^1 - L_2^1 & \mu^1 L_{11}^1 - L_3^1 \\ \omega_i^1 L_9^1 - L_5^1 & \omega^1 L_{10}^1 - L_6^1 & \omega^1 L_{11}^1 - L_7^1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \mu^m L_9^m - L_1^m & \mu^m L_{10}^m - L_2^m & \mu^m L_{11}^m - L_3^m \\ \omega^m L_9^m - L_5^m & \omega^m L_{10}^m - L_6^m & \omega^m L_{11}^m - L_7^m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_4^1 - \mu^1 \\ L_8^1 - \omega^1 \\ \vdots \\ L_4^m - \mu^m \\ L_8^m - \omega^m \end{pmatrix}$$

[26]

Avec, m le nombre de caméras

$$[\mu, \omega] = [u - \Delta u, v - \Delta v]$$

Ce système matriciel est résolu par moindre carrés. Cette méthode de résolution est développée dans le mémoire de Liénart (2015)  la section 3.2.2.2.

### III. 4. 2. Correction de la hauteur d'eau

La composante z de la position des flotteurs doit être corrigée de la hauteur émergée des flotteurs à la surface libre du plan d'eau. Cette hauteur est obtenue en appliquant la somme des forces verticales agissant sur le flotteur au repos. Le point d'application des forces se situe au centre du flotteur.

$$\vec{B} - \vec{P} = 0$$

[27]

Avec,  $\vec{B}$  : la poussée d'Archimède

$\vec{P}$  : le poids exercé par le flotteur

L'équation [27] devient :

$$\rho \cdot V_{im} = m$$

$$\rho \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot h_{im} = m$$

[28]

Où,  $\rho$  : masse volumique de l'eau à température et pression standards ( $997 \text{ kg/m}^3$ )

$V_{im}$  : volume immg du flotteur

m : masse du flotteur ( $0.002 \text{ kg}$ )

En mettant l'inconnue, la partie du flotteur immg, en évidence dans l'équation [28], on obtient :

$$h_{im} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot m}{4 \cdot \rho \cdot \pi}} = 0.00783 \text{ m}$$

[29]

En soustrayant le rayon du flotteur ( $0.0085 \text{ m}$ ) par la partie immg du flotteur, on obtient une correction de  $0.00067 \text{ m}$  à appliquer à la composante verticale de la position des flotteurs.

### III. 5. Aspect dynamique

A la suite de cette étape de restitution, la position tridimensionnelle des flotteurs est acquise de manière statique. L'aspect dynamique se traduit par le suivi du même flotteur en reliant les positions tridimensionnelles successives des mêmes flotteurs au cours du temps. On peut dès lors obtenir des trajectoires 3D qui représentent le mouvement des flotteurs à la surface libre de l'écoulement.

### III. 5. 1. Synchronisation des vidéos

La première étape consiste évidemment à synchroniser les trois vidéos. Cette synchronisation des caméras est une étape primordiale dans le traitement des données. Si une erreur de synchronisation survient, la droite épipolaire n'interceptera pas le bon flotteur dans la bande de recherche et le flotteur homologue ne fera pas partie de la série de candidats dans l'image de « sélection ». Cependant, si l'erreur de synchronisation est faible, elle peut être compensée par la bande de recherche.

Deux types d'erreurs de synchronisation peuvent survenir, l'une liée au nombre d'IPS (Images Par Seconde) et l'autre liée à la synchronisation totale des vidéos.

#### III. 5. 1. 1. Erreur de synchronisation liée au nombre d'IPS

Idéalement, le nombre d'IPS de chaque vidéo doit être identique ce qui permettrait d'effectuer la recherche des points homologues sur base d'images parfaitement synchrones. En pratique, les trois appareils photographiques utilisés ne disposent pas du même nombre d'IPS. Les Lumix72 et LumixGH4 possèdent un nombre de 30 IPS en FullHD, alors que le Canon possède un nombre de 25 IPS en FullHD. Il faut donc définir une échelle de temps de référence et associer le frame le plus proche de chaque vidéo à ce temps de référence. L'échelle de temps de référence est établie sur base du *timecode* qui est une référence temporelle associée à chaque frame d'une vidéo. Il s'exprime sous la forme HEURES : MINUTES : SECONDES : FRAMES. L'échelle de temps de référence choisie est le *timecode* du Lumix72 étant donné que cet appareil est également choisi comme référence pour la détection des points homologues. Le *timecode* du lumixGH4 est similaire au *timecode* de référence donc aucune erreur de synchronisation sur les frames vidéo du LumixGH4 n'est présente. Cependant pour le Canon, une erreur de synchronisation est inévitable due à la différence du nombre d'IPS. La modélisation de cette erreur est illustrée par la figure 39.

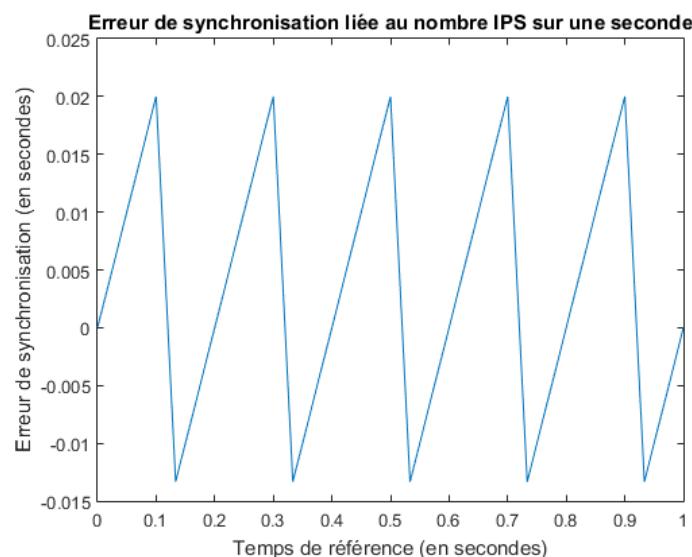


Figure 39 : Erreur de synchronisation du *timecode* du Canon par rapport au *timecode* de référence sur une période d'une seconde.

On peut constater que l'erreur maximale de synchronisation obtenue a une période de 0.2 seconde et est au maximum de l'ordre de 0.02 secondes.

### **III. 5. 1. 2. Erreur totale de synchronisation entre les vidéos**

Un flash lumineux est effectué au début et à la fin de l'expérience dans le but de synchroniser les vidéos entre elles et de contrôler l'erreur totale de synchronisation. La séquence d'images de chaque vidéo débute et se termine donc par un frame contenant un flash lumineux. Le logiciel *Free Video to JPG Converter* est employé pour extraire tous les frames de chaque vidéo. Les résultats de la synchronisation sont exprimés dans le tableau 8.

*Tableau 8 : Synchronisation des vidéos*

	<b>Nombre total de frames extraits</b>	<b>Nombre IPS</b>	<b>Timecode</b>	<b>Temps (en secondes)</b>
<b>Canon</b>	12020	25	00 : 08 : 00 : 20	480.800
<b>Lumix GH4</b>	14410	30	00 : 08 : 00 : 10	480.333
<b>Lumix 72</b>	14410	30	00 : 08 : 00 : 10	480.333

On peut constater que les vidéos des LumixGH4 et Lumix72 sont parfaitement synchronisées entre elles. Par contre, la vidéo du Canon présente une erreur de synchronisation de 0.467 secondes par rapport aux deux autres vidéos sur toute la durée de l'expérience. Cette erreur de synchronisation est répartie *au prorata* du nombre de frames de la vidéo.

$$frames_{ref\_canon} = frames_{canon} + \frac{n * Erreur_{synchronisation}}{n_{total}}$$

[30]

Avec, n : frame initial du Canon

n totale : le nombre totale de frames de la vidéo du Canon

*Erreur<sub>synchronisation</sub>* : erreur de synchronisation du Canon en nombre de frames

*frames<sub>canon</sub>* : frame initial sans erreur de synchronisation

*frames<sub>ref\_canon</sub>* : frame de référence compensé de l'erreur de synchronisation

### **III. 5. 2. Suivi des flotteurs**

L'hypothèse de départ pour apparier les positions tridimensionnelles successives d'un même flotteur au cours du temps est de supposer que la position du même flotteur à l'instant ultérieur sur l'échelle de temps de référence correspond à la plus petite distance qui le sépare de sa position 3D restituée à partir du frame précédent. Cette hypothèse peut être faite car le taux d'échantillonnage temporel est relativement élevé de 30 IPS. La plus petite distance entre le même flotteur correspond donc à la norme du vecteur de déplacement entre deux positions tridimensionnelles successives du flotteur.

$$\|\vec{d}\| = \sqrt{(x_t - x_{t+1})^2 + (y_t - y_{t+1})^2 + (z_t - z_{t+1})^2}$$

[31]

Avec,  $(x_t, y_t, z_t)$  : position tridimensionnelle du flotteur à l'instant t

$(x_{t+1}, y_{t+1}, z_{t+1})$  : position tridimensionnelle du flotteur à l'instant t+1

### III. 6. Synthèse

Le schéma de la figure 40 permet d'avoir une vision globale et récapitulative des développements théoriques exposés dans ce chapitre menant à la détermination des champs de vitesse des flotteurs. Les cases bleues sont associées aux données, les cases jaunes correspondent aux traitements effectués et les cases vertes représentent les résultats obtenus.

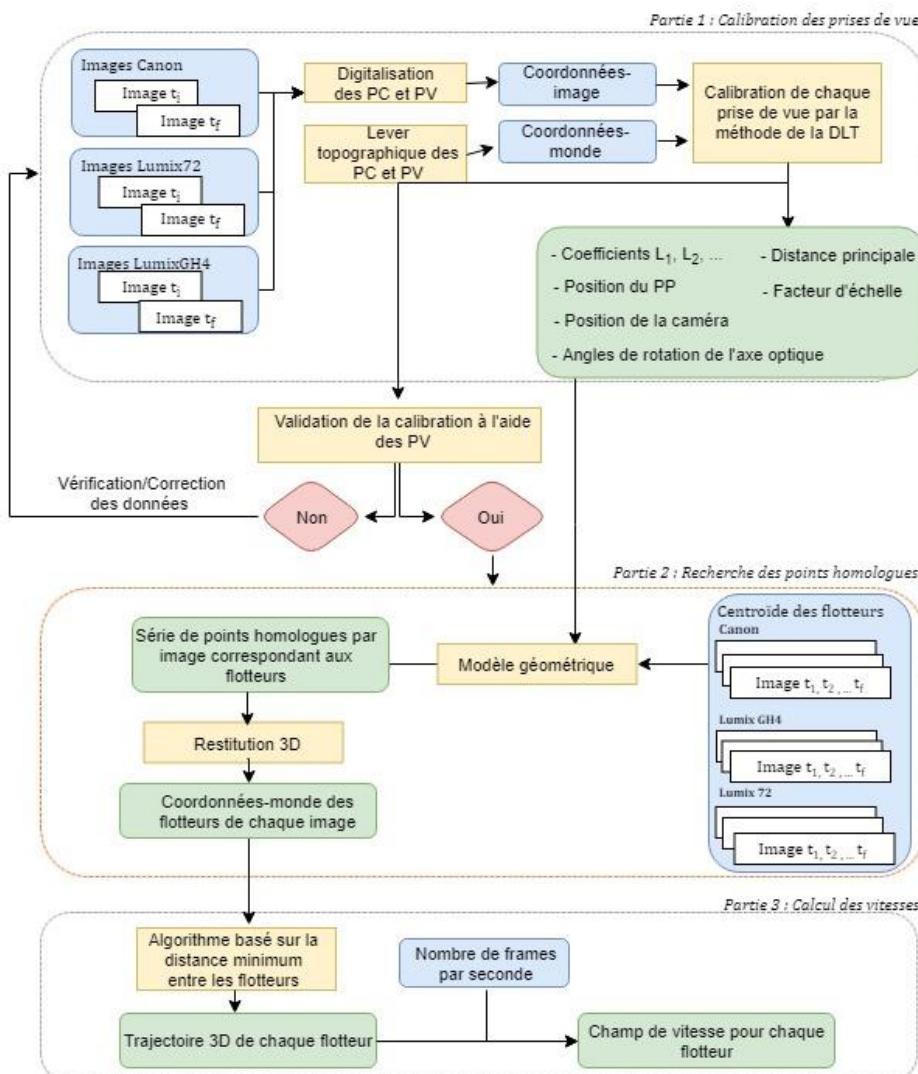


Figure 40 : Schéma synthétique des différentes étapes du traitement permettant de déduire la vitesse des flotteurs.

Ce schéma est transposé d'un point de vue informatique à l'aide de différentes parties développées dans le script principal et d'un certain nombre de fonctions qui sont appelées dans le script principal. La figure 41 permet donc dans un premier temps de visualiser la structure générale du code et dans un deuxième temps de repérer les parties développées dans le cadre de notre mémoire.

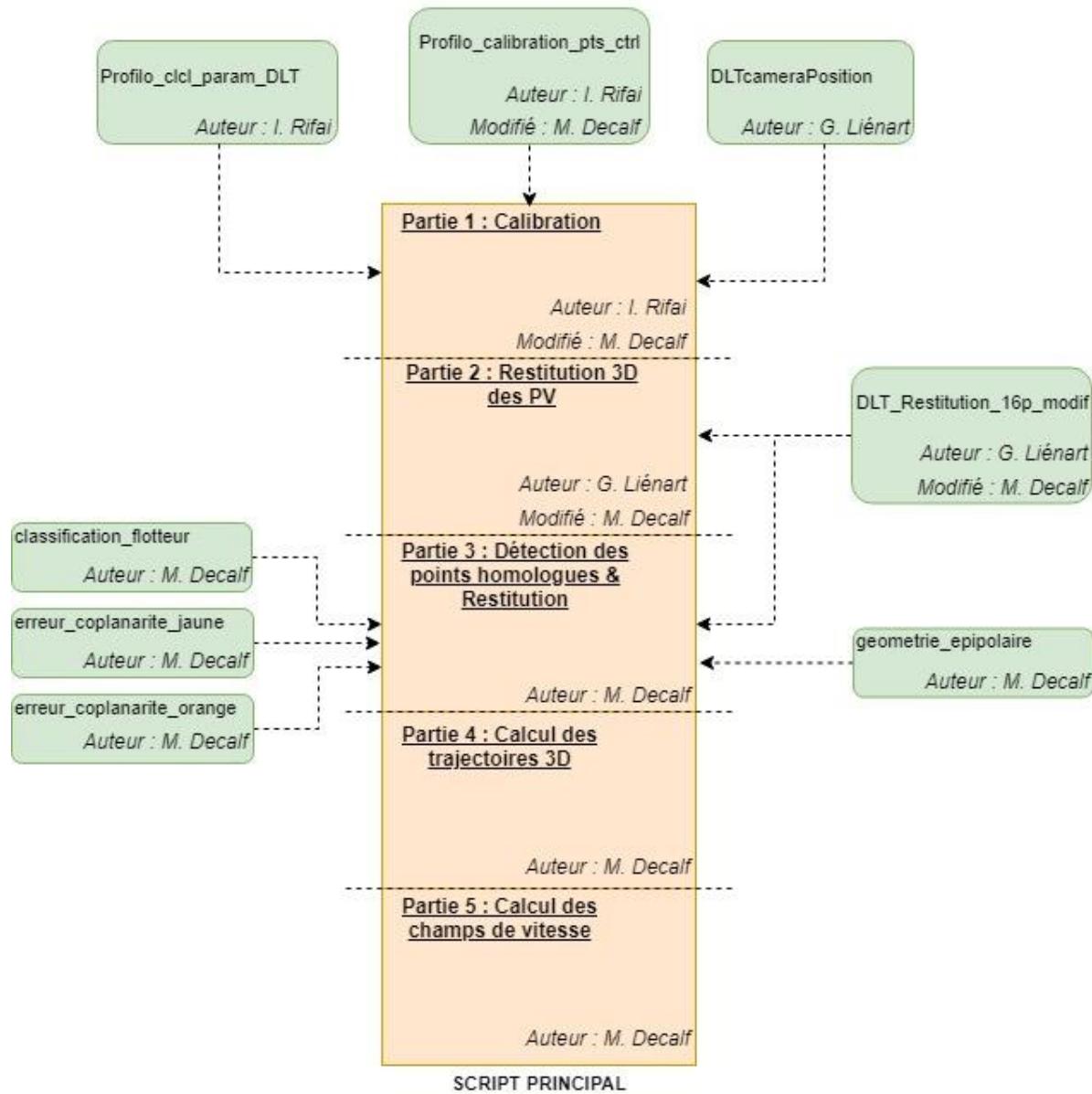


Figure 41 : Structure du code développé comprenant les différentes parties du script principal ainsi que les fonctions relatives à chaque partie du script principal.

## CHAPITRE IV : APPLICATION

### IV. 1. Introduction

Ce chapitre a pour objectif d'appliquer les développements théoriques exposés lors du chapitre précédent à un modèle physique expérimental de rupture de digue. Cette section débute par la mise en place au laboratoire des différents équipements, suivi du protocole d'acquisition des données, de la qualité de la calibration des différentes prises de vue par la DLT et se termine par les différents résultats obtenus ainsi qu'une analyse de ceux-ci.

### IV. 2. Mise en place au laboratoire

#### IV. 2. 1. Réglages des appareils photos

La qualité des frames extraits de chaque vidéo dépend des réglages des trois paramètres (temps de pose, ouverture du diaphragme, sensibilité ISO) constituant le triangle d'exposition en photographie (tableau 9).

- Le temps de pose, appelé également le temps d'exposition, correspond à l'intervalle de temps pendant lequel le capteur est exposé à la lumière lors d'une prise de vue. Le temps de pose est inversement proportionnel à la vitesse d'obturation. Plus le temps de pose est long, plus la vitesse d'obturation est courte. Le temps de pose joue directement sur la netteté de l'image. En effet, un mouvement rapide doit être filmé avec un temps de pose élevé, c'est-à-dire une vitesse d'obturation faible, pour apparaître nette sur un cliché. Dans le cas contraire, le mouvement de l'objet sera flou. Lors de l'expérience, les flotteurs ont un mouvement extrêmement rapide lors de leur passage dans la brèche. Par conséquent, un temps de pose élevé est privilégié.
- L'ouverture du diaphragme correspond à l'ouverture par laquelle la lumière passe dans l'objectif. Plus l'ouverture est grande, plus le chiffre indiqué sur l'appareil photographique est petit. Ce paramètre est à contrebalancer avec le temps de pose pour obtenir une exposition optimale du cliché. Comme le temps de pose est élevé cela signifie que peu de lumière atteint le capteur. Une grande ouverture du diaphragme est donc à privilégier pour qu'un maximum de lumière passe à travers l'objectif. En pratique, les trois appareils photos sont réglés au maximum de leur ouverture.
- La sensibilité ISO doit être réglée au minimum sinon du bruit numérique sera présent sur les clichés. Cependant, les réglages du temps de pose et de l'ouverture ne permettent pas d'obtenir une exposition convenable des clichés si la sensibilité ISO est réglée au minimum. Le nombre d'ISO est donc légèrement augmenté jusqu'à atteindre une exposition jugée suffisante.

Le choix des modes vidéo et du nombre d'IPS dépend principalement des fonctionnalités offertes par les appareils en question.

Les Lumix 72 et GH4 offrent la possibilité de filmer en 4K. Cependant, le Canon est un appareil plus ancien et ne dispose pas de ce mode vidéo plus récent. Par conséquent, le mode vidéo s'est orienté sur le FullHD qui est le second meilleur mode de résolution présent sur les appareils photographiques.

Concernant le nombre d'IPS, les Lumix 72 et GH4 possèdent tous les deux un mode FullHD en 30 ou 60 IPS. Quant au Canon, le nombre d'IPS en FullHD est de 25. Le choix d'IPS s'est donc orienté vers 30 IPS pour les Lumix 72 et GH4 afin de correspondre au maximum au réglage du Canon.

*Tableau 9 : Réglages des différents appareils photographiques*

	<b>Temps de pose</b>	<b>Ouverture du diaphragme</b>	<b>Sensibilité ISO</b>	<b>Mode vidéo</b>	<b>Nombre d'IPS</b>
<b>Lumix 72</b>	200	2.8	200	FullHD (1920x1080)	30
<b>Lumix GH4</b>	200	3.5	400	FullHD (1920x1080)	30
<b>Canon</b>	200	4.0	1400	FullHD (1920x1080)	25

#### **IV. 2. 2. Positionnement des appareils photographiques**

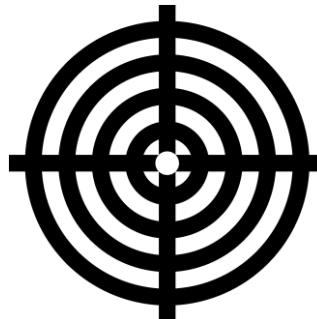
Les vidéos ralisses sont obtenues  partir de trois prises de vues différentes. Plusieurs critères sont  prendre en considération pour trouver l'emplacement optimal des caméras :

- Les points de contrôle (PC) et les points de vérification (PV) disposés sur la digue et sur l'entiert de l'objet d'étude doivent être visibles par chaque caméra.
- Les caméras doivent se situer suffisamment près de la scène pour que celle-ci occupe le maximum de pixels sur les clichés. En effet, la précision est directement influencée par la résolution spatiale.
- La position des caméras doit diversifier au maximum les prises de vue de l'objet.
- Le rapport base/hauteur entre deux centres optiques doit être suffisamment grand afin que les rayons perspectifs se coupent suivant un angle assez ouvert, voisin si possible d'un angle droit.

D'un point de vue théorique, les trois caméras auraient dû être disposées avec un écart de 120° entre chacune autour de la scène suivant des prises de vue quasi-verticales. Cependant, cette disposition n'est pas réalisable  cause de la présence d'une tuyauterie passant  une hauteur 1,12 m au-dessus de la plateforme et  0,9 m de l'extrémité gauche de la digue. Dès lors, la configuration mise en place a tenté de s'écarter le moins possible de la configuration optimale en prenant en compte les contraintes présentes au laboratoire. De ce fait, deux caméras (Lumix72 et Canon) ont été positionnées suivant une prise de vue faiblement oblique et placées de face par rapport  la rupture de la digue. L'autre caméra (Lumix GH4) a été positionnée de manière quasi-verticale  la digue mais décentrée par rapport au centre de la digue.

#### IV. 2. 3. Distribution des points de contrôle et de vérification

Les cibles représentant les PC et les PV sont matérialisés par la figure 42.



*Figure 42 : cibles*

Ces cibles doivent être disposées au temps initial et au temps final de l'expérience. En effet, un volume de calibration englobant non seulement spatialement mais aussi temporellement les points à restituer est indispensable (Liénart, 2015).

Certains critères quant à la distribution et le nombre des cibles sont également à respecter :

- viter la coplanarité des cibles
- Répartition des cibles la plus uniforme possible sur la scène
- viter de restituer les points de vérification en dehors de la zone de calibration
- Plus de 20 à 30 PC n'améliore pas la qualité de la calibration

De manière pratique, le nombre de cibles disposées est récapitulé dans le tableau 10.

*Tableau 10 : Nombres de cibles*

	<b>PC</b>	<b>PV</b>
<b>Temps initial</b>	10	5
<b>Temps final</b>	15	6
<b>Total</b>	<b>25</b>	<b>11</b>



*Figure 43 : Disposition des PC et PV au temps initial (prise du vue du Lumix 72).*



*Figure 44 : Disposition des PC et PV au temps final (prise du vue du Lumix 72).*

En observant les figures 43 et 44, les cibles ont bien été réparties spatialement produisant un volume de calibration. Cependant, ce volume de calibration aurait également dû englober temporellement les cibles. Dans le cadre d'un travail ultérieur, un protocole d'acquisition des données modifié sera présenté. Celui-ci consiste simplement à considérer le temps final de cet essai au temps initial et à répartir quelques cibles après la rupture de la digue pour le temps final.

## **IV. 3. Acquisition des coordonnées-monde et image des PC et PV**

### **IV. 3. 4. Détermination des coordonnées-image**

Les coordonnées-image des cibles sont digitalisées sur les clichés au temps initial et au temps final à l'aide du logiciel *XnView*. Une attention particulière est à porter à l'origine du système qui permet de déterminer les coordonnées-image. L'origine du système dans ce logiciel est déterminée en haut à gauche de l'image. Or dans le développement théorique, l'origine est située en bas à gauche. De ce fait, lors de l'importation des données, l'utilisateur se doit de soustraire les ordonnées des points digitalisés dans le logiciel *XnView* par la hauteur de l'image en pixel.

### **IV. 3. 5. Détermination des coordonnées-monde**

#### **IV. 3. 5. 1. Instruments**

Les coordonnées-monde des cibles sont obtenues par une campagne de levé. Le matériel mis à disposition est le suivant :

- Une station totale
- Une embase
- Un trépied

- Une araignée



*Figure 45 : Matériel à disposition pour le levé topographique. De gauche à droite : embase, trépied, station totale, araignée*

L'utilisation d'une araignée (figure 45) est indispensable lors d'un levé en intérieur pour assurer la stabilité de la station car le trépied ne peut pas être enfoncé dans le sol. Le trépied et l'embase (figure 45) permettent quant à eux de positionner parfaitement la station à la verticale du lieu à l'aide de la nivelle sphérique présente sur l'embase.

#### IV. 3. 5. 2. Levé topographique

La méthode de rattachement appliquée lors de cette campagne de mesure est basée sur des mesures d'angles et de distances. Plus spécifiquement, les coordonnées-monde des cibles sont déterminées à partir d'une station libre. Cette méthode de levé consiste à positionner la station totale à un endroit quelconque sans que la position de la station ne soit matérialisée au sol par un clou. Les coordonnées de cette station sont par la suite déterminées en s'appuyant sur des visés effectuées sur des points d'appuis répartis de manière dispersée autour de la station. Un minimum de trois points d'appui doivent être visibles depuis la station afin de déterminer sa position tridimensionnelle. En pratique, plus de trois points d'appui sont visés afin de déterminer la position de la station par moindre carrés et augmenter ainsi la précision du positionnement. La présence de ces points d'appuis permet également de se recaler dans le même système si une autre campagne de mesure doit être effectuée. Le levé des cibles commence une fois que les visées vers les points d'appuis sont effectuées. La position de chaque cible (PV et PC) est calculée par rayonnement sur base des équations trigonométriques suivantes :

$$x = x_{station} + dist_{horizontale} * \sin G$$

$$y = y_{station} + dist_{horizontale} * \cos G$$

$$z = z_{station} + dist_{oblique} * \cos V$$

[32]

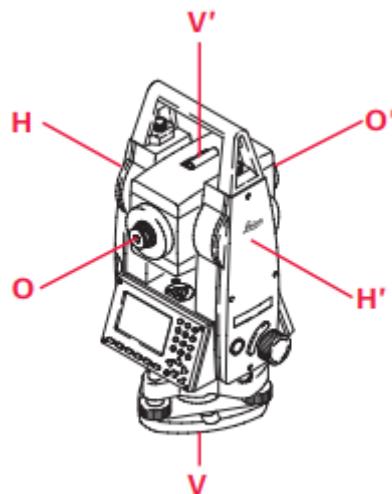
Avec,  $(x_{station}, y_{station}, z_{station})$ : coordonnées locales de la station

V : angle vertical par rapport au zénith

G : gisement (orientation par rapport à l'axe y du référentiel choisi)

#### **IV. 3. 5. 3. Correction des mesures**

Les mesures topographiques sont entachées d'erreurs systématiques qui peuvent être compensées en appliquant de bonnes pratiques de mesure. Idéalement, la station totale doit répondre aux exigences suivantes :



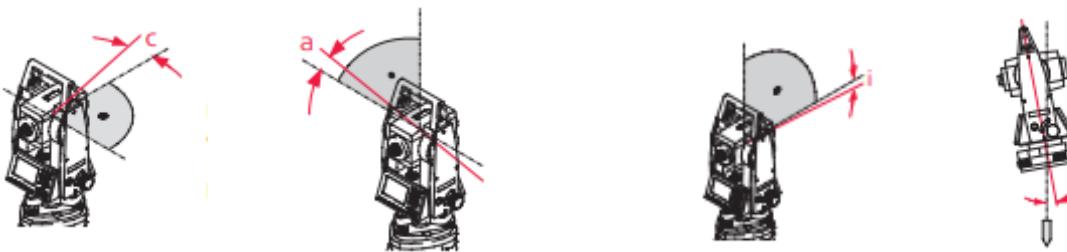
*Figure 46 : Axes d'une station totale  
(Source : « Leica »)*

- L'axe principal (VV') doit être vertical
- L'axe secondaire (HH') doit être perpendiculaire à l'axe principal
- L'axe optique (OO') doit être perpendiculaire à l'axe secondaire

Si ces exigences ne sont pas respectées, une série d'erreurs systématiques s'ajoutent aux mesures initiales, illustrées à la figure 47.

- Une erreur de collimation horizontale (c) qui correspond à l'écart à angle droit entre l'axe optique et l'axe secondaire
- Une erreur de tourillonnement (a) qui correspond à l'écart à angle droit entre l'axe principal et l'axe secondaire.
- Une erreur de collimation verticale (i) qui représente l'écart obtenu avec un angle droit et l'angle entre l'axe optique et l'axe principal pour un visé à l'horizontale.

- Une erreur de mise en station correspondant à l'inclinaison de la station par rapport à l'axe vertical.



*Figure 47 : De gauche à droite : erreur de collimation horizontale, erreur de tourbillonnement, erreur de collimation verticale et erreur de mise en station. (Source : « Leica »)*

Pour s'affranchir des trois premières erreurs, un retournement de l'axe de visé, appelé double retournement, est effectué pour chaque visée vers les cibles de calibration et de vérification. Cependant, l'erreur de mise en station est considérée comme une erreur accidentelle et ne peut pas être corrigée.

Une erreur quant à la stabilité de la station peut également survenir pendant la durée du levé. Pour cela, une visée de référence est établie au début du levé sur un point fixe et une seconde visée sur ce point est effectuée à la fin du levé pour contrôler la stabilité de la station. Si la station a bougé, la différence angulaire entre les deux visés est compensée au prorata du nombre de mesures réalisées pendant le levé.

Tous les traitements relatifs aux calculs topographiques sont réalisés à l'aide du logiciel Covadis.

#### IV. 4. Protocole d'acquisition des données

La procédure d'acquisition des données dans le cadre de ce travail est la suivante :

- Positionnement des PC et des PV au temps initial
- Lever à la station totale des PC et des PV au temps initial
- Mise en place des trois appareils photographiques
- Enclenchement d'un film vidéo de quelques secondes
- Construction de la digue et de la brèche en tassant plusieurs fois de manière verticale et oblique pour éviter un problème de stabilité de la digue pendant l'expérience
- Positionnement des PC et des PV au temps final
- Lever à la station totale des PC et des PV au temps final
- Enclenchement d'un film vidéo de quelques secondes
- Début de l'expérience avec des paliers à 10, 20 et 30 m<sup>3</sup>/s et stabilisation du niveau d'eau à chaque palier
- Enclenchement des films vidéo
- Flash lumineux
- Palier à 40 m<sup>3</sup>/s et stabilisation du niveau d'eau.

- Dissémination homogène et continue des flotteurs à la surface de l'eau pendant toute la durée de l'expérience
- Fin de l'expérience
- Flash lumineux
- Arrêt des films vidéo

L'enclenchement d'un film vidéo de quelques secondes au temps initial et au temps final pour filmer les PC et les PV permet de s'assurer que le capteur est utilisé à la même résolution en comparaison avec les films vidéo réalisés pendant l'expérience.

Différents paliers sont effectués afin d'éviter qu'une onde de choc se produise et ne détruise la digue. Le gabarit de la digue (Cfr. Section I. 4. 2.) et le débit injecté sont sélectionnés de manière à réaliser le même essai qu'un autre étudiant (Rousseau, 2018) travaillant sur le même objet d'étude car certaines données seront reprises ultérieurement.

Cependant, comme cité précédemment, le volume de calibration doit également englober les cibles de manière temporelle. De ce fait, les étapes à suivre pour l'acquisition des données en mode dynamique dans le cadre d'un travail ultérieur sont les suivantes :

- Construction de la digue et de la brèche en tassant plusieurs fois de manière verticale et oblique pour éviter un problème de stabilité de la digue pendant l'expérience
- Positionnement des PC et des PV au temps initial
- Lever à la station totale des PC et des PV au temps initial
- Mise en place des trois appareils photographiques
- Enclenchement d'un film vidéo de quelques secondes
- Début de l'expérience avec des paliers à 10, 20 et 30 m<sup>3</sup>/s et stabilisation du niveau d'eau pour chaque palier
- Enclenchement des films vidéo
- Flash lumineux
- Palier à 40 m<sup>3</sup>/s et stabilisation du niveau d'eau.
- Dissémination homogène et continue des flotteurs à la surface de l'eau pendant toute la durée de l'expérience
- Fin de l'expérience
- Flash lumineux
- Arrêt des films vidéo
- Positionnement des PC et des PV au temps final
- Lever à la station totale des PC et des PV au temps final
- Enclenchement d'un film vidéo de quelques secondes

## IV. 5. Calibration des prises de vue

### IV. 5. 1. Indicateurs de qualité de la calibration

Il est important dans un premier temps de vérifier la qualité de la calibration de chaque prise de vue de l'expérience avant d'analyser les résultats obtenus dans notre mémoire.

Le premier indicateur de la qualité de la calibration est la *Root Mean Square Error* (RMSE) calculée sur base des points de contrôle (PC) (quation [33]). Cet indicateur permet d'évaluer l'incertitude de la calibration pour chaque PC sur base des écarts de leurs coordonnées-image digitalisés par l'utilisateur et de leurs re projection en coordonnées-image sur base des paramètres de calibration  $L_i$  et de leurs coordonnées-monde.

Le deuxième indicateur de la qualité de la calibration est la RMSE calculée sur base des points de vérification (PV) (quation [34]). Cet indicateur est basé sur la différence entre les positions calculées ( $\hat{x}_i, \hat{y}_i, \hat{z}_i$ ) par l'algorithme de restitution et les positions déterminées dans le système-monde ( $x_i, y_i, z_i$ ).

$$RMSE_{calibration} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{\varepsilon_{u_i}^2 + \varepsilon_{v_i}^2}$$

[33]

Avec,  $\varepsilon_{u_i} = u_i - \frac{L_1 x_i + L_2 y_i + L_3 z_i + L_4}{L_9 x_i + L_{10} y_i + L_{11} z_i + 1}$

$$\varepsilon_{v_i} = v_i - \frac{L_1 x_i + L_2 y_i + L_3 z_i + L_4}{L_9 x_i + L_{10} y_i + L_{11} z_i + 1}$$

n = le nombre de PC utilisé pour la calibration de la prise de vue

$$RMSE_{Restitution} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{\varepsilon_{x_i}^2 + \varepsilon_{y_i}^2 + \varepsilon_{z_i}^2}$$

[34]

Avec,  $\varepsilon_{x_i} = \hat{x}_i - x_i$

$$\varepsilon_{y_i} = \hat{y}_i - y_i$$

$$\varepsilon_{z_i} = \hat{z}_i - z_i$$

n = le nombre de PV utilisé pour la calibration de la prise de vue

### IV. 5. 2. Résultats

La RMSE de la calibration est illustrée par les figures 48 à 50 pour les trois prises de vue de l'expérience. La RMSE de la restitution est représentée à la figure 51.

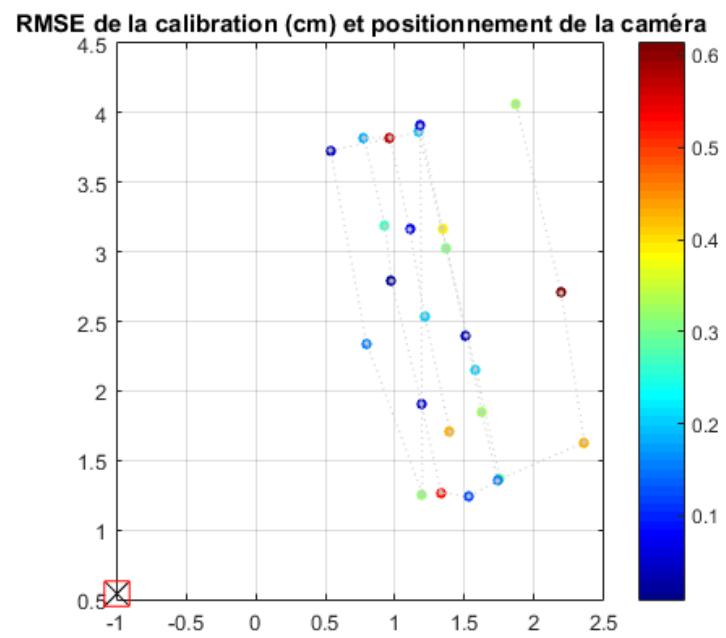


Figure 48 : RMSE de chaque point de calibration issu de la prise de vue du Canon.

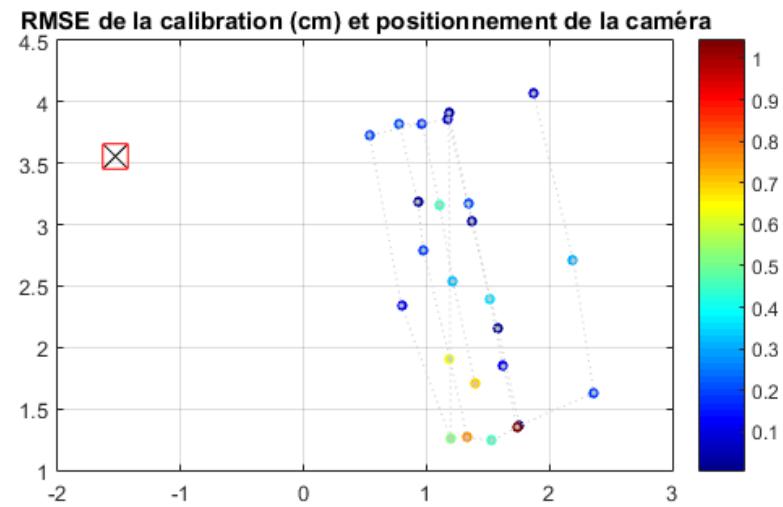
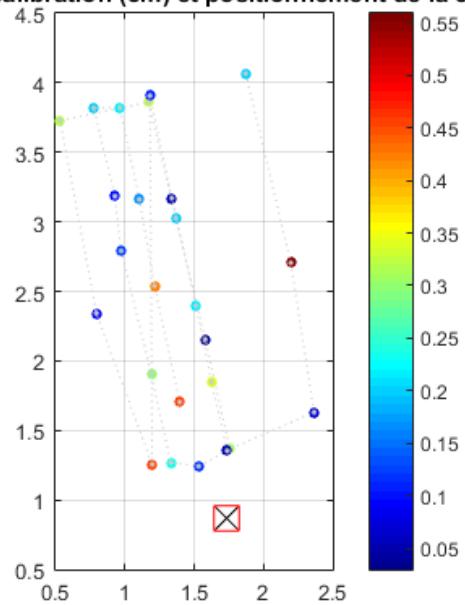
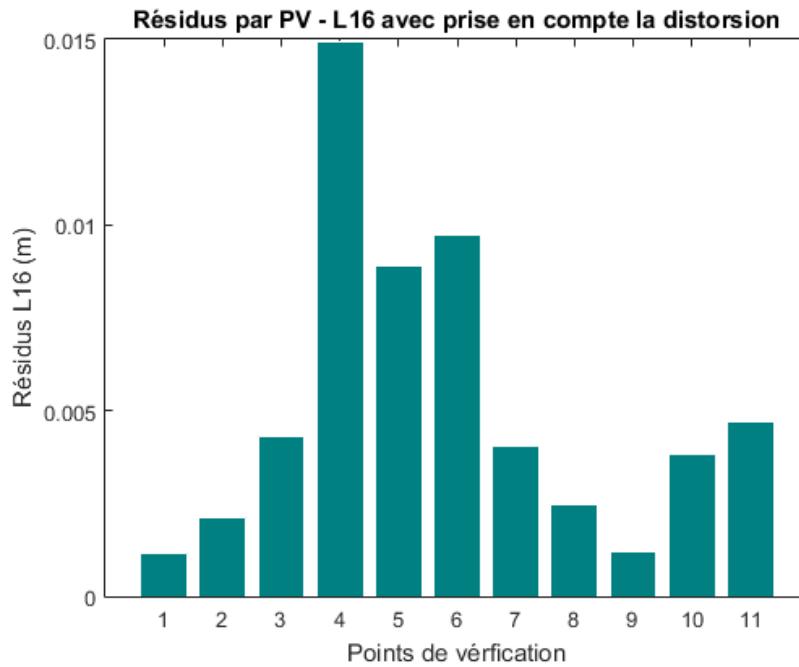


Figure 49 : RMSE de chaque point de calibration issu de la prise de vue du Lumix72.

**RMSE de la calibration (cm) et positionnement de la caméra**

*Figure 50 : RMSE de chaque point de calibration issu de la prise de vue du LumixGH4.*

*Figure 51 : RMSE de chaque point de vérification.*

On peut constater sur base des figures 48 à 50 que la calibration des prises de vue est effectuée correctement avec des rsiduals majoritairement compris entre 0 et 5 mm. Néanmoins, la qualité de la calibration est basée sur des points qui ont permis de déterminer les paramètres  $L_i$  de la calibration. La RMSE sur des points indépendants de la calibration tels que les PV est un choix plus judicieux pour

estimer la qualité de la calibration. Le résultat de la RMSE sur base des 11 PV est illustré à la figure 51. On peut remarquer que la moyenne de ces valeurs est de l'ordre de 5.215 mm. La valeur maximale de 15 mm correspond à un PV situé au bord du volume de calibration et le pouvoir d'extrapolation de l'algorithme de restitution de la DLT est jugé peu consistant.

## IV. 6. Résultats et analyses

Les résultats exposés dans cette section seront extraits sur trois périodes de temps différentes au cours de l'expérience. Le premier résultat sera extrait juste après la surverse, le deuxième résultat sera extrait lorsque l'écoulement commence à former un chenal à l'endroit de la brèche initiale et le dernier résultat sera extrait vers la fin de l'expérience lors de la formation d'un canal. Ce choix va permettre de mieux comprendre le processus d'érosion qui engendre la formation et la propagation de la brèche.

### IV. 6. 1. Hauteur du plan d'eau

Dans un premier temps, il est nécessaire de remédier au manque de représentativité spatiale inhérent au faible nombre de flotteurs disséminés à la surface du plan d'eau. Pour rappel, le coût élevé de ce matériel de pêche en grande quantité a été un facteur limitant. Une solution à ce problème est de considérer une période de temps suffisamment courte pendant laquelle la hauteur du plan d'eau est jugée constante. Cela va donc permettre de densifier spatialement l'échantillonnage des données.

Dans le cadre du mémoire de Rousseau (2018) au laboratoire HECE, un graphique de la hauteur d'eau (figure 52) est obtenu pour les mêmes conditions expérimentales, c'est-à-dire pour le même gabarit de digue et pour le même débit. Ce graphique est basé sur des données récoltées par trois sondes à ultrasons positionnées dans le canal principal. La hauteur du plan d'eau et le temps sont exprimés de manière adimensionnelle. Pour plus d'informations concernant ces paramètres adimensionnels, le chapitre 6 du mémoire de Rousseau (2018) expose la description de ces différents paramètres adimensionnels.

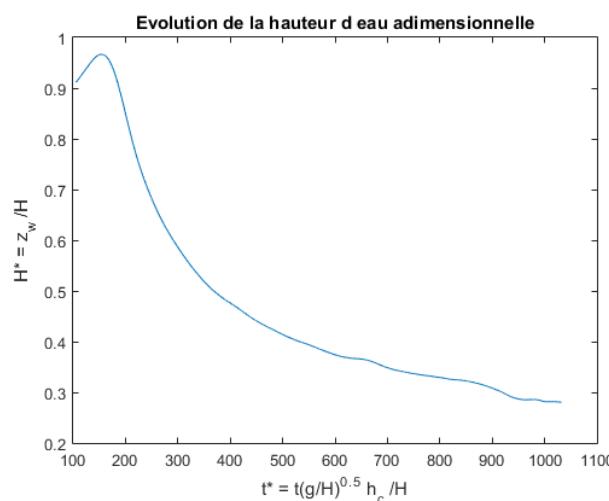


Figure 52 : Evolution de la hauteur d'eau adimensionnelle (Données : Rousseau, 2018)

On peut constater que le niveau du plan d'eau évolue relativement vite au début de l'expérience lors de la formation de la brèche alors que le niveau du plan d'eau est plus stable vers la fin de l'expérience. Sur base de ces constatations, les trois périodes de temps sont sélectionnées.

- Le premier résultat (période 1) est extrait moins d'une minute après la surverse sur une période 2 secondes.
- Le deuxième résultat (période 2) est extrait approximativement 3 minutes après la surverse sur une période de 10 secondes.
- Le troisième résultat (période 3) est extrait approximativement 7 minutes après la surverse sur une période de 10 secondes également.

Le maximum de la fonction à la figure 52 correspondant au début de la surverse est repéré sur la séquence d'images de notre expérience selon un intervalle de confiance de 5 à 10 secondes. Sur base de cette identification, les trois intervalles de temps sélectionnés précédemment sont représentés sur le graphique de la hauteur d'eau à la figure 53.

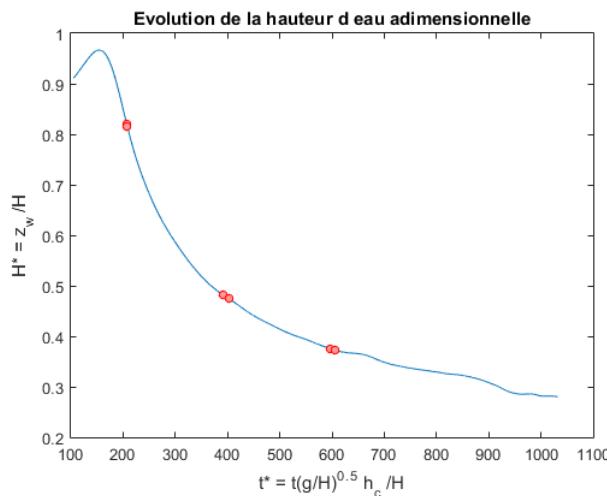


Figure 53 : Identification des 3 périodes de temps choisies avec leurs débuts et leurs fins.

Le tableau 11 reprend les bornes de la hauteur d'eau des intervalles de temps choisis ainsi que la variation maximale que l'on peut observer sur la composante z des flotteurs au niveau du canal principal. On peut constater que la variation maximale observée est de 0.0018 mètre ce qui renforce l'hypothèse de stabilité du plan d'eau considéré pour extraire les résultats sur ces trois périodes.

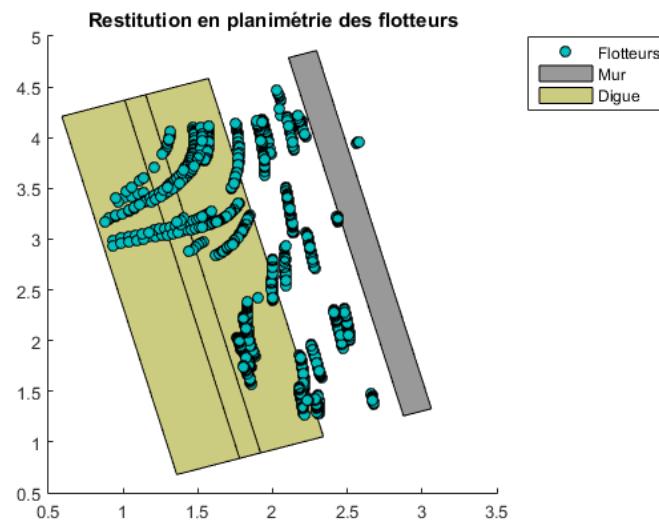
Tableau 11 : identification de l'intervalle de variation de la hauteur du plan d'eau pour les 3 périodes de temps sélectionnées.

	Borne sup. adimensionnelle	Borne inf. adimensionnelle	Borne sup. en mètres	Borne inf. en mètres	Différence en mètres	Altitude moyenne en mètres
Période 1	0.821	0.816	0.2463	0.2448	0.0015	0.246
Période 2	0.481	0.475	0.1443	0.1425	0.0018	0.143
Période 3	0.375	0.372	0.1125	0.1116	0.0009	0.112

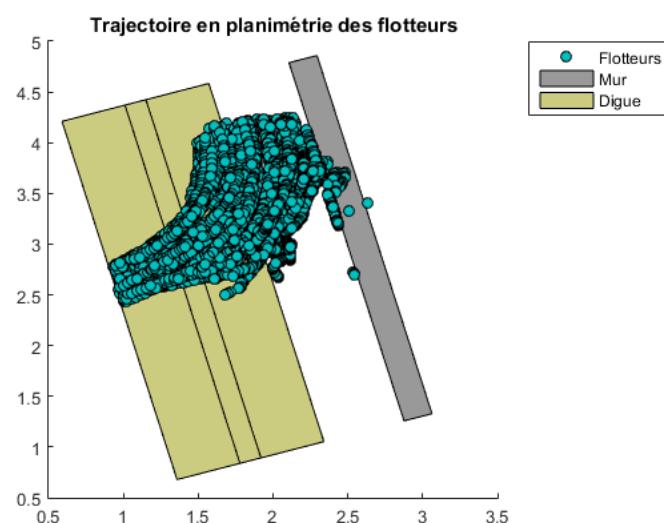
## IV. 6. 2. Restitution 3D

### IV. 6. 2. 1. Résultats

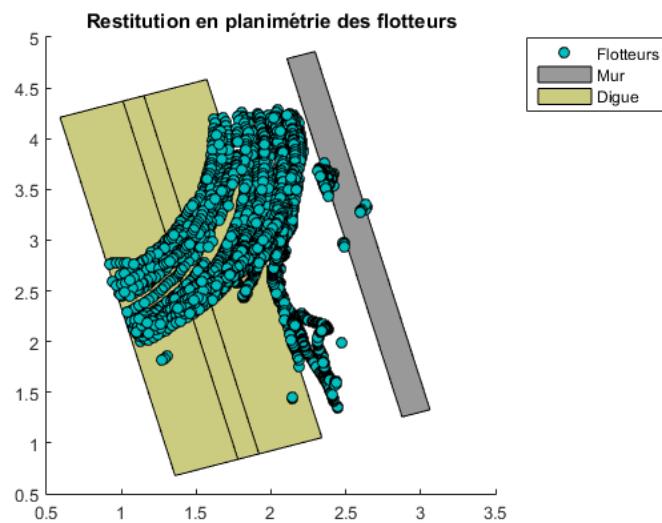
Les six résultats suivants (figures 54 à 59) représentent la position tridimensionnelle des flotteurs sur les trois périodes de temps évoquées précédemment en vue planimétrique et puis en vue altimétrique. Tous les résultats sont extraits à un taux d'échantillonnage temporel de 30 IPS.



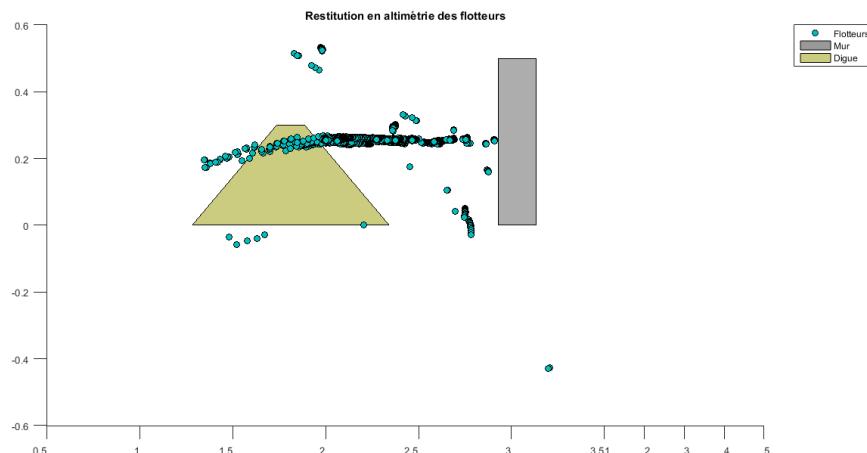
*Figure 54 : Restitution en planimétrie des flotteurs de la période 1*



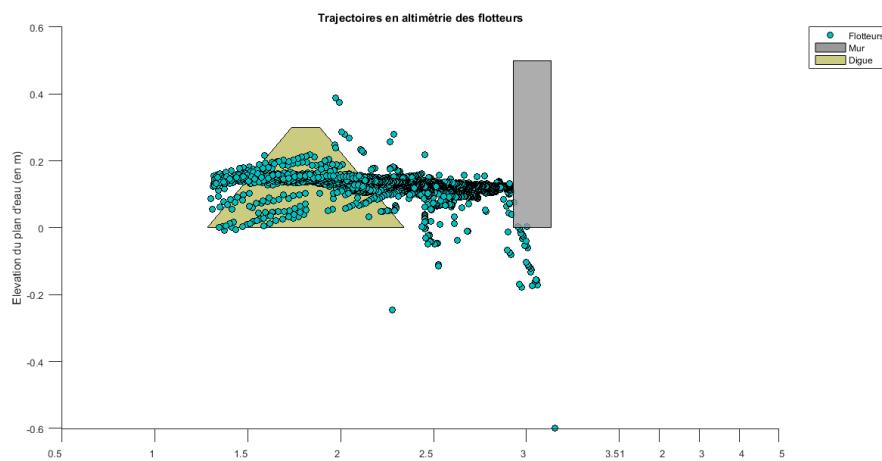
*Figure 55 : Restitution en planimétrie des flotteurs de la période 2*



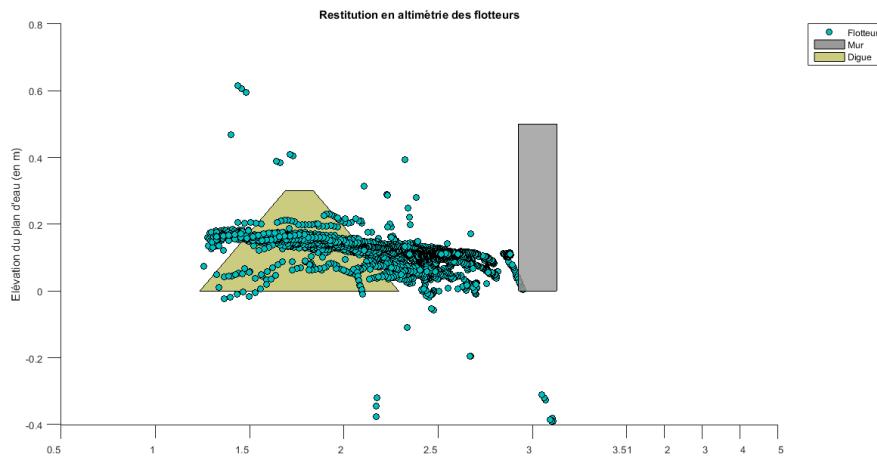
*Figure 56 : Restitution en planimétrie des flotteurs de la période 3*



*Figure 57 : Restitution en altimétrie des flotteurs de la période 1*



*Figure 58 : Restitution en altimétrie des flotteurs de la période 2*



*Figure 59 : Restitution en altimétrie des flotteurs de la période 3*

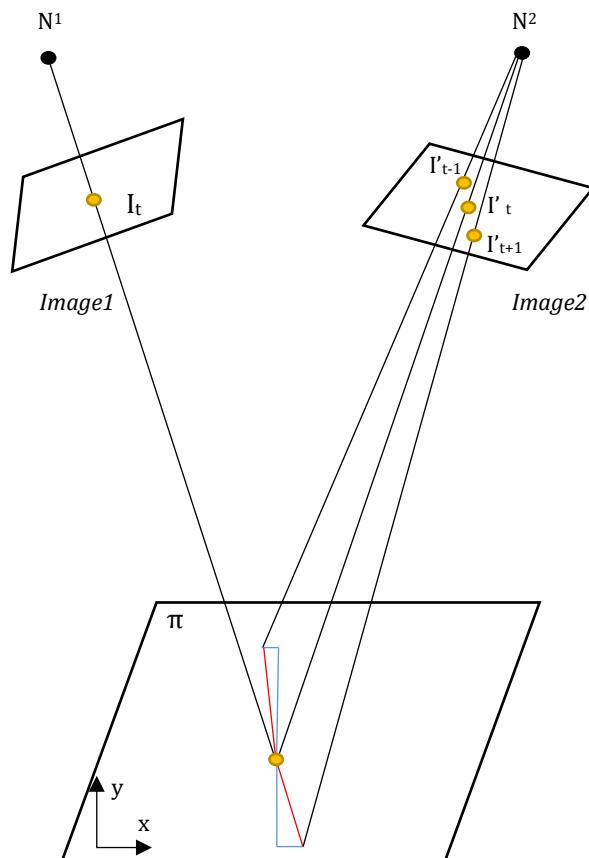
On peut déjà percevoir sur les différents résultats en planimétrie que les positions successives des flotteurs dessinent des trajectoires dans le canal principal et dans l'ouverture de la brèche. Sur les résultats en altimétrie, on peut constater que les altitudes des flotteurs de la figure 57 extrates sur une période de 2 secondes sont cohérentes avec la diminution de la hauteur du plan d'eau au niveau de la brèche et avec la hauteur moyenne dans le canal principal du tableau 11. Cependant sur les figures 58 et 59, on peut remarquer de nombreuses erreurs de restitution sur l'altimétrie des flotteurs extrates sur une période de 10 secondes. On peut noter qu'une majorité des erreurs de restitution des figures 58 et 59 semblent suivre des trajectoires au niveau de la brèche. Les origines de ces erreurs ainsi qu'une analyse statistique seront exposées dans les sections suivantes.

#### IV. 6. 2. 2. Sources d'erreurs

Cinq sources d'erreurs à la restitution 3D des flotteurs peuvent être ciblées :

- Les valeurs seuils de la classification des flotteurs ne sont pas exactement identiques sur toute la zone de l'image. Il se peut que certains flotteurs soient détectés uniquement par quelques pixels et ceux-ci peuvent disparaître à la suite du filtre d'érosion lors du processus de classification des flotteurs.
- La digitalisation du plan d'eau et de la digue demande à l'utilisateur au début du traitement n'est pas réalisée de manière parfaitement identique sur les différentes prises de vue. Cela signifie que le flotteur homologue du flotteur présent dans l'image de « référence » n'est pas encore forcément présent dans l'image de « sélection » ou « receveuse ». La détection du point homologue se fait donc avec un autre flotteur potentiellement présent sur la droite épipolaire ou dans la bande de recherche autour de cette droite.
- L'erreur de synchronisation liée au nombre d'IPS constitue une importante source d'erreur car le processus de détection des points homologues ne s'effectue pas sur des images parfaitement synchrones. Cela a pour conséquence que l'orientation relative des gerbes de

rayons perspectifs ne s'est pas effectuée correctement. Les rayons homologues sont donc gauches dans l'espace plutôt que coplanaires ce qui induit la présence d'une parallaxe résiduelle composée d'une parallaxe longitudinale (selon l'axe des x) et d'une parallaxe transversale (selon l'axe des y). Avant d'expliquer les erreurs de restitution qu'occasionne l'erreur de synchronisation, il est nécessaire de rappeler que cette erreur de synchronisation est modélisée à la section III. 5. 1. 1. et qu'elle peut être soit positive, soit négative. Lorsque l'erreur est positive cela signifie que le processus de détection de points homologues s'effectue avec une image de la vidéo du Canon prise avec un certain temps d'avance comparé à l'échelle de temps de référence. A l'inverse quand l'erreur de synchronisation est négative, cela signifie que l'image de la vidéo du Canon est prise avec un certain temps de retard comparé à l'échelle de temps de référence. Ce temps de retard ou d'avance implique que la position du flotteur est décalée en fonction de sa vitesse sur l'image du Canon. Sachant après plusieurs traitements que la vitesse des flotteurs dans la brèche est de maximum 2m/s et que les images sont extrates à un taux de 30 IPS, la position des flotteurs peut donc varier d'environ 6 cm pour deux images successives. Notons que cette erreur est d'autant plus significative lors de la restitution des flotteurs au niveau de la brèche que lors de la restitution des flotteurs dans le canal principal où les vitesses sont relativement inférieures. Cette erreur de synchronisation liée au nombre d'IPS est modélisée géométriquement par la figure 60. Rappelons également que cette erreur de restitution ne concerne pas la troisième image du LumixGH4 car cet appareil est parfaitement synchronisé avec l'appareil de référence, le Lumix72.

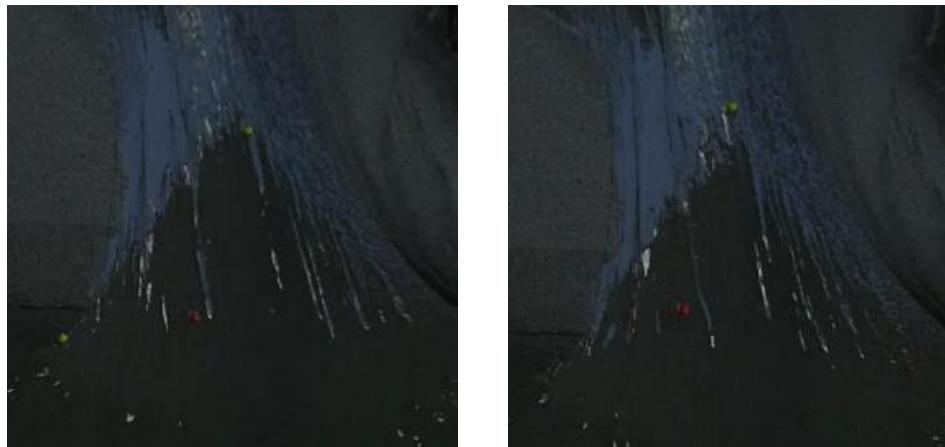


*Figure 60 : Représentation géométrique de l'erreur de restitution.*

Sur le schéma de la figure 60, l'image 1 correspond  une image de référence du Lumix72 et l'image 2 correspond  une image du Canon. La position du flotteur dans l'image 1 est noté  $I_t$  et la position parfaitement synchrone du flotteur homologue dans l'image 2 est noté  $I'_t$ . La position  $I'_{t-1}$  correspond  une position prise avec une erreur de synchronisation négative et la position  $I'_{t+1}$  correspond  une position prise avec une erreur de synchronisation positive. On peut constater que les rayons perspectifs  $\overrightarrow{N^1I_t}$  et  $\overrightarrow{N^2I'_{t-1}}$  et que les rayons perspectifs  $\overrightarrow{N^1I_t}$  et  $\overrightarrow{N^2I'_{t+1}}$  provoquent une variation de la parallaxe résiduelle (en rouge) suivant une erreur positive ou négative de synchronisation.

A la suite de cette constatation, on peut remarquer que les positions des flotteurs mal restitués dans la brèche des figures 58 et 59 suivent des trajectoires parfois supérieures ou inférieures au niveau du plan d'eau attendu dans la brèche. Le graphique 39 de la modélisation de l'erreur de synchronisation nous rappelle que l'erreur positive de synchronisation est plus importante (0.02 seconde) que l'erreur négative de synchronisation (-0.0133 seconde) et que ces erreurs sont périodiques (5 occurrences par seconde pour l'erreur positive et 5 occurrences par seconde pour l'erreur négative). On peut supposer que les trajectoires supérieures ou inférieures au plan d'eau sont provoquées par une erreur de synchronisation positive ou négative. Sachant que le passage d'un flotteur dans la brèche correspond approximativement  plus d'une seconde, nous devrions observer de manière régulière pour une trajectoire environ 5 restitutions surestimées et 5 restitutions sous-estimées de la position du flotteur. Ce constat n'est pas facilement visible sur les figures 58  61 mais on peut néanmoins apercevoir cette tendance générale au niveau de la brèche.

- L'erreur de synchronisation totale entre les vidéos qui est également  combiner avec l'erreur de synchronisation liée au nombre d'IPS.
- Les occultations qui résultent du principe que les objets d'une même scène ne sont pas tous visibles lors de prises de vue différentes. Cette source d'erreur aurait pu être évitée avec des prises de vue légèrement obliques, centrées au-dessus de la digue et positionnées  120 degrés d'écart chacune. Cependant en pratique, la position des caméras a dû être ajustée pour éviter une conduite passant par-dessus le modèle expérimental au laboratoire. Cette source d'erreur peut provoquer une mauvaise sélection du flotteur homologue sur la droite épipolaire. Un exemple d'occultation est illustré  la figure 61.



*Figure 61 : Exemple d'une occultation lors du passage dans la brèche de plusieurs flotteurs (LumixGH4).*

Il est important de préciser que ces erreurs de restitution peuvent provoquer des erreurs en cascade dans la chaîne de traitement ultérieurement.

#### IV. 6. 2. 3. Analyse par surface de tendance

Une analyse par surface de tendance consiste à ajuster une surface polynomiale aux valeurs observées afin d'en dégager une tendance générale. Ce modèle de régression en 3 dimensions est donné par l'équation 34.

$$\hat{z}_i = \sum_{k=0}^d \sum_{j=0}^{d-k} \alpha_{k,j} x_i^k y_i^j$$

[35]

Avec,  $d$  : le degré du polynôme

$\hat{z}_i$  : la position attendue

Une équation d'ordre 4 est choisie dans notre travail pour s'ajuster le plus possible à l'échantillonnage des positions des flotteurs. Cette surface est ajustée au nuage de points par le critère des moindres carrés qui consiste à minimiser la somme des carrés des écarts (quation [35]). En l'occurrence, les écarts correspondent aux résidus du modèle de régression par rapport aux données initiales ( $z_i$ ).

$$S = \sum_i (z_i - \hat{z}_i)^2$$

[36]

En pratique, cela revient à annuler des dérivées partielles de  $S$  par rapport aux 15 coefficients de l'équation d'ordre 4.

Les résultats de l'ajustement par surface de tendance, les résidus par rapport au modèle ainsi qu'un histogramme des résidus extraits pour les 3 périodes sont représentés par les figures 62 à 70.

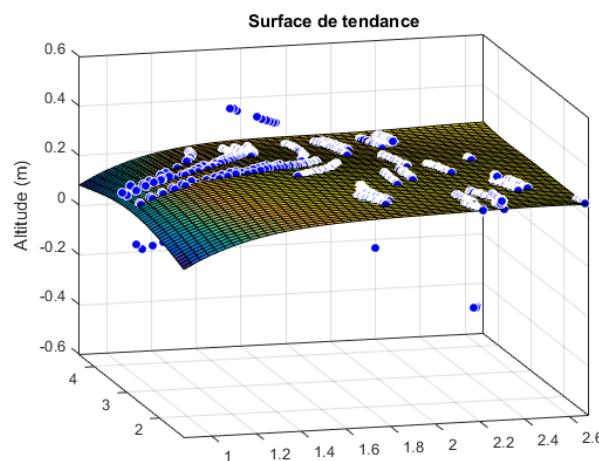


Figure 62 : Surface de tendance de la période 1.

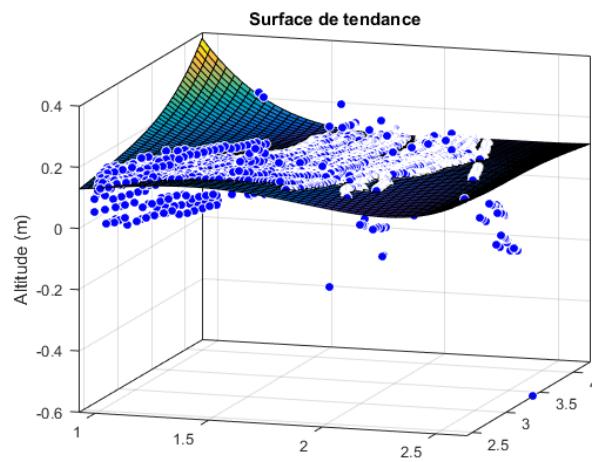


Figure 63 : Surface de tendance de la période 2.

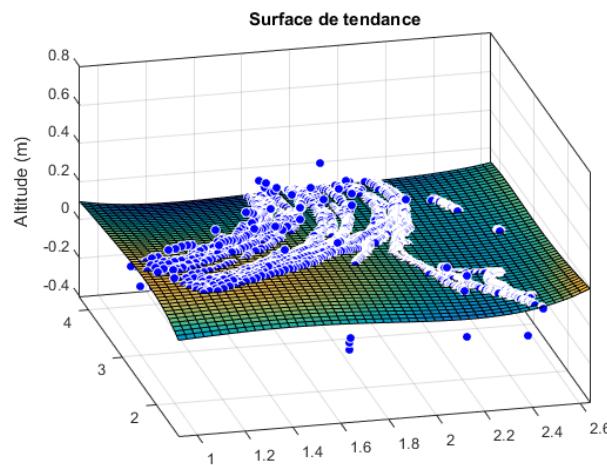
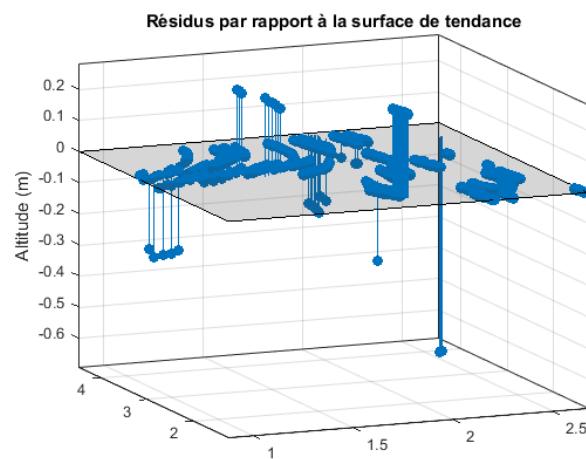
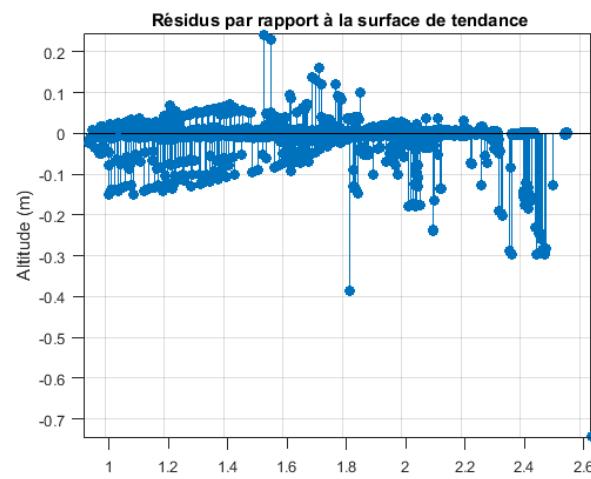


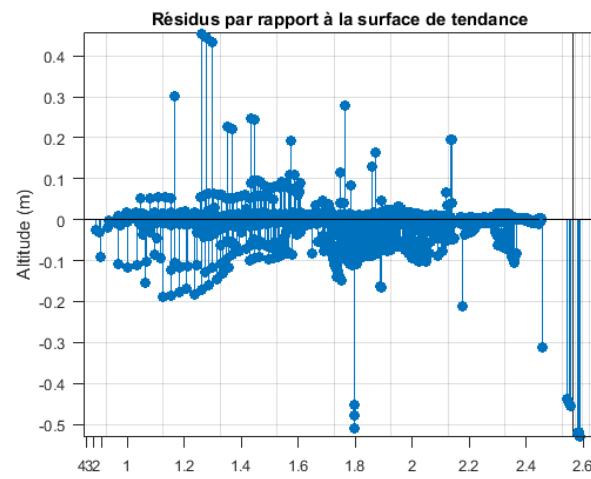
Figure 64 : Surface de tendance de la période 3.



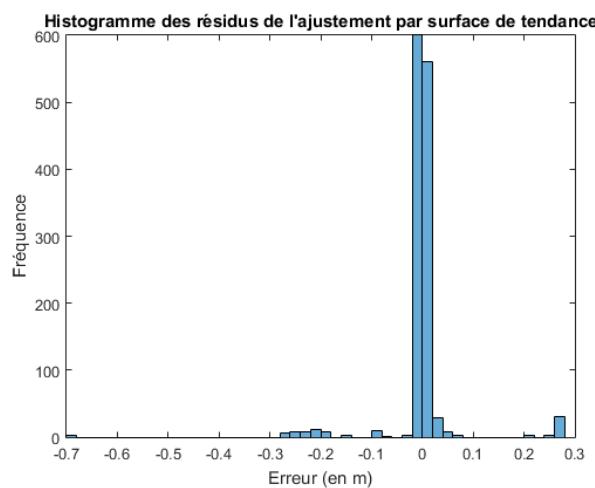
*Figure 65 : Résidus par rapport à la surface de tendance 1.*



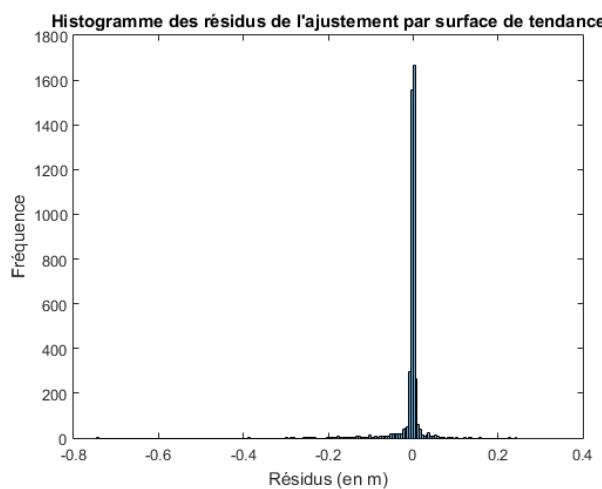
*Figure 66 : Résidus par rapport à la surface de tendance 2.*



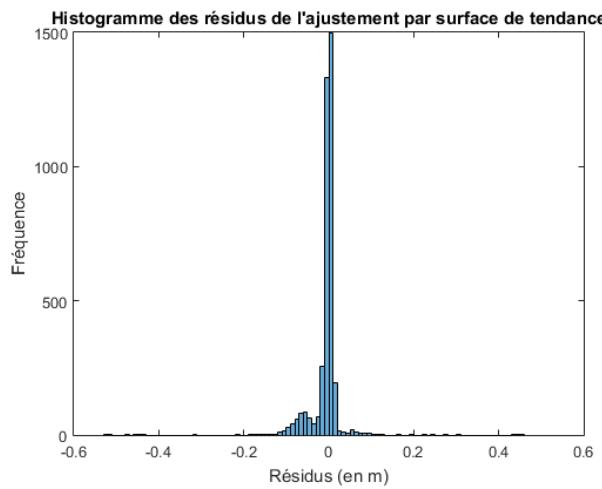
*Figure 67 : Résidus par rapport à la surface de tendance 3.*



*Figure 68 : histogramme des rsiduals par rapport à la surface de tendance de la période 1.*



*Figure 69 : histogramme des rsiduals par rapport à la surface de tendance de la période 2.*



*Figure 70 : Histogramme des rsiduals par rapport à la surface de tendance de la période 3.*

On peut constater pour les figures 62 à 64 que la surface de tendance s'ajuste relativement bien aux données malgré les certaines restitutions aberrantes. Pour la figure 62, la diminution du plan d'eau au niveau de la brèche est correctement modélisée par la surface de tendance. Lors de la formation d'un chenal à la période 2, le niveau du plan d'eau dans la brèche est quasiment identique au niveau du plan d'eau dans le canal principal. Ce constat est également correctement modélisé par la surface de tendance de la figure 63. Concernant la période 3, on peut remarquer que la surface de tendance modélise une remontée du niveau d'eau au niveau de la brèche. Cela est principalement dû au faible niveau d'eau dans le canal principal (Cfr. Tableau 11) durant cette période et à la présence du drain qui a pour effet de surélever le niveau d'eau à cet endroit.

Les résidus par rapport à la surface de tendance sont représentés par les figures 65 à 67. On peut notamment distinguer sur la figure 63 que les erreurs de restitution suivent des trajectoires au niveau de la brèche.

Les paramètres statistiques des résidus sont énumérés au tableau 12 afin de mieux visualiser la répartition des erreurs. L'idéal serait d'obtenir une médiane égale à zéro et une distribution symétrique de part à d'autre de la médiane. Pour rappel, la médiane sépare les observations en 50% des effectifs de part et d'autre de sa valeur. Le premier quartile ( $Q_1$ ) sépare les données avec 25 % des observations en dessous de sa valeur et le troisième quartile ( $Q_3$ ) sépare les données avec 75 % des observations en dessous de sa valeur. Un intervalle de confiance à 99.3 % autour de la médiane est calculé sur base des équations [36].

$$\text{Borne inférieure} = Q_1 - 1.5 * (Q_3 - Q_1)$$

$$\text{Borne supérieure} = Q_3 + 1.5 * (Q_3 - Q_1)$$

[37]

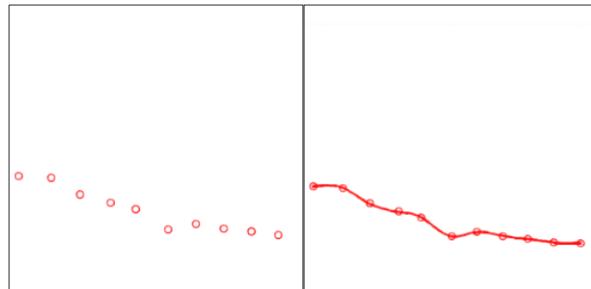
*Tableau 12 : Analyse statistique des résidus par rapport aux trois surfaces de tendance. Les résultats sont exprimés en mètres.*

	Minimum	Borne inf.	1me quartile	Médiane	3me quartile	Borne sup.	Maximum
Période 1	-0.693	-0.00441	-0.00128	0.0000754	0.00171	0.00456	0.282
Période 2	-0.744	-0.00730	-0.00282	0.0000968	0.00211	0.00749	0.243
Période 3	-0.528	-0.0138	-0.00608	-0.000458	0.00284	0.0129	0.455

On peut constater que la médiane qui est un indicateur statistique plus robuste que la moyenne est quasi-nulle pour l'extraction des résidus sur les trois périodes de temps. On remarque également que la distribution des erreurs est symétrique de part à d'autre de la médiane.

#### IV. 6. 3. Trajectoires 3D

Pour rappel, les positions successives d'un même flotteur sont reliées entre elles sur base de l'équation [31]. La courbe passant par ces positions tridimensionnelles est lissée par splines cubiques (figure 71). Cet ajustement par spline consiste à trouver une courbe polynomiale passant par n points et à lisser la trajectoire 3D des flotteurs à la surface du plan d'eau.

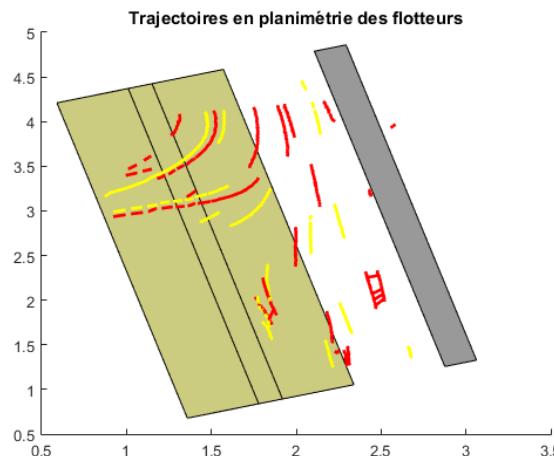


*Figure 71 : Positions successives d'un flotteur en altimétrie et ajustement de ces positions par splines cubiques.*

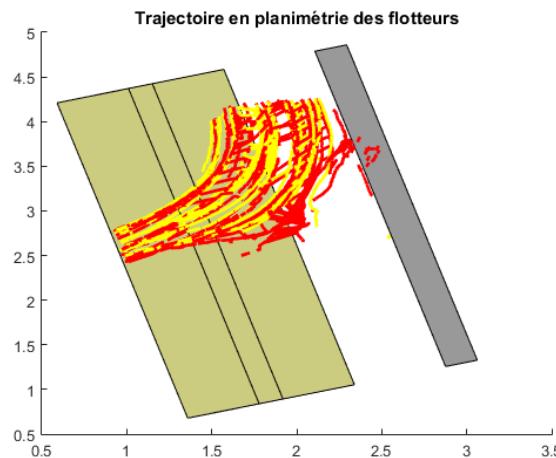
Au niveau de l'implémentation, une condition est rajoutée à la distance minimale qui permet de sélectionner deux flotteurs successifs. Cette condition consiste à choisir le flotteur successif appartenant à une même trajectoire à partir d'un rayon de recherche de 7 cm autour de la position du flotteur dans le frame précédent. Sachant après plusieurs traitements que la vitesse maximale des flotteurs observés dans la brèche est de 2 m/s et que les positions des flotteurs sont extrates à un taux d'échantillonnage de 30 IPS, la distance maximale est donc fixée à 7 cm.

Dans un premier temps, cette condition a pour objectif de stopper et de commencer une nouvelle trajectoire. Dans un deuxième temps, cette condition permet galemnt de ne pas prendre en compte les positions des flotteurs mal restituées lors de l'étape de la restitution 3D qui pourrait se situer aux alentours d'une trajectoire.

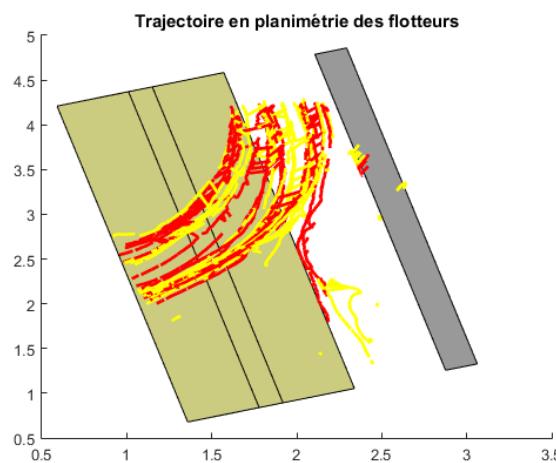
#### IV. 6. 3. 1. Résultats



*Figure 72 : Trajectoires en planimétrie des flotteurs de la période 1.*



*Figure 73 : Trajectoires en planimétrie des flotteurs de la période 2.*



*Figure 74 : Trajectoires en planimétrie des flotteurs de la période 3.*

On peut apercevoir sur les figures 72 à 74 la présence de discontinuités au sein de la trajectoire d'un même flotteur surtout au niveau de la brèche (figure 72). On peut également remarquer des changements brutaux dans la trajectoire d'un même flotteur qui se situe principalement au niveau du canal principal.

Les discontinuités sont dues à l'erreur de synchronisation lié au nombre d'IPS qui provoque des erreurs de restitution. La distance maximale de 7 cm entre un flotteur issu de frames successifs est dépassée alors la trajectoire du flotteur se termine. On peut notamment observer à la figure 56 que les quelques trajectoires au niveau de la brèche s'arrêtent régulièrement conformément à l'erreur de synchronisation périodique.

Une réduction de la distance maximale permet de remédier aux changements brutaux des trajectoires dans le canal principal mais dans ce cas plus de discontinuités au sein des trajectoires sont visibles au niveau de la brèche.

#### **IV. 6. 3. 2. Sources d'erreurs**

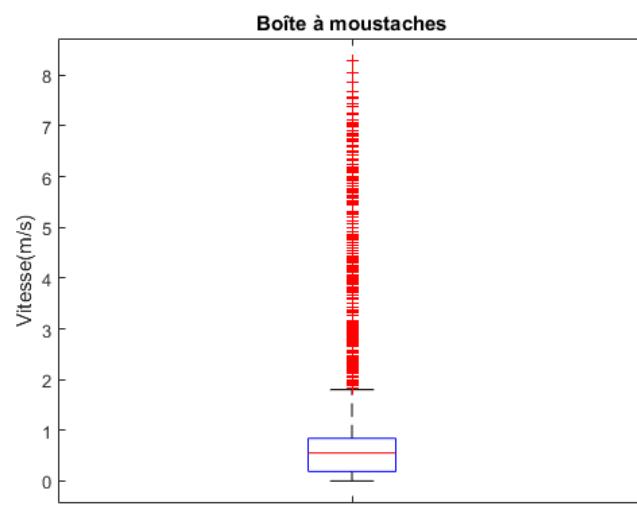
Une limitation à la condition de relier deux flotteurs successifs par la plus petite distance les parant est remarque lorsque deux flotteurs passent côte à côte au même instant dans la brèche. La vitesse du flotteur du côté extrême de la brèche est plus lente que celui se trouvant plus proche du centre de l'écoulement. Par conséquent, l'algorithme va associer chaque position successive au flotteur du côté du centre de la brèche à la position de l'autre flotteur près du bord de la brèche car cette position est plus proche que la position successive du même flotteur sur le frame suivant. Il est important à noter que cela est relativement peu fréquent lors du traitement car peu de flotteurs sont utilisés. Il faut galement que deux flotteurs soient très proches l'un de l'autre pour remarquer ces erreurs. Une piste pour remédier aux changements brutaux de direction au sein des trajectoires serait de prendre en compte la direction de l'écoulement.

#### **IV. 6. 4. Vitesse 3D**

La vitesse d'un flotteur est obtenue en divisant sa distance parcourue par son temps de parcourt entre deux positions successives. tant donné le faible nombre de flotteurs, des champs de vitesses eulériens ont uniquement pu être déterminés. Ces champs de vitesses ont pour caractéristique d'associer à chaque point de la trajectoire une composante de vitesse. Dans notre travail, l'origine du vecteur vitesse prise pour les représentations graphiques (figures 77 à 79) correspond à la position moyenne entre deux flotteurs successifs tout au long de leurs trajectoires.

#### **IV. 6. 4. 1. Filtre sur les vitesses**

Les brusques variations dans la trajectoire de certains flotteurs ont pour conséquence de fournir des vitesses compltement aberrantes. Afin de sélectionner ces vitesses et d'obtenir des graphiques représentatifs, un profil statistique sur les vitesses est extrait à l'aide d'une boîte à moustaches. Cette analyse statistique est représentée à la figure 75 et 76.



*Figure 75 : Boîte à moustaches de la période 2.*



*Figure 76 : Boîte à moustaches de la période 3.*

Sur ces représentations graphiques, la ligne rouge correspond à la médiane, les lignes bleues correspondent au premier et troisième quartile et les lignes grises représentent un intervalle de confiance à 99.3 % basé sur les équations [37].

Les valeurs de vitesse en dehors de cet intervalle de confiance sont jugés aberrantes et sont représentées par des croix rouges. Les valeurs des différents paramètres statistiques de la boîte à moustaches sont énumérées au tableau 13.

*Tableau 13 : Boîte à moustaches des vitesses de la période 2 et 3.*

	<b>Minimum</b>	<b>1r quantile</b>	<b>Médiane</b>	<b>3me quantile</b>	<b>Borne supérieure</b>	<b>Maximum</b>
<b>Période 2</b>	0	0.187	0.553	0.841	1.823	8.286
<b>Période 3</b>	0	0.0734	0.458	0.805	1.901	7.914

Ce filtre est uniquement valable pour un longue période de l'ordre de 10 secondes afin d'identifier correctement les valeurs aberrantes. Par conséquent, aucun filtre sur la première période extraite sur une période de 2 secondes n'est appliqué car les incohérences au niveau des trajectoires sont peu nombreuses.

#### IV. 6. 4. 2. Résultats

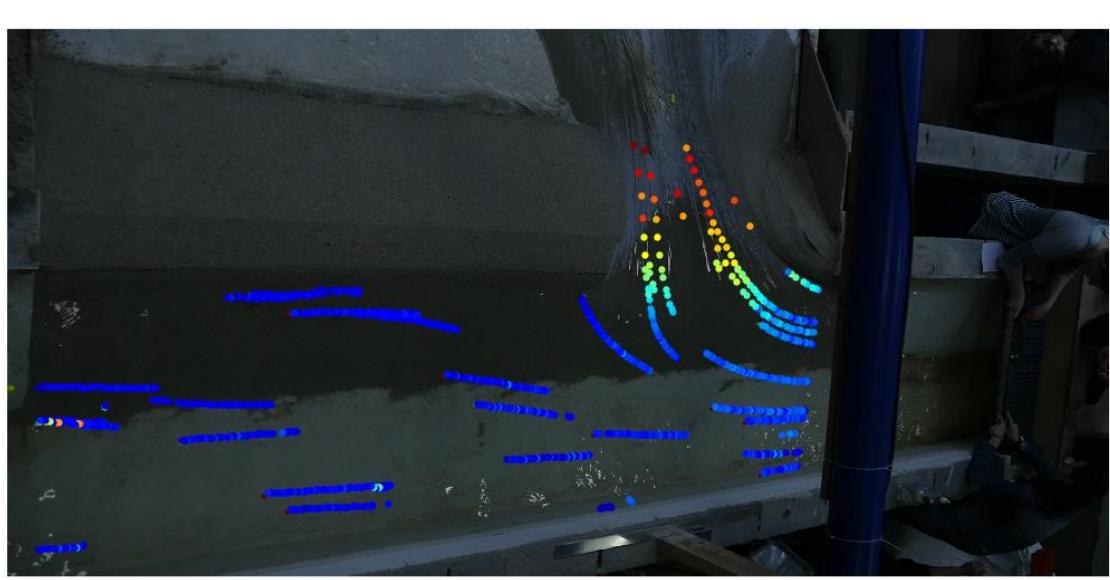


Figure 77 : Champs de vitesses eulériens des flotteurs de la période 1.

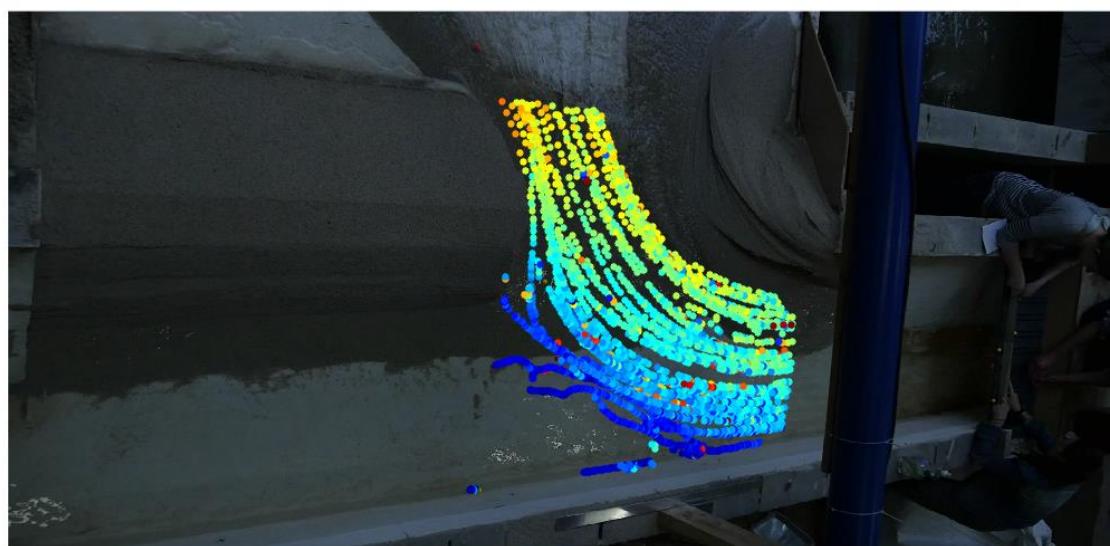
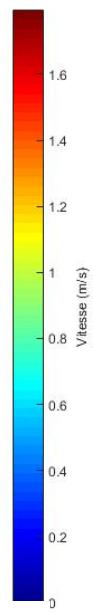
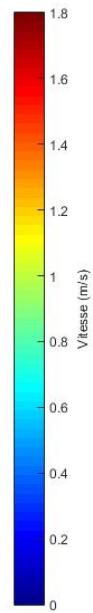
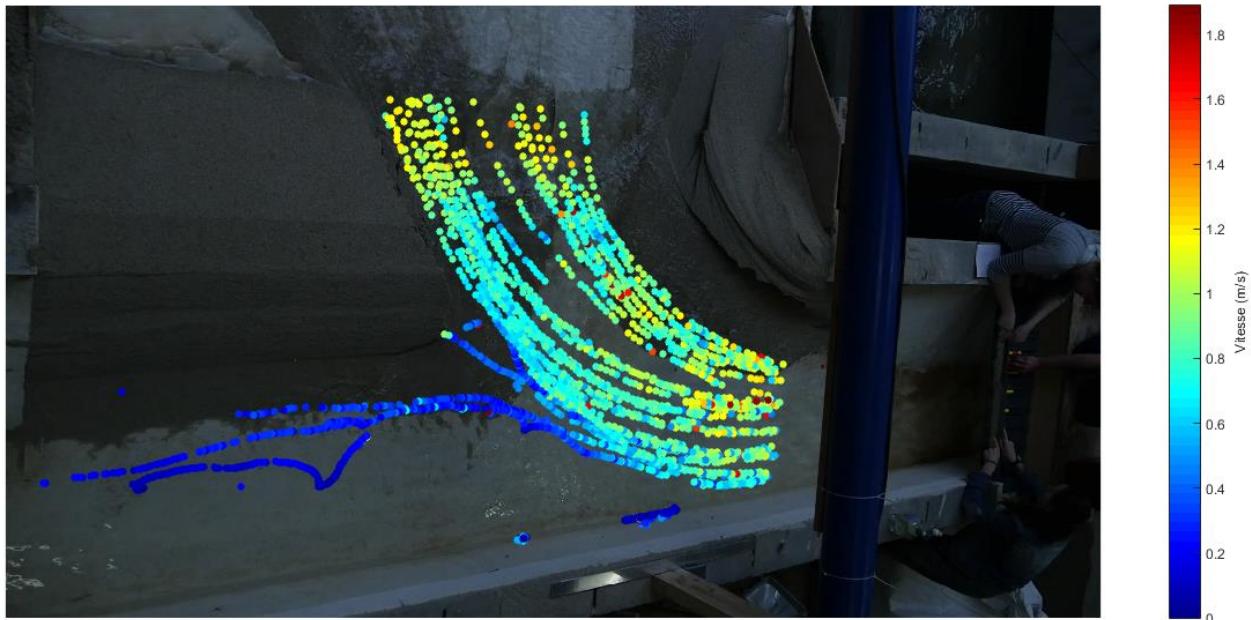


Figure 78 : Champs de vitesses eulériens des flotteurs de la période 2.





*Figure 79 : Champs de vitesses eulériens des flotteurs de la période 3.*

#### IV. 6. 4. 3. Interprétations

Plusieurs constatations peuvent être tirées des graphiques 77 à 79 :

- La vitesse d'écoulement au début de la formation de la brèche (période 1) est de l'ordre de 1.8 m/s sur la rive concave, puis elle diminue progressivement à 1.4 m/s (période 2) et  1.2 m/s (période 3). Cette vitesse élevée sur cette partie du cours d'eau favorise l'érosion et la propagation de la brèche de ce côté de la digue principalement au début de l'expérience.
- Lorsqu'un chenal commence à se former (période 2), on peut constater que tous les flotteurs sont concentrés au niveau de la rive concave et au centre de l'écoulement. Aucune trajectoire de floiteur n'est présente sur la rive convexe. Cela est du à la vitesse de l'écoulement qui est encore relativement élevée à la suite de la surverse et le flux se concentre sur la rive concave. On peut constater que lorsque les conditions hydrodynamiques deviennent plus calmes (période 3), quelques flotteurs repassent sur la rive convexe. Au début de l'expérience (période 1), toute la surface du plan d'eau est couverte par le passage des flotteurs. L'érosion sur la partie convexe s'effectue donc principalement au début de la surverse lorsque les vitesses sont plus élevées.
- On peut constater lors de la période 2 que les vitesses pour les trajectoires des flotteurs sur la rive convexe augmentent graduellement du début vers la fin de la trajectoire alors que les vitesses des flotteurs sur la rive concave augmentent plus brusquement lors du passage dans la brèche.

# CHAPITRE V : CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

## V. 1. Conclusions

La rupture d'une digue peut provoquer des dégâts considérables dans la plaine protégée tant sur le plan humain que matériel. Beaucoup d'études ont jusqu'à présent étudié le phénomène de rupture par surverse par flux transversal à l'édifice en négligeant la surverse par flux longitudinal. Cependant, il est indispensable de pouvoir établir une modélisation précise et non-intrusive de ce phénomène de rupture dans le but de comprendre le mécanisme de formation, d'érosion et de propagation de la brèche afin de protéger au mieux la population et les biens environnants.

Notre mémoire s'est donc inscrit dans la perspective de modéliser un Modèle Numérique Dynamique de Surface (MNDS) de l'écoulement à la surface libre résultant d'une rupture de digue par surverse longitudinale. Ce projet de fin d'études a été réalisé conjointement avec l'Unité de Géomatique et le laboratoire *Hydraulics in Environmental and Civil Engineering* (HECE) de l'Université de Liège (ULg) au sein duquel des tests expérimentaux sur des modèles réduits de rupture de digue ont été simulés.

La méthode photogrammétrique de la *Direct Linear Transformation* (DLT) a rapidement été identifiée comme point de départ à ce projet. Cet algorithme a fait l'objet de plusieurs études au sein de l'Unité de Géomatique et notamment dans le cadre du mémoire de Liénart (2015) dans lequel la DLT a été évaluée pour la restitution d'une maquette de retenue d'eau en mode statique. Dès lors, un module de détection de recherche automatique de points homologues a été identifié comme élément indispensable afin d'étendre cette restitution statique au mode dynamique.

L'hypothèse de recherche posée à la suite de la prise de connaissance des travaux antérieurs est la suivante :

**« La vidéographie en stéréoscopie couplée aux algorithmes de la *Direct Linear Transformation* (DLT) et la recherche de points homologues en géométrie épipolaire permet une restitution précise d'un Modèle Numérique Dynamique de Surface (MNDS) représentant la surface libre de l'écoulement dans un chenal résultant d'une rupture de digue simulée à l'aide d'un modèle réduit. Cette restitution à partir des acquisitions vidéo Haute Définition (HD) au rythme de 60 Frames Per Second (FPS) associée à l'algorithme *Large Scale Particule Image Velocimetry* (LSPIV) rendra aussi possible le calcul des champs de vitesses de l'écoulement. »**

Dans un premier temps, un modèle géométrique de détection automatique de points homologues a été implémenté en combinant la géométrie épipolaire et l'algorithme de la DLT. La détection de ces points homologues se fait sur base de flotteurs de pêche disséminés à la surface du plan d'eau ce qui permet d'avoir accès à la surface libre de l'écoulement. Ce modèle géométrique a également dû être intégré à partir d'un script de profilométrie laser développé par Rifai (2016) au sein du laboratoire HECE et en y ajoutant plusieurs scripts de Liénart (2015).

Dans un deuxième temps, ce script a été testé de manière concrète sur une rupture de digue contrôlée au laboratoire HECE. Trois appareils photographiques utilisant un mode vidéo FullHD ont été exploités pour filmer l'expérience à un taux d'échantillonnage temporel de 30 images par seconde.

Ce programme implémenté sous Matlab a permis d'extraire des champs de vitesses eulériens tridimensionnelles à partir des flotteurs de pêche disséminés de manière homogène et continue lors de toute la durée de l'expérience. Les résultats ont principalement été extraits sur trois périodes de temps distinctes afin de mieux comprendre le processus d'érosion et de propagation de la brèche. Sur base de ces résultats, on peut conclure que les vitesses sont relativement élevées au début de la surverse sur toute la surface du plan d'eau au niveau de la brèche. Ces vitesses ont par la suite tendance à diminuer lors de la formation du chenal à l'endroit initial de la brèche. Les vitesses les plus élevées, toutes périodes confondues, se situent sur la rive concave de l'écoulement qui engendrent la propagation de la brèche de manière extrêmement rapide au début de la surverse puis la propagation s'effectue de manière plus lente dû à la diminution relative des vitesses en fonction de l'ouverture du chenal. L'érosion sur la rive convexe s'effectue quant à elle principalement au début de la surverse et très peu par la suite.

Jusqu'à présent les vitesses d'écoulement dans la brèche étaient principalement estimées de trois manières différentes :

- En divisant le débit sortant de la brèche par sa section.
- Par l'algorithme de la profilométrie laser dans lequel un processus de digitalisation manuelle relativement fastidieux est demandé à l'utilisateur afin de déterminer des champs de vitesses 3D à partir d'éléments flottants disséminés à la surface libre de l'écoulement.
- Par l'algorithme de la LSPIV afin de déterminer des champs de vitesses 2D également sur base d'objets flottants disséminés à la surface libre de l'écoulement.

La méthode de détermination de vitesse développée dans le cadre de notre mémoire propose, comparativement aux autres méthodes employées actuellement, l'avantage de déterminer automatiquement des champs de vitesses eulériens tridimensionnelles distribués spatialement sur toute la surface de l'écoulement avec une précision de l'ordre de 5 mm.

## V. 2. Perspectives

Les principales perspectives résident dans l'amélioration des trajectoires 3D qui découlent directement de la qualité de la restitution 3D des flotteurs. Il a été démontré parmi les plusieurs sources d'erreurs que la principale provient de la détection automatique des points homologues réalisée sur des images qui ne sont pas exactement synchrones. Cette erreur est d'autant plus importante que la vitesse des flotteurs est élevée, surtout au niveau de la brèche. Il serait, par conséquent, intéressant d'effectuer l'expérience en résolvant les différentes sources d'erreurs ciblées :

- L'utilisation de caméras utilisant le même nombre d'images par seconde.
- La prise en compte de la direction de l'écoulement lors de l'identification des trajectoires.
- Un ajustement des seuils de la classification des flotteurs sur base d'une carte de corrélation spatiale.

Il serait par ailleurs intéressant de comparer les résultats de la restitution avec des caméras ayant un mode de vidéo supérieur au FullHD, c'est-à-dire le mode 4K, ainsi que l'utilisation de plus de trois caméras afin de comparer la qualité de la restitution.

## Bibliographie

- Billen, R., (2014). Cours de topographie. Université de Liège.
- Black, J., Pappa, R., (2003). Videogrammetry using projected circular targets: proof-of-concept test. *21<sup>st</sup> international modal analysis conference*, Kissimmee, Florida, February 3-6.
- Blonquist, K., Pack R., (2011). A bundle adjustment approach with inner constraints for the scaled orthographic projection. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66, 919-926.
- Bung, D., Valero, D., (2016). Application of the optical flow method to velocity determination in hydraulic structure models. In B. Crookston & B. Tullis (Eds.), *Hydraulics Structure and Water System Management*. 6<sup>th</sup> IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, Portland, OR, 27- 30 June (pp. 240-249), DOI : 10.15142/T3150628160853.
- Canon. [https://www.canon.fr/for\\_home/product\\_finder/cameras/digital\\_slr/eos-80d/specification.aspx](https://www.canon.fr/for_home/product_finder/cameras/digital_slr/eos-80d/specification.aspx). Consulté le 05/05/18.
- Chandler, J.H., Ferreira, E., Wackrow, R. & Shiono, K. (2014). Water surface and velocity measurement – river and flume. ISPRS Technical Commission V Symposium. 23-25 June 2014. Riva del Garda, Italy.
- Chen, L., Armstrong, C., Raftopoulos, D., (1994). An investigation on the accuracy of three-dimensional space reconstruction using the direct linear transformation technique. *Journal of Biomechanics*, 27, No. 4, 493-500.
- Cornet, Y., (2016). Cours de photogrammétrie. Université de Liège.
- Donnay, J.-P., (2015). Cours d'analyse spatiale. Université de Liège.
- Egels, Y., Kasser, M., (2002). Digital photogrammetry. *Taylor & Francis*, London, 300 p.
- Ferreira, E., Chandler, J., Wackrow R., Shiono, K. (2017). Automated extraction of free surface topography using SfM-MVS photogrammetry. *Flow Measurement and Instrumentation* 54, 243-249.
- Friedl, F., Schneider, J., Hinkelammert, F. & Weitbrecht, V. (2017). Through-water terrestrial laser scanning in hydraulic scale models: proof of concept. *Journal of Hydraulic Research*. DOI: 10.1080/00221686.2017.1372820.
- Fujita, I., Muste, M., Kruger, A., (1998). Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulics engineering applications. *Journal of Hydraulic Research*, 36:3, 397-414, DO : 10.1080/00221689809498626.
- Hauet, A., Jodeau, M., Le Coz, J., Marchand, B., Die Moran, A., Le Boursicaud, R., Dramais, G., (2015). Application de la méthode LSPIV pour la mesure de champs de vitesse et de débits de crue sur modèle réduit et en rivière. *La Houille Blanche – Revue internationale de l'eau*, EDP Sciences, 3, pp. 16-22.
- Karara, H.M., Faig, W., (1980). An expose on photographic data acquisition systems in close range photogrammetry. 14<sup>th</sup> Congress of the international society for photogrammetry, Hambourg.

Leica. [https://w3.leica-geosystems.com/downloads123/zz/general/general/brochures/surveying\\_fr.pdf](https://w3.leica-geosystems.com/downloads123/zz/general/general/brochures/surveying_fr.pdf). Consulté le 20/07/2018.

Lewis, Q., Rhoads, B., (2015). Resolving two-dimensional flow structure in rivers using large-scale particle image velocimetry : An example from a stream confluence. *Water Resources Research*, 51, 7977-7994. DOI : 10.1002/2015WR017783.

Liénart, G. (2015). *Evaluation de la Direct-Linear Transformation (DLT) pour la restitution tridimensionnelle d'un modèle réduit d'une retenue d'eau et considérations dynamiques pour sa rupture par surverse*. Mémoire en sciences géographiques : orientation géomatique et géométrie, Liège, Université de Liège, 114p.

Muste, M., Fujite, I., Hauet, A., (2008). Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments. *Water resources research*, Vol. 44, DOI : 10.1029/2008WR006950.

Muste, M., Hauet, A., Fujita, I., Legout, C., Ho, H.-C. (2014). Capabilities of large-scale particle image velocimetry to characterize shallow free-surface flows. *Advances in Water Resources*, 70, 160-171.

Nichols, A., Rubinato, M., (2016) Low-cost 3D mapping of turbulent flow surfaces : Proceedings of the 4<sup>th</sup> IAHR Europe Congress (Liege, Belgium, 27-29 July).

Panasonic.<https://www.panasonic.com/fr/consumer/appareils-photo-et-camescopes/bridges/dmc-fz72ef-k.html>. Consulté le 05/05/18.

Panasonic. <https://www.panasonic.com/be/fr/consumer/cameras-camcorders/lumix-g-dslm/dmc-gh4.html>. Consulté le 05/05/18.

Pourcelot, P., Audigié, F., Degueurce, C., Geiger, D., Denoix J.-M. (2000). A method to synchronise cameras using the direct linear transformation technique. *Journal of Biomechanics*, 33, 1751 – 1754.

Reiterer, A., Huber, N. B., Bauer, A., (2010). Image-based detection and matching of homologue points using feature-vectors – functionality and evaluation in a deformation measurement system. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII, Part 5 Commission V Symposium, Newcastle upon Tyne, UK.

Rey-Otero, I., Delbracio, M., (2014). Anatomy of the SIFT Method. *Image Processing On Line*. <http://dx.doi.org/10.5201/ipol.2014.82>. Consulté le 25/05/18.

Rifai, I., Erpicum, S., Archambeau, P., Benoit, M., Pirotton, M., Dewals, B. & El kadi Abderrezzak, K. (2015). Physical modelling of lateral dike breaching due to overtopping: a review. University of Liège, Belgium.

Rifai, I., Erpicum, S., Archambeau, P., Violeau, D., Pirotton, M., El kadi Abderrezzak, K. & Dewals, B. (2016). Monitoring topography of laboratory fluvial dike models subjected to breaching based on a laser profilometry technique. University of Liège, Belgium.

Rifai, I., Erpicum, S., Archambeau, P., Violeau, D., Pirotton, M., El Kadi Abderrezzak K., Dewals, B., (2017). Overtopping induced failure of noncohesive, homogeneous fluvial dikes. *Water Resources Research*, 53, 3373-3386. DOI : 10.1002/2016WR020053.

Rifai, I., (2018). Overtopping induced fluvial dike failure. Thèse de doctorat, Liège, Université de Liège, inédit, 111 p.

Rousseau, N., (2018). Influences géométriques sur les écoulements générés par la formation de brèches dans des digues fluviales. Mémoire en sciences appliquées : ingénieur civil en construction, Liège, Université de Liège, 70 p.

Stojanovic, A., Unger, M., (2007). Robust detection of point correspondences in stereo images. *Acta Polytechnica*, Vol.47, No. 4-5.

Takimoto, R., Challella das Neves, A., de Castro Martins, T., Takase F., de Sales Guerra Tsuzuki M., (2011). Automatic epipolar geometry recovery using two images. *18<sup>th</sup> World Congress The International Federation of Automatic Control*. Milano (Italy), 28 August-2 September.

Tauro, F., Piscopia, R., Grimaldi, S., (2017). Streamflow observations from cameras : Large-Scale Particle Image Velocimetry or Particle Tracking Velocimetry? *Water Resources Research*, 53, 10374-10394. DOI : 10.1002/2017WR020848.

Tsay J.-R., Lee, M.-S., (2012). Sift for dense point cloud matching and aero triangulation. XXII ISPRS Congress, 25 August-01 September, Melbourne, Australia.

## Annexes numériques

Les annexes numériques sont composées du script de profilométrie laser développé par Rifai (2016) au sein duquel les fonctions et les données relatives à ce mémoire ont été rajoutées.

### Scripts :

- photogrammetrie.m (script principal)
- classification\_flotteur.m
- erreur\_coplanarite\_jaune.m
- erreur\_coplanarite\_orange.m
- geometrie\_epipolaire.m
- DLT\_Restitution\_16p\_modif.m

### Images :

- Les trois séquences vidéo

### Données :

- GCPmonde.mat (coordonnées-monde des PV)
- hom\_Canon.mat (coordonnées-image des PV)
- hom\_Lumix72.mat (coordonnées-image des PV)
- hom\_LumixGH4.mat (coordonnées-image des PV)
- Points\_control.mat (coordonnées-monde des PC)
- u\_v\_Canon.mat (coordonnées-image des PC)
- u\_v\_Lumix72.mat (coordonnées-image des PC)
- u\_v\_LumixGH4.mat (coordonnées-image des PC)