

Université du Québec  
Institut National de la Recherche Scientifique  
Centre Eau Terre Environnement

## **SUIVI EN TEMPS RÉEL DE L'ALÉA INONDATION PAR CAMERAS DE SURVEILLANCE : ESTIMATION DU NIVEAU DE L'EAU**

Par  
Romain Latapie

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de  
Maître ès sciences (M.Sc.)  
en sciences de l'eau

### **Jury d'évaluation**

Président du jury et examineur interne	Monique Bernier INRS Centre Eau Terre Environnement
Examineur interne	Alain N. Rousseau INRS Centre Eau Terre Environnement
Examineur externe	Christian Larouche Faculté de foresterie, géographie et géomatique Université Laval
Directeur de recherche	Karem Chokmani INRS Centre Eau Terre Environnement



# REMERCIEMENTS

Ce mémoire constitue l'aboutissement d'un travail de trois années de recherche en sciences de l'eau réalisées au sein du laboratoire de Télédétection Environnementale et NORdique (TENOR) du centre Eau Terre Environnement de l'Institut National de la Recherche Scientifique (INRS). Ce projet n'aurait pas pu aboutir sans la contribution de plusieurs personnes, je leur adresse ici mes remerciements.

Tout d'abord, je tiens à remercier mon directeur de recherche Karem Chokmani qui m'a donné l'opportunité d'approfondir un peu plus mes connaissances en traitement d'images avec ce sujet à la fois passionnant et d'actualité. Je le remercie pour l'ensemble de ses conseils scientifiques précieux, pour son soutien sans faille et ses encouragements pendant ces années.

Ensuite, je veux remercier Monique Bernier et Alain N. Rousseau, examinateurs internes de ce mémoire, pour avoir évalué ce travail. Je remercie aussi Monique Bernier de m'avoir fait découvrir la recherche avec la réalisation d'un stage au sein du laboratoire TENOR en 2015 et pour les nombreuses discussions que nous avons eues depuis mon arrivée à l'INRS.

Je souhaite remercier Christian Larouche, examinateur externe de ce mémoire. Je le remercie pour la correction de ce travail et pour nos discussions qui m'ont permis de mieux appréhender les défis liés aux calculs photogrammétriques spécifiques au projet. Je le remercie également de m'avoir accordé l'accès au laboratoire de métrologie de l'Université Laval.

J'adresse un grand merci à Yves Gauthier et Jimmy Poulin, professionnels de recherche au sein du laboratoire TENOR, pour leur disponibilité, leurs conseils avisés et leur écoute depuis mon entrée à l'INRS. Je remercie Guy Montreuil, technicien expert à l'Université Laval, qui m'a épaulé lors des tests réalisés au laboratoire de métrologie.

Je veux remercier aussi les intervenants du projet Gestion et Analyse des Risques d'Inondation (GARI), avec qui j'ai pu comprendre la complexité de la mise en place d'un tel projet. Je remercie en particulier Marion Tanguy et Khalid Oubennaceur, étudiants au doctorat à l'INRS, de m'avoir permis la compréhension des différentes applications de GARI et Sylvain Parent, chef de division au service des technologies de l'information de la ville de Saint-Jean-sur-Richelieu, pour son aide technique relative à l'accès en direct aux caméras.

Je remercie mes amis Geneviève, Marianne, Vincent, Justine, Sarah, Dominic, ... de l'INRS pour tous les moments passés ensemble. Enfin, un immense merci à ma famille pour m'avoir soutenu dans mon choix de poursuivre mon aventure québécoise.



## RÉSUMÉ

Les inondations constituent l'un des risques naturels les plus fréquents. Une inondation historique survenue au Québec s'est produite aux abords de la rivière Richelieu entre avril et juin 2011. Suite aux dommages et aux frais occasionnés par cet épisode, l'INRS s'est engagé avec la ville de Saint-Jean-sur-Richelieu afin de la doter d'un système de Gestion et d'Analyse du Risque d'Inondation (GARI) : le niveau d'eau constitue une donnée essentielle pour l'évaluation de l'ampleur d'une inondation en temps réel. Ce travail de recherche a pour objectif de détecter automatiquement la ligne d'eau sur des images acquises par des caméras placées aux abords de la rivière Richelieu par des méthodes d'analyse d'images et de convertir cette dernière en niveau d'eau par stéréoscopie (transfert des valeurs en pixels en unité métrique).

Le premier volet de ce travail de recherche s'intéresse à l'extraction automatique de la ligne d'eau à partir de données acquises par des caméras de surveillance. Afin de répondre à cette exigence, des séquences d'images de durée déterminée (une minute) ont été enregistrées et une image moyenne a été calculée pour chaque séquence. L'image moyenne est ensuite segmentée puis classifiée à l'aide d'une technique supervisée. Pour la première séquence d'images à traiter, des sites d'entraînement décrivant les parties immergées et libres sont créés afin d'obtenir deux classes de sortie correspondant aux surfaces d'eau et au reste de l'image. Une détection de contour permet d'isoler les pixels de la ligne d'eau. Pour les séquences suivantes, l'algorithme utilise automatiquement la ligne d'eau créée à la séquence précédente pour définir les sites d'entraînements à la séquence considérée. Le taux de réussite d'extraction de la ligne d'eau avoisine 90%.

Le second volet consiste à convertir les coordonnées des pixels de la ligne d'eau du système bidimensionnel image vers un système tridimensionnel dans un référentiel connu. Les observations par stéréoscopie permettent cette transformation via les procédures d'orientation intérieure des caméras et d'orientation extérieure des couples stéréoscopiques. Pour le modèle de caméra considéré, les tests effectués montrent que les erreurs de positionnement planimétrique de la ligne d'eau sont inférieures au mètre et l'erreur de positionnement altimétrique (niveau d'eau) est inférieure à 10 cm lorsque le rapport entre la base stéréoscopique et la distance avec l'objet à modéliser est supérieur à 0.1.



# ABSTRACT

Flooding is one of the most common natural hazards. A historic flood occurred in the vicinity of the Richelieu River (Province of Quebec, Canada) between April and June 2011. After the damages and expenses incurred by this episode, INRS and the city of Saint-Jean-sur-Richelieu decided to create a flood risk management and analysis system : water level is an essential factor for assessing magnitude of a flood in real time. This research project aims to automatically detect the water line on images acquired by cameras located near the Richelieu River with image analysis methods and to convert it to water level by stereoscopy (transfer of values from pixel unit to metric unit).

The first part of this research work focuses on automatic extraction of water line from data acquired by surveillance cameras. In order to meet this requirement, fixed-duration (one minute) image sequences were recorded and an average image was calculated for each sequence. Average image is then segmented and classified using a supervised technique. For the first sequence of images to be processed, training sites describing submerged and free portions are created to obtain two output classes corresponding to water and the rest of the image. Then, a contour detection is used to determine water line. For the following sequences, the algorithm automatically uses water line created in the previous sequence to define training sites for the present sequence. Success rate of water line extraction is around 90%.

Second part consists in converting pixels coordinates of water line known in a two-dimensional image system to a three-dimensional system in a known reference frame. Stereoscopic observations allow this transformation via interior and exterior orientations procedures. For the camera model considered in this project, tests highlight that planimetric positioning errors of the water line are lower than 1 m and altimetric positioning error (water level) is lower than 10 cm when the ratio between stereoscopic basis and distance to the object to be modeled is higher than 0.1.



# TABLE DES MATIÈRES

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>17</b>
1.1	CONTEXTE .....	17
1.1.1	<i>Les inondations .....</i>	<i>17</i>
1.1.2	<i>État de la situation de l'outil GARI.....</i>	<i>18</i>
1.2	PROBLEMATIQUE .....	20
1.3	OBJECTIFS.....	21
<b>2</b>	<b>REVUE DE LITTÉRATURE.....</b>	<b>23</b>
2.1	DIFFERENTS CAPTEURS D'ACQUISITION DU NIVEAU D'EAU .....	23
2.1.1	<i>Capteurs intrusifs.....</i>	<i>23</i>
2.1.2	<i>Capteurs non intrusifs .....</i>	<i>25</i>
2.2	EXTRACTION DE LA LIGNE D'EAU A PARTIR DE CAMERAS.....	26
2.2.1	<i>Analyse d'images fixes (photographies) .....</i>	<i>26</i>
2.2.2	<i>Analyse d'images animées (vidéographies).....</i>	<i>28</i>
2.3	GEOREFERENCEMENT DE LA LIGNE D'EAU .....	29
2.3.1	<i>Monorestitution .....</i>	<i>30</i>
2.3.2	<i>Stéréorestitution .....</i>	<i>31</i>
2.3.3	<i>Restitution multi-image.....</i>	<i>32</i>
<b>3</b>	<b>SÉLECTION DES CAMÉRAS ET DES SITES .....</b>	<b>33</b>
3.1	CONTRAINTES DU PROJET .....	33
3.2	CAMERA CHOISIE.....	35
3.2.1	<i>Caractéristiques techniques.....</i>	<i>35</i>
3.2.2	<i>Dispositif d'installation .....</i>	<i>37</i>
3.2.3	<i>Calcul de dimensions spécifiques .....</i>	<i>38</i>
3.3	SITES D'INSTALLATION .....	44
3.4	SITES DE TESTS.....	46
3.4.1	<i>Traverse Québec-Lévis .....</i>	<i>46</i>
3.4.2	<i>Laboratoire de métrologie de l'Université Laval .....</i>	<i>46</i>
3.4.3	<i>Terrasse de l'INRS .....</i>	<i>47</i>
<b>4</b>	<b>METHODES.....</b>	<b>49</b>
4.1	EXTRACTION DE LA LIGNE D'EAU SUR UNE IMAGE .....	49
4.1.1	<i>Format des données utilisées .....</i>	<i>49</i>

4.1.2	<i>Définition d'une région d'intérêt</i> .....	50
4.1.3	<i>Prétraitements et calcul d'image moyenne</i> .....	51
4.1.4	<i>Définition des sites d'entraînement</i> .....	52
4.1.5	<i>Segmentation de l'image</i> .....	53
4.1.6	<i>Classification de l'image</i> .....	55
4.1.7	<i>Détection de contour et extraction de la ligne d'eau</i> .....	57
4.1.8	<i>Validation des résultats</i> .....	57
4.2	RECHERCHE DE LA LIGNE D'EAU SUR UNE AUTRE IMAGE.....	58
4.3	GEOREFERENCEMENT DE LA LIGNE D'EAU .....	60
4.3.1	<i>Orientation intérieure</i> .....	60
4.3.2	<i>Orientation extérieure</i> .....	63
4.3.3	<i>Validation des résultats</i> .....	69
4.4	AUTOMATISATION DE L'ALGORITHME .....	70
<b>5</b>	<b>RESULTATS</b> .....	<b>73</b>
5.1	EXTRACTION DE LA LIGNE D'EAU .....	73
5.1.1	<i>Site nord de Saint-Jean-sur-Richelieu</i> .....	73
5.1.2	<i>Site central de Saint-Jean-sur Richelieu</i> .....	76
5.1.3	<i>Traverse Québec-Lévis</i> .....	81
5.2	GEOREFERENCEMENT DE LA LIGNE D'EAU .....	84
5.2.1	<i>Orientation intérieure</i> .....	84
5.2.2	<i>Orientation extérieure</i> .....	87
5.2.2.1	Laboratoire de métrologie :.....	87
5.2.2.2	Terrasse de l'INRS : .....	95
5.2.2.3	Traverse Québec-Lévis :.....	100
5.3	SUGGESTIONS D'AMELIORATIONS .....	101
5.3.1	<i>Extraction de la ligne d'eau</i> .....	101
5.3.2	<i>Recherche de la ligne d'eau sur une autre image</i> .....	101
5.3.3	<i>Géoréférencement de la ligne d'eau</i> .....	102
5.3.4	<i>Tâches à effectuer pour la mise en place complète d'un système de surveillance opérationnel à Saint-Jean-sur-Richelieu</i> .....	103
5.4	DE L'EXTRACTION DU NIVEAU D'EAU AU SYSTEME GARI.....	105
<b>6</b>	<b>CONCLUSION</b> .....	<b>109</b>
<b>7</b>	<b>REFERENCES</b> .....	<b>113</b>
<b>8</b>	<b>ANNEXES</b> .....	<b>117</b>

# LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1.1 : CARACTERISTIQUES DES DIFFERENTES SOURCES DE DONNEES .....	20
TABLEAU 3.1 : PRINCIPALES CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DE LA CAMERA AVIGILON HDH4.....	36
TABLEAU 5.1 : RENDEMENTS OBTENUS POUR CHAQUE SEQUENCE ET RENDEMENT MOYEN – SITE NORD DE SAINT- JEAN-SUR-RICHELIEU .....	75
TABLEAU 5.2 : RENDEMENTS OBTENUS POUR CHAQUE SEQUENCE ET RENDEMENT MOYEN – SITE CENTRAL DE SAINT-JEAN-SUR-RICHELIEU .....	78
TABLEAU 5.3 : RENDEMENTS OBTENUS POUR CHAQUE SEQUENCE ET RENDEMENT MOYEN – TRAVERSE QUEBEC- LEVIS .....	83
TABLEAU 5.4 : RESULTATS OBTENUS POUR L'ORIENTATION INTERIEURE DE LA CAMERA 1 .....	85
TABLEAU 5.5 : RESULTATS OBTENUS POUR L'ORIENTATION INTERIEURE DE LA CAMERA 2 .....	85
TABLEAU 5.6 : VALEURS DES PARAMETRES D'ORIENTATION RELATIVE AVEC LES <i>RMSE</i> ASSOCIEES POUR LES 20 COUPLES STEREOSCOPIQUES TESTES .....	88
TABLEAU 5.7 : COMPARAISON DES VALEURS B/D OBTENUES PAR PHOTOGRAMMETRIE ET AVEC UNE STATION TOTALE .....	89
TABLEAU 5.8 : RESULTATS DE L'ORIENTATION ABSOLUE POUR LES 20 COUPLES STEREOSCOPIQUES TESTES .....	90
TABLEAU 5.9 : COMPARAISON DES VALEURS DE BASE B OBTENUES PAR PHOTOGRAMMETRIE ET AVEC UNE STATION TOTALE .....	91
TABLEAU 5.10 : VALEURS DES <i>RMSE</i> ET BIAIS AVEC LES DONNEES DE CONTROLE.....	92
TABLEAU 5.11 : RESULTATS DE L'ORIENTATION RELATIVE POUR LES COUPLES STEREOSCOPIQUES ACQUIS DEPUIS LA TERRASSE DE L'INRS .....	95
TABLEAU 5.12: RESULTATS DE L'ORIENTATION ABSOLUE .....	96
TABLEAU 5.13 : COMPARAISON DE LA BASE CALCULEE PAR PHOTOGRAMMETRIE ET DETERMINEE AU RUBAN METRIQUE .....	97
TABLEAU 5.14 : RESIDUS OBTENUS SUR LES DONNEES DE CONTROLE POUR LES TESTS EFFECTUES SUR LA TERRASSE DE L'INRS.....	98



# LISTE DES FIGURES

FIGURE 1.1 : OCCURRENCE DES DESASTRES NATURELS PAR TYPE DE DESASTRE SUR LA PERIODE 1995 – 2015 (THE UNITED NATIONS FOR DISASTER RISK REDUCTION, 2015) .....	17
FIGURE 2.1 : EXEMPLE DE DETECTION DE LA LIGNE D'EAU (EN JAUNE) DANS LE CADRE D'UNE INONDATION (PONGSIRIYAPORN <i>ET AL.</i> , 2014).....	27
FIGURE 3.1 : RESOLUTIONS TERRAIN D'UN PIXEL SUIVANT L'ELOIGNEMENT (D) AVEC LE CENTRE DE PERSPECTIVE (O) DE LA CAMERA (ADAPTEE DE WU <i>ET AL.</i> (2009)) .....	34
FIGURE 3.2 : DISPOSITIF DE SURVEILLANCE SUR LE SITE NORD A SAINT-JEAN-SUR-RICHELIEU .....	37
FIGURE 3.3 : COMPOSANTES DE LA RESOLUTION D'UN PIXEL SUR LE TERRAIN SUIVANT L'AXE DE VISEE – VUE DE PROFIL (ADAPTEE DE WU <i>ET AL.</i> (2009)) .....	39
FIGURE 3.4 : COMPOSANTE DE LA RESOLUTION D'UN PIXEL SUR LE TERRAIN PARALLELE A LA LARGEUR DU CAPTEUR – VUE DE DESSUS (ADAPTEE DE GRUSSENMEYER (2013)).....	39
FIGURE 3.5 : ESTIMATION DE LA RESOLUTION D'UN PIXEL SUR LE TERRAIN A UNE DISTANCE DONNEE.....	40
FIGURE 3.6 : ESTIMATION DE LA SURFACE PHOTOGRAPHIEE SUIVANT LA DISTANCE MAXIMALE D'ACQUISITION .....	42
FIGURE 3.7 : ERREUR SUR LA PROFONDEUR SI MAUVAIS APPARIEMENT D'UNE DISTANCE DE 1 PIXEL .....	43
FIGURE 3.8 : INFLUENCE D'UN PIXEL SUR LA PROFONDEUR SUIVANT LA LONGUEUR DE LA BASE ET LA DISTANCE .	43
FIGURE 3.9 : EMBLEMES SELECTIONNES POUR LE RESEAU DE SURVEILLANCE PAR CAMERAS .....	45
FIGURE 3.10 : EXEMPLES DE PHOTOGRAPHIES ACQUISES PAR LA MEME CAMERA AU COURS D'UNE MEME JOURNEE .....	46
FIGURE 3.11 : MURS DE CALIBRATION DU LABORATOIRE DE METROLOGIE .....	47
FIGURE 3.12 : EXEMPLE D'UN COUPLE STEREOSCOPIQUE ACQUIS DEPUIS LA TERRASSE DE L'INRS.....	48
FIGURE 3.13 : STATION TOTALE LEICA TS16 ET POINTS D'APPUI DEFINIS SUR LE STATIONNEMENT DE LA RUE DORCHESTER.....	48
FIGURE 4.1 : PREMIERE PHOTO D'UNE SEQUENCE ET IMAGE MOYENNE DE SEQUENCE – SITE CENTRAL DE SAINT- JEAN-SUR-RICHELIEU .....	50
FIGURE 4.2 : REGION D'ETUDE (ROUGE) ET LIMITE CONSIDEREE POUR LA PLUPART DES TRAITEMENTS (BLEU) ....	50
FIGURE 4.3 : IMAGE MOYENNE ET REGIONS D'ETUDES – TRAVERSE QUEBEC-LEVIS.....	51
FIGURE 4.4 : IMAGE MOYENNE REHAUSSEE ET DECOUPEE SELON LA ROI (EN HAUT) ET SELON LE RECTANGLE DE LIMITES ASSOCIE (EN BAS) – SITE CENTRAL DE SAINT-JEAN-SUR-RICHELIEU .....	52
FIGURE 4.5 : SITES D'ENTRAINEMENT DE L'EAU (EN BLEU) ET DU RESTE DE L'IMAGE (EN ROUGE) – SITE CENTRAL DE SAINT-JEAN-SUR-RICHELIEU .....	52
FIGURE 4.6 : EXEMPLE DE SEGMENTATION (K = 200) – SITE CENTRAL DE SAINT-JEAN-SUR-RICHELIEU .....	54
FIGURE 4.7 : EXEMPLES DE SEGMENTATIONS REALISEES (K ∈ [100 ; 500 ; 1000]) – SITE CENTRAL DE SAINT-JEAN- SUR-RICHELIEU .....	54
FIGURE 4.8 : RESULTAT DE LA CLASSIFICATION AVEC LA SECONDE IMAGE SEGMENTEE (VALEURS EGALES A 0 EN ROUGE ET 1 EN BLEU) – SITE CENTRAL DE SAINT-JEAN-SUR-RICHELIEU.....	56

FIGURE 4.9 : SOMME DE TOUTES LES CLASSIFICATIONS OBTENUES (VALEURS COMPRISES ENTRE 0 EN ROUGE ET 10 EN BLEU) – SITE CENTRAL DE SAINT-JEAN-SUR-RICHELIEU.....	56
FIGURE 4.10 : RESULTAT FINAL DE CLASSIFICATION (VALEURS EGALES A 0 EN ROUGE ET 10 EN BLEU) – SITE CENTRAL DE SAINT-JEAN-SUR-RICHELIEU .....	56
FIGURE 4.11 : LIGNE D'EAU EXTRAITE (EN JAUNE) – SITE CENTRAL DE SAINT-JEAN-SUR-RICHELIEU.....	57
FIGURE 4.12 : EXEMPLE DE PYRAMIDE D'IMAGES (PATTERN RECOGNITION AND IMAGE PROCESSING GROUP, 2015) .....	59
FIGURE 4.13 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE L'ETAPE DE GEOREFERENCEMENT .....	60
FIGURE 4.14 : DU SYSTEME IMAGE (PIXELS) VERS LE SYSTEME PHOTOGRAPHIQUE (MM) .....	61
FIGURE 4.15 : ORIENTATION INTERIEURE, <i>PINHOLE CAMERA MODEL</i> (ADAPTEE DE LUHMANN <i>ET AL.</i> (2013)) .....	62
FIGURE 4.16 : ORIENTATION RELATIVE ET SYSTEMES DE COORDONNEES PHOTOGRAPHIQUES ET « MODELE » (ADAPTEE DE LUHMANN <i>ET AL.</i> (2013)) .....	64
FIGURE 4.17 : DEFINITION DES NOUVEAUX SITES D'ENTRAINEMENT – SITE CENTRAL DE SAINT-JEAN-SUR-RICHELIEU.....	71
FIGURE 4.18 : TRAITEMENT AUTOMATIQUE DES SEQUENCES D'IMAGES AU FIL DU TEMPS .....	72
FIGURE 5.1 : IMAGES MOYENNES DES SEQUENCES ACQUISES POUR LA JOURNEE DU 15 MARS 2018 DE 08:00 A 18:00 (ORDRE DE GAUCHE A DROITE ET DU HAUT VERS LE BAS) AU SITE NORD DE SAINT-JEAN-SUR-RICHELIEU.....	74
FIGURE 5.2 : EXEMPLES DE PHOTOGRAPHIES ACQUISES AU COURS DE LA JOURNEE DU 15 MARS 2018 AU SITE NORD DE SAINT-JEAN-SUR-RICHELIEU .....	74
FIGURE 5.3 : LIGNES D'EAU CALCULEES (EN JAUNE) SUR LES QUATRE IMAGES MOYENNES DECOUPEES DE 08:00 (EN HAUT) A 18:00 (EN BAS) .....	75
FIGURE 5.4 : LIGNES D'EAU CALCULEES (EN JAUNE), MOYENNES DES LIGNES D'EAU NUMERISEES (EN BLEU), ET INTERVALLE DE CONFIANCE (EN ROUGE) SUR LES QUATRE IMAGES MOYENNES DECOUPEES DE 08:00 (EN HAUT) A 18:00 (EN BAS) .....	76
FIGURE 5.5 : IMAGES MOYENNES DES SEQUENCES ACQUISES POUR LA JOURNEE DU 17 AVRIL 2018 DE 06:25 A 21:25 (ORDRE DE GAUCHE A DROITE ET DU HAUT VERS LE BAS) AU SITE CENTRAL DE SAINT-JEAN-SUR-RICHELIEU.....	77
FIGURE 5.6 : LIGNES D'EAU CALCULEES (EN JAUNE) SUR LES HUIT IMAGES MOYENNES DECOUPEES DE 06:25 A 21:25 (ORDRE DE GAUCHE A DROITE ET DU HAUT VERS LE BAS).....	78
FIGURE 5.7 : LIGNES D'EAU CALCULEES (EN JAUNE), MOYENNES DES LIGNES D'EAU NUMERISEES (EN BLEU), ET INTERVALLE DE CONFIANCE (EN ROUGE) SUR LES HUIT IMAGES MOYENNES DECOUPEES DE 06:25 A 21:25 (ORDRE DE GAUCHE A DROITE ET DU HAUT VERS LE BAS) .....	80
FIGURE 5.8 : IMAGE MOYENNE DE LA SEQUENCE DE 08:25 – SITE CENTRAL DE SAINT-JEAN-SUR-RICHELIEU.....	80
FIGURE 5.9 : ZOOM SUR L'IMAGE MOYENNE DE LA SEQUENCE DE 10:25 AVEC LA LIGNE D'EAU CALCULEE (EN JAUNE), LA VALEUR MOYENNE DES LIGNES NUMERISEES (EN BLEU), ET L'INTERVALLE DE CONFIANCE (EN ROUGE).....	80

FIGURE 5.10 : IMAGES MOYENNES DES SEQUENCES ACQUISES POUR LA JOURNEE DU 25 AVRIL 2017 DE 14:36 A 15:36 (ORDRE DE GAUCHE A DROITE ET DU HAUT VERS LE BAS) A LA TRAVERSE QUEBEC-LEVIS.....	81
FIGURE 5.11 : LIGNES D'EAU CALCULEES (EN JAUNE) SUR LES QUATRE IMAGES MOYENNES DECOUPEES DE 14:36 A 15:36 (ORDRE DE GAUCHE A DROITE ET DU HAUT VERS LE BAS).....	82
FIGURE 5.12 : LIGNES D'EAU CALCULEES (EN JAUNE), MOYENNES DES LIGNES D'EAU NUMERISEES (EN BLEU), ET INTERVALLE DE CONFIANCE (EN ROUGE) SUR LES QUATRE IMAGES MOYENNES DECOUPEES DE 14:36 A 15:36 (ORDRE DE GAUCHE A DROITE ET DU HAUT VERS LE BAS).....	82
FIGURE 5.13 : IMAGE DE CLASSIFICATION FINALE A 15:16 A LA TRAVERSE QUEBEC-LEVIS .....	83
FIGURE 5.14 : EXEMPLES DE CLICHES ACQUIS D'UN DAMIER DE CALIBRATION POUR L'ORIENTATION INTERIEURE .	84
FIGURE 5.15 : DIFFERENTS TYPES DE DISTORSION GEOMETRIQUE (ADAPTE DE OPENCV (2015)).....	86
FIGURE 5.16 : TESTS REALISES AU LABORATOIRE DE METROLOGIE DE L'UNIVERSITE LAVAL .....	89
FIGURE 5.17 : <i>RMSE</i> DES POINTS DE CONTROLE SUIVANT LE RAPPORT B/D.....	93
FIGURE 5.18 : BIAIS SUR LES POINTS DE CONTROLE SUIVANT LE RAPPORT B/D.....	94
FIGURE 5.19 : INCERTITUDE (SYMBOLISEE EN BLEU) SUR LA PROFONDEUR SUIVANT LE RAPPORT B/D ( $B1/D < B2/D$ ) .....	94
FIGURE 5.20 : POINTS HOMOLOGUES DETECTES POUR UNE BASE DE 1M (HAUT) ET UNE BASE DE 4M (BAS). .....	96
FIGURE 5.21 : RESIDUS EN FONCTION DU RAPPORT B/D.....	99
FIGURE 5.22 : RESIDUS VZ EN FONCTION DU RAPPORT B/D.....	100
FIGURE 5.23 : ÉTABLISSEMENT DES PARAMETRES DE REGRESSION FONCTIONNELLE A ET B (EXTRAITE DE POULIN ET AL. (2012)) .....	106
FIGURE 5.24 : EXEMPLE DE CARTE DE HAUTEURS D'EAU, OBTENUE A L'AIDE D'UNE ORTHOPHOTO ACQUISE EN 2011 A SAINT-JEAN-SUR RICHELIEU (EXTRAITE DE TANGUY (2016)) .....	107
FIGURE 5.25 : CARTE THEMATIQUE DU RISQUE HUMAIN RELIE A UNE INONDATION (EXTRAITE DE TANGUY (2016)) .....	108
FIGURE 5.26 : ÉTAT DU RESEAU ROUTIER LIE A UNE INONDATION (EXTRAITE DE TANGUY (2016)) .....	108



# 1 INTRODUCTION

## 1.1 Contexte

### 1.1.1 Les inondations

Dans le monde, les inondations constituent le risque naturel le plus fréquent et affectant le plus grand nombre d'individus. De 1995 à 2015, les inondations représentent 43% de l'ensemble des catastrophes naturelles répertoriées, causant près de 157000 décès et impactant environ 2.3 milliards d'individus (Figure 1.1, The United Nations for Disaster Risk Reduction, 2015). Aussi, bien que les pertes humaines aient significativement baissé depuis 1980, les pertes économiques ont au contraire atteint près de 23 milliards de dollars (US) par année, soit près de 140 % du PIB annuel des États-Unis d'Amérique (Jha *et al.*, 2012). Le risque d'inondations est ainsi considéré comme le plus critique tant au niveau de la sécurité de la population qu'au niveau du développement économique des régions impactées (Tanguy, 2016).

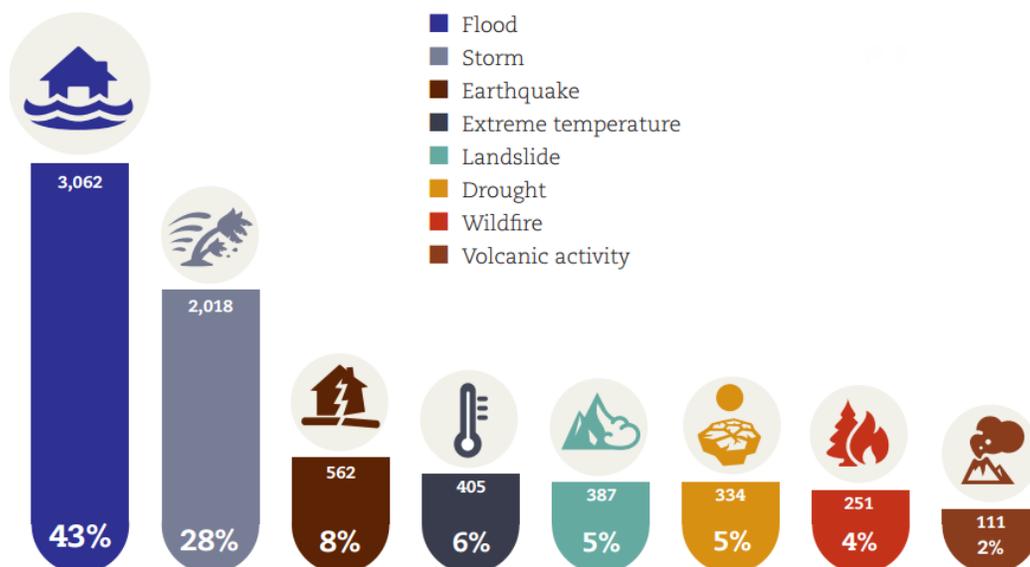


Figure 1.1 : Occurrence des désastres naturels par type de désastre sur la période 1995 – 2015 (The United Nations for Disaster Risk Reduction, 2015)

Au Canada, les inondations représentent aussi le type de catastrophe naturelle le plus récurrent et destructeur. Près de 1.2 millions de personnes ont été affectées, dont 154 tuées, et environ

10 milliards de dollars de dommages ont été occasionnés pour les 49 inondations majeures répertoriées depuis 1950. Selon l'Institut National de la Santé Publique du Québec (2018), 27 inondations majeures ont été recensées entre 1990 et 2012. Les inondations du bassin du lac Champlain et de la rivière Richelieu qui ont eu lieu entre avril et juin 2011 ont impacté près de 40 municipalités, soit 2500 résidences, pour 82 millions de dollars de dommage. Ce bilan n'inclut pas les inondations catastrophiques (hauteurs d'eau records) enregistrées en mai 2017 dans tout le bassin du fleuve St-Laurent, spécialement en Outaouais et le long de la rivière des Prairies, qui ont impactées plus de 5300 résidences (Sécurité Publique Québec, 2017).

Suite aux inondations du printemps 2011 et avec le soutien financier du Programme Canadien de Sureté et de Sécurité de Défense Canada, du Ministère de la sécurité Publique du Québec et de Ressources Naturelles Canada, le projet Gestion et Analyse du Risque d'Inondation (GARI) a été lancé en collaboration avec le laboratoire de Télédétection Environnementale et NORdique (TENOR) de l'INRS et la ville de Saint-Jean-sur-Richelieu. Ce projet de recherche et développement a pour objectif principal de développer un dispositif d'aide à la décision pour la préparation et l'intervention face aux risques reliés aux inondations.

### **1.1.2 État de la situation de l'outil GARI**

L'outil GARI est une application intégrée à un système d'information géographique composée de deux modes qui sont complémentaires : le mode préparatoire et le mode opérationnel. Dans les deux modes, des représentations cartographiques (intervalles de récurrence d'inondation, hauteurs d'eau au niveau des bâtiments, état du réseau routier, exposition des populations...) sont obtenues au moyen d'un module de cartographie dynamique des risques d'inondation développé par Poulin *et al.* (2012).

Le mode préparatoire peut être segmenté en deux sous-modes :

- un premier dit probabiliste qui permet d'extraire les spécificités locales (établissement de relations niveau-débit pour tout emplacement de la zone considérée), de caractériser divers scénarios possibles et d'en prévoir les impacts économiques et humains.
- un second dit prévisionnel permettant d'anticiper à court terme l'évolution du cours d'eau, de déclencher les processus pré-intervention ou encore d'émettre des avis et des alertes.

Le mode opérationnel permet quant à lui d'évaluer la gravité de la situation, de mettre en place les plans d'urgence ou encore de gérer la priorité des interventions.

Afin d'obtenir les meilleurs résultats cartographiques en mode opérationnel, le jeu de données idéal aurait les caractéristiques suivantes :

- une couverture spatiale étendue sur toute la zone d'étude, afin d'avoir une plus grande répétabilité des observations réparties sur le territoire. De ce fait, on minimise la probabilité d'avoir des observations aberrantes.
- une couverture temporelle continue pour avoir de l'information en temps réel.
- une méthode d'acquisition non intrusive (aucun contact direct avec le milieu, cf. paragraphe 2.1).
- la possibilité d'avoir une représentation visuelle des données qui permettrait à un utilisateur du système d'avoir des repères visuels de l'évolution de la crue.

Les données actuellement à disposition sont :

- Les observations aux stations hydrométriques de Saint-Jean-sur-Richelieu et de Carignan. Ce sont respectivement les niveaux d'eau et les débits qui sont déterminés pour un lieu spécifique en continu et stockés à une fréquence d'un enregistrement toutes les quinze minutes (Direction de l'expertise hydrique du MDDELCC, 2018). Aussi, dans les deux cas, la méthode est intrusive et aucun résultat visuel n'est émis.
- Les observations par imagerie radar satellitaire RADARSAT-2 couplées à un modèle numérique de terrain (MNT) permettent d'extraire les niveaux d'eau pour chaque pixel situé en limite et à l'intérieur de la zone inondée (Tanguy, 2016). Ainsi, la détermination du niveau d'eau n'est plus ponctuelle mais étendue sur une zone maximale de 400 kilomètres carrés, superficie couverte par une image. Cependant, RADARSAT-2 n'est pas un satellite géostationnaire, ce qui signifie que les données ne sont pas acquises en continu au-dessus de Saint-Jean-sur-Richelieu, la durée entre la commande et la réception des données varie entre 4h et 12h. La méthode est non intrusive et une représentation visuelle est possible, bien que son interprétation soit limitée pour un néophyte des images radar satellitaires.

Le Tableau 1.1 résume les caractéristiques des deux sources de données.

**Tableau 1.1 : Caractéristiques des différentes sources de données**

Observations	Couverture spatiale	Couverture temporelle	Méthode	Représentation visuelle
<b>Stations hydrométriques</b>	Ponctuelle	Continue, données enregistrées aux 15 minutes	Intrusive	Aucune
<b>Imagerie satellitaire</b>	Étendue, jusqu'à 400 km <sup>2</sup>	Faible, une image entre 4h et 12h après la commande	Non intrusive	Oui, mais interprétation limitée

## 1.2 Problématique

Les deux types de données existant en mode opérationnel ont des caractéristiques complémentaires. Toutefois, certaines limitations du système sont encore présentes. Notamment, aucun des deux types d'observations ne présente à la fois une couverture temporelle continue couplée à une couverture spatiale étendue. On peut envisager le cas d'une crue soudaine qui occasionne des bris aux stations hydrométriques : il pourrait n'y avoir aucune information provenant des stations tandis que les observations par télédétection auraient un retard de plusieurs heures.

Pour combler cette déficience, il a été décidé de mettre en place un réseau de caméras *in situ* qui aurait les caractéristiques suivantes :

- une couverture spatiale d'étendue variable dépendant de la topographie et de l'installation.
- une couverture temporelle modulable, à la fois continue et programmable.
- une méthode d'acquisition non intrusive avec des systèmes situés sur les berges de la rivière.
- des informations visuelles disponibles et facilement interprétables pour un utilisateur même novice en géomatique et en hydrologie.

Ce réseau serait à la fois capable de fournir des informations qualitatives par vision directe des images acquises mais aussi un suivi quantitatif par extraction du niveau d'eau.

### **1.3 Objectifs**

L'objectif général de ce mémoire est de mettre en place un réseau de surveillance par caméras le long de la rivière Richelieu et de concevoir une méthode automatique de détermination du niveau d'eau.

Deux sous-objectifs ont été définis afin de rendre cette composante de GARI opérationnelle :

1. Extraire la ligne d'eau à partir des images acquises par les caméras.
2. Géoréférencer la ligne d'eau extraite afin d'obtenir le niveau d'eau.

Le niveau d'eau étant connu et associé à des coordonnées planimétriques, il pourrait ensuite être utilisé avec l'outil GARI pour la cartographie de l'aléa inondation en temps réel (cf. paragraphe 5.4).



## **2 REVUE DE LITTÉRATURE**

Avant d'exposer la méthode mise en place pour la réalisation des objectifs de ce travail de recherche en sciences de l'eau, nous allons dans un premier temps faire un état de l'art des différents moyens permettant de déterminer le niveau de l'eau. Nous allons ensuite approfondir les méthodes d'analyse pouvant être utilisées pour la détermination de la ligne d'eau à partir de données de caméras. Enfin, différentes méthodes de géoréférencement permettant la conversion des coordonnées pixelliques de la ligne d'eau en coordonnées réelles, deux planimétriques et une altimétrique représentant le niveau d'eau, seront exposées.

### **2.1 Différents capteurs d'acquisition du niveau d'eau**

Dans un premier temps, définissons la notion de capteur. Fraden (2004) définit un capteur comme « un dispositif qui reçoit et réagit à un signal ou à un stimulus ». Différentes caractéristiques propres à chaque capteur permettent de les différencier entre eux notamment la raison d'être (information à mesurer), la taille, la technologie utilisée et le prix.

En hydrométrie, pour mesurer la hauteur d'eau, les capteurs utilisés sont appelés limnimètres et ceux permettant d'enregistrer ces valeurs en continu sont appelés limnigraphes (Fourquet, 2005). Dans un contexte d'inondations, on préfère distinguer les capteurs selon leur caractère intrusif. Un capteur intrusif est en contact avec le milieu d'étude et il est susceptible de subir des dommages (avec une crue) alors qu'un capteur non intrusif n'est pas en contact avec le milieu.

#### **2.1.1 Capteurs intrusifs**

##### ➤ Les échelles limnimétriques

Le limnimètre le plus rudimentaire est l'échelle limnimétrique. C'est une échelle graduée qui peut être réalisée au moyen de divers matériaux (bois, métal, ...), fixée à la verticale ou selon une certaine inclinaison prise en compte dans l'espacement des graduations. Afin de lire le niveau, un opérateur doit constamment être sur place car aucun enregistrement de données n'est effectué, les échelles sont donc généralement utilisées à titre informatif et comme moyen de contrôle.

Elles peuvent cependant être utilisées en parallèle avec un système d'imagerie non-intrusif, créant ainsi un capteur hybride (TENEVIA S.A.S., 2012).

➤ Les limnigraphes à flotteur

Les limnigraphes à flotteur permettent de déterminer le niveau d'eau à l'aide d'un flotteur maintenu à la surface de l'eau par un jeu de poulies et de contrepoids. Le flotteur suit les fluctuations de l'eau et les résultats sont reportés sur un tambour au moyen d'un stylet, la précision est de l'ordre de 5 mm (EPFL, 2018).

➤ Les limnigraphes à pression

Les limnigraphes à pression ou « bulle à bulle » mesurent les variations de pressions lors des changements de niveaux d'eau. Pour cela, il faut injecter dans la rivière un débit d'air au moyen d'un compresseur et d'un tuyau. La pression de l'air à l'intérieur du tuyau, connue à l'aide d'un manomètre, est proportionnelle à la hauteur d'eau, permettant par la suite le calcul du niveau d'eau (EPFL, 2018).

➤ Le piézomètre

Fiabiles et peu onéreuses, les sondes piézométriques sont les plus répandues actuellement. Le principe de fonctionnement est similaire aux limnigraphes à pression en mesurant la pression hydrostatique à une profondeur donnée de la rivière. Composé d'une membrane déformable sous l'effet de la pression, son installation est plus facile que le limnigraphe précédent (Fourquet, 2005).

➤ Les sondes capacitives

Elles sont utilisées afin de mesurer la tension entre deux plaques situées au fond et à la surface de la rivière. La tension étant proportionnelle à la distance entre les deux plaques, on peut déduire le niveau d'eau (Fourquet, 2005).

Outre une absence de représentation visuelle de la scène et un contact direct avec le milieu, toutes ces méthodes présentent l'inconvénient d'une prise de mesure ponctuelle<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Pour tout le mémoire, le terme « mesure ponctuelle » réfère à une acquisition limitée dans l'espace.

### 2.1.2 Capteurs non intrusifs

#### ➤ La sonde à ultrasons

Un limnimètre à ultrasons mesure le temps d'aller-retour nécessaire à une onde sonore pour parcourir le trajet entre la sonde et l'eau. Le dispositif doit être fixé à la verticale du lieu au-dessus de la rivière pour pouvoir fonctionner convenablement. L'onde est émise vers le bas puis réfléchi à l'interface air-eau avant d'être de nouveau captée par le dispositif. Afin d'obtenir les résultats les plus précis possibles, ce système doit être utilisé pour les cours d'eau calmes, sans turbulence (Fourquet, 2005). L'acquisition ponctuelle de données et l'impossibilité d'acquérir des informations visuelles constituent les limitations de ce type de capteur.

#### ➤ Le radar

Le radar est similaire au capteur à ultrasons, la seule différence réside dans le type d'onde émis, ce sont ici des ondes électromagnétiques hyperfréquences. L'avantage de ce type de capteur est son insensibilité face aux variations de température et d'humidité de l'air (Fourquet, 2005). Les inconvénients du radar sont similaires à ceux de la sonde à ultrason.

#### ➤ Les satellites

Les nombreux satellites de télédétection permettent la détermination du niveau d'eau de différentes manières. Par exemple, Tanguy (2016) utilise l'imagerie radar satellitaire couplée à un modèle numérique de terrain pour détecter l'étendue d'eau de la rivière Richelieu. De la même manière, Maillard & Calmant (2013) utilisent l'imagerie radar satellitaire sur la rivière Sao Francisco au Brésil. La technologie radar était souvent associée à des coûts monétaires importants avant le lancement de Sentinel-1 en 2014 (European Spatial Agency, 2018), dont les données radar sont distribuées gratuitement. Gupta & Banerji (1985) utilisent des cartes topographiques associées à l'imagerie multispectrale Landsat afin de déterminer l'altitude de surface d'un large réservoir en Inde. Des données d'altimétrie acquises directement depuis certains satellites (ICESat avec le capteur LiDAR *Geoscience Laser Altimetry System* et Envisat avec l'altimètre radar RA-2 ) permettent aussi d'effectuer des mesures de niveaux d'eau (Zhang *et al.*, 2011). Cette technologie a l'avantage d'avoir une couverture spatiale importante mais possède l'inconvénient d'une période de retour longue (plusieurs heures à plusieurs jours).

#### ➤ Les caméras

Comme alternative à ces solutions, les caméras peuvent être utilisées à des fins d'hydrométrie. Elles sont déjà très utilisées pour déterminer la vitesse d'écoulement d'un cours d'eau (Daigle *et*

*al.*, 2013). Aussi, de nombreux travaux de recherche ont été réalisés afin de déterminer le niveau d'eau. On peut distinguer les travaux qui s'appuient sur l'installation de matériel complémentaire dans le champ de vision (Gilmore *et al.*, 2013) de ceux qui n'en nécessitent pas (Koschitzki *et al.*, 2014). Nous avons décidé d'utiliser les caméras pour détecter le niveau d'eau sans l'utilisation de matériel complémentaire afin de rendre le système le plus économe possible et potentiellement le plus transmissible à tous les types de rivière.

Les parties suivantes exposent les différents moyens permettant d'extraire le niveau d'eau uniquement à l'aide de caméras.

## **2.2 Extraction de la ligne d'eau à partir de caméras**

Depuis l'apparition des caméras numériques, de nombreux progrès ont été réalisés dans les domaines du traitement d'image et de la vision par ordinateur. À partir d'images fixes (photographies) ou animées (vidéographies), divers algorithmes de traitement peuvent être utilisés pour analyser le contenu visuel acquis. Nous allons ici nous attarder sur les techniques les plus pertinentes existant actuellement et pouvant être adaptées à la spécificité du projet GARI.

### **2.2.1 Analyse d'images fixes (photographies)**

Une approche possible permettant l'identification de la ligne d'eau consiste à réduire la quantité d'information à analyser en ne sélectionnant que les pixels représentant des contours sur l'image. Koschitzki *et al.* (2014) ont par exemple utilisé des filtres *Laplacian of Gaussian (LoG)*. Ces filtres permettent dans la majorité des cas de lisser les surfaces d'eau tout en discriminant les pixels appartenant à la berge. Une analyse par colonne permet par la suite de sélectionner les valeurs les plus importantes et les valeurs aberrantes sont éliminées à l'aide d'une analyse par fenêtre glissante (*sliding window*). Cependant, les conditions d'éclairage changeantes constituent l'une des plus grandes difficultés de cet algorithme, la prise en compte du voisinage n'étant réalisée que selon une dimension.

Afin de créer un algorithme mieux adapté, il faut que ce dernier puisse utiliser la complémentarité de l'information disponible suivant les lignes et les colonnes. À cet effet, Pongsiriyaporn *et al.* (2014) ont décidé de réduire la quantité d'information à traiter en réalisant une segmentation de l'image par la méthode des *k-means*. Cet algorithme itératif s'appuie sur les valeurs spectrales des pixels et permet de créer un nombre de groupes défini par l'utilisateur

de telle manière à ce que ces groupes possèdent des valeurs d'erreurs moyennes quadratiques minimales. Une analyse par colonne est ensuite réalisée en effectuant des soustractions pixel à pixel : deux pixels appartenant à un même groupe auront une différence nulle tandis que deux pixels appartenant à deux groupes différents auront une différence plus ou moins importante suivant la similarité de ces derniers. Par dénombrement du nombre de pixels non nuls sur chaque ligne suivie d'une analyse statistique, la ligne d'eau est alors définie. Ici, bien que les résultats prennent en compte les deux dimensions de l'image, la ligne d'eau choisie constitue la ligne la plus probable et elle est définie sur toute la largeur de l'image, certaines portions sont alors tracées sur la surface d'eau (Figure 2.1).



**Figure 2.1 : Exemple de détection de la ligne d'eau (en jaune) dans le cadre d'une inondation (Pongsiriyaporn et al., 2014)**

Afin d'éviter ce dernier problème, Latapie (2015) a mis en place un algorithme de classification en définissant une région d'étude : les pixels situés en dehors de cette région sont exclus des résultats finaux. Dans cette étude sur le couvert de glace marine, l'algorithme de classification permettant la distinction entre la glace et l'eau est quant à lui basé sur un mélange de segmentation hiérarchique ascendante et par regroupement *k-means*. Les résultats sont présentés sur deux images qui doivent être analysées par un opérateur. La solution ne s'appuie plus sur des traitements successifs par ligne et par colonne mais la dernière étape devant être réalisée visuellement, l'automatisation de la méthode n'est pas encore optimale. Enfin, bien que des traitements supplémentaires permettant de détecter les reflets aient été intégrés, les différences de luminosité fragilisent encore les processus de classification.

En insérant un critère de proximité et de connectivité dans l'algorithme de segmentation, les résultats sont généralement améliorés. Plusieurs algorithmes prennent en compte des critères de spatialité comme les techniques de segmentation par *mean shift* (Comaniciu & Meer, 2002) ou de segmentation multirésolution mis en place dans le logiciel Trimble eCognition © (2018).

Cependant ces algorithmes sont soit lourds en calculs, soit protégés par des droits d'auteurs. Hoonhout *et al.* (2015) ont utilisé une autre technique de segmentation qui est à la fois robuste et rapide, c'est l'algorithme *Simple Linear Iterative Clustering* (Achanta *et al.*, 2012). Il permet de créer des sous-ensembles homogènes en adaptant l'algorithme *k-means* dans un contexte local. Le nombre de groupes, appelés aussi *superpixels*, est défini en entrée. Connaissant les dimensions de l'image, les noyaux des groupes sont répartis uniformément sur l'image pour la première itération *k-means*. Il faut une dizaine d'itérations pour converger vers une solution acceptable et une analyse de connectivité est ensuite réalisée pour éliminer les pixels isolés. La performance de cet algorithme, tant au niveau de la reconnaissance que du temps d'exécution, a été mise en évidence par comparaison avec d'autres techniques de segmentation (Achanta *et al.*, 2012). Une fois la segmentation terminée, Hoonhout *et al.* (2015) ont extrait environ 1700 caractéristiques des *superpixels* créés afin de réaliser une classification *Logistic Regressor (LR)* sémantique de territoires côtiers avec cinq classes de sortie différentes. Dans notre cas, nous souhaitons faire une segmentation et une classification automatiques afin d'obtenir deux classes de sorties dont la limite est définie le plus réellement possible dans n'importe quel contexte; l'extraction de milliers de caractéristiques paraît être un critère moins important que la taille des groupes créés et l'algorithme de classification utilisé (cf. paragraphe 4.1).

### **2.2.2 Analyse d'images animées (vidéographies)**

Une suite d'images fixes acquises à intervalles réguliers permet de créer un document vidéo. En définissant la fréquence d'acquisition et le format d'enregistrement, les caméras actuelles sont capables de produire des images animées. Ces images peuvent alors être analysées de la même manière que les images fixes, mais aussi décortiquées dans le temps. En effet, il est très rare qu'une scène filmée soit totalement immobile, notamment le passage d'une voiture, l'impact du vent sur l'eau, sur les arbres, les mouvements des vagues et des marées et la turbulence des cours d'eau. Tous ces éléments sont visibles à plus ou moins long terme et peuvent être extraits sous certaines conditions.

Kröhnert (2016) a développé une application permettant d'extraire la ligne d'eau à partir d'images acquises depuis un téléphone intelligent. Pour cela, il capture une vidéo<sup>2</sup> et cale toutes les images par rapport à la première image. Il calcule ensuite des images de différences

---

<sup>2</sup> Depuis un point de vue fixe, les seuls mouvements sont causés par le non immobilisme de l'opérateur.

en effectuant toutes les différences de deux images successives en niveaux de gris possibles. En effectuant la somme des valeurs absolues des images de différences, il peut alors estimer les éléments en mouvement, à savoir l'eau, sur toute la séquence vidéo. En réalisant une analyse mathématique pour chaque colonne, on trouve alors la ligne d'eau. Cette technique a l'avantage d'être très rapide et facile à mettre en place, mais la recherche de la ligne d'eau sur chaque colonne rend le dispositif très sensible aux variations de luminosité. De plus, si on considère l'observation d'un cours d'eau sans turbulence lors d'une journée sans vent, les résultats seront influencés davantage par le bruit interne de la caméra que par le contexte des images. Toutefois, le calcul d'une image moyenne de séquence permet de lisser les mouvements sur l'eau, ce qui peut être très intéressant dans un processus de classification (cf. paragraphe 4.1).

McKenna *et al.* (2000) utilisent une méthodologie qui permet de construire dans un premier temps un modèle temporel de caractérisation de l'arrière-plan. Cette méthode est efficace lorsque les changements de l'arrière-plan sont lents, graduels et dus essentiellement aux variations de luminosité. Toutefois, si des mouvements plus importants, mais non pertinents pour l'analyse, sont observés (comme les ombrages sur le sol du mouvement des feuilles dû au vent par exemple), la technique perd toute son efficacité.

Iwahashi *et al.* (2006) utilisent les propriétés du format de compression JPEG2000 afin d'obtenir, après la transformée en ondelettes, quatre sous-images sur lesquelles on peut détecter la ligne d'eau. Des tests ont été effectués pour divers sites avec contextes et conditions météorologiques différents. On peut constater que sur les six échantillons de calcul, deux semblent obtenir des résultats convenables avec l'utilisation d'une ou plusieurs sous-images alors que les résultats sont plus dispersés pour les autres sites. Bien que l'utilisation de la compression JPEG2000 semble aboutir à des résultats intéressants pour les quais artificiels, son utilisation reste encore limitée pour les berges naturelles.

## **2.3 Géoréférencement de la ligne d'eau**

Une fois la ligne d'eau détectée dans un système pixellique, il convient de transformer les coordonnées de ces pixels dans un système planimétrique et altimétrique connu afin de pouvoir positionner le niveau d'eau sur le terrain. On considère ici que l'orientation intérieure des caméras a été faite (cf. paragraphe 4.3.1). Il reste l'orientation extérieure à réaliser, consistant à déterminer les paramètres de position et d'orientation de la caméra par rapport au système de

référence choisi. Suivant le nombre de caméras observant la même scène, différentes techniques peuvent être utilisées.

### 2.3.1 Monorestitution

La monorestitution est utilisée lorsqu'on ne dispose que d'une seule caméra. On est toutefois face à un problème majeur : pour un point observé, on a deux coordonnées dans le système photographique que l'on souhaite transformer en trois coordonnées dans le système de référence choisi. Il s'agit donc d'un problème insoluble puisque seulement deux observations sont disponibles pour estimer trois inconnues. Pour pallier à ce manque d'information, il est alors possible d'utiliser un modèle numérique de terrain (MNT) préalablement établi de la scène.

La première étape consiste à effectuer un relèvement spatial. À l'aide d'au moins trois points d'appui<sup>3</sup> et des équations de colinéarité (Luhmann *et al.*, 2013), on peut déterminer les paramètres d'orientation extérieure de la caméra. Les équations de colinéarité assurent que le point situé sur le capteur est aligné avec le centre optique de la caméra et le point terrain correspondant.

La seconde étape est un procédé itératif permettant de redresser les vecteurs numérisés directement sur la photographie en utilisant le MNT (Boulianne, 2015). Pour cela, il faut :

- Calculer la position planimétrique (X, Y) avec les équations de colinéarité en imposant une altitude Z nulle.
- Déduire du modèle numérique de terrain la coordonnée altimétrique Z correspondant à l'emplacement (X, Y).
- Refaire le calcul de la position planimétrique en imposant à Z la valeur trouvée précédemment.

Ce calcul est réalisé jusqu'à ce que la valeur de Z ne change plus.

Ainsi, connaissant l'orientation (intérieure et extérieure) de la caméra et un modèle mathématique du terrain, on peut déterminer les coordonnées 3D de tout point visible sur l'image acquise.

---

<sup>3</sup> Points visibles sur toutes les photos d'une même scène et dont les coordonnées terrain sont connues dans un système de référence.

À partir des mêmes données, Corripio (2004) effectue un calcul inverse au calcul de monorestitution classique, à savoir qu'il crée une photographie virtuelle du modèle numérique de terrain afin d'établir la relation entre les systèmes de coordonnées 2D et 3D.

### **2.3.2 Stéréorestitution**

La stéréorestitution est utilisée lorsque deux caméras observent la même scène ou lorsque la scène est observée par une seule caméra mais sous deux points de vue différents. On est donc dans un problème à quatre observations pour trois inconnues, mathématiquement solvable sans matériel supplémentaire. La suite du développement traite essentiellement de la configuration avec deux caméras.

Deux types de calculs peuvent être envisagés afin de faire l'orientation extérieure du système stéréoscopique :

- le calcul en une seule étape.
- le calcul en deux étapes distinctes.

Le calcul en une seule étape utilise le relèvement spatial et se base sur les équations de colinéarité. Nous devons déterminer six paramètres de position et six d'orientation, soit un total de douze paramètres. Ainsi, il faut six points d'appui pour résoudre ce système. Toutefois, le calcul en une seule étape n'utilise pas la relation géométrique liant les deux caméras.

Le calcul en deux étapes est celui qui est le plus utilisé en photogrammétrie. La première étape du calcul (orientation relative) consiste à établir le lien entre les deux caméras. Pour cela, on s'appuie sur le principe de coplanarité : les vecteurs issus du centre optique de chaque caméra et pointant un élément de terrain commun aux deux images appartiennent au même plan que le vecteur joignant les deux centres optiques des caméras. Afin de résoudre le système d'équation à cinq paramètres généré, nous avons besoin de cinq points homologues<sup>4</sup>. Pour la seconde étape (orientation absolue), on utilise une transformation par similitude spatiale à sept paramètres et trois points d'appui suffisent à trouver une solution au système. Plus d'informations concernant la mathématique de l'orientation extérieure en deux étapes est donnée au paragraphe 4.3.2.

---

<sup>4</sup> Points dont les coordonnées sont connues dans les systèmes photographiques d'au moins deux caméras.

### 2.3.3 Restitution multi-image

La restitution multi-image se base sur les observations obtenues à partir des photographies acquises par un nombre illimité de caméras observant la même scène. Un calcul en bloc dit aussi *bundle block adjustment* permet à la fois de solutionner des systèmes de taille importante, de générer des valeurs approchées pour les inconnues et de détecter des erreurs aberrantes. Il peut être résolu à l'aide d'observations photogrammétriques seulement afin d'obtenir un modèle en trois dimensions mais peut aussi comporter des observations topographiques pour le géoréférencement. Il s'appuie essentiellement sur le principe de colinéarité (Luhmann *et al.*, 2013). Le développement de cette technique est relié à la progression constante de la technologie informatique.

La plupart des logiciels de photogrammétrie contemporains comme Agisoft Photoscan ©, Photomodeler Scanner ©, Pix4D ©, VisualSFM © utilisent cette technique et plus généralement la méthodologie *Structure from Motion (SfM)* qui permet l'obtention d'un modèle 3D texturé géoréférencé à partir d'observations photogrammétriques et topographiques (Westoby *et al.*, 2012).

Dans le cadre de ce projet de recherche, nous avons décidé d'utiliser la solution stéréoscopique pour plusieurs raisons :

- Le modèle numérique de terrain disponible sur le territoire de Saint-Jean sur-Richelieu a une résolution planimétrique d'un mètre pour une précision altimétrique de 15 cm, ce qui entraîne des incertitudes déjà élevées du niveau d'eau avant calcul. Ainsi la solution de monorestitution n'a pas été retenue.
- La mise en place de systèmes stéréoscopiques permet d'obtenir des valeurs de niveau d'eau avec une précision dépendant de l'installation et de la topographie du lieu. Aussi, si l'ensemble caméra/lentille est de bon calibre (distorsions chromatiques et géométriques faibles, grande résolution du capteur) et que le nuage de points obtenu après orientation relative est conséquent, on peut envisager de détecter les surfaces susceptibles d'appartenir à des plans d'eau pour pouvoir déterminer le niveau d'eau (Poux *et al.*, 2014).
- L'utilisation de plus de deux caméras par site a été abandonnée en raison des coûts d'achat et d'installation des caméras, mais aussi pour des raisons logistiques (bande passante nécessaire à la transmission des données).

## 3 SÉLECTION DES CAMÉRAS ET DES SITES

### 3.1 Contraintes du projet

Lors de la mise en place d'un système de surveillance par caméras, il est nécessaire de bien identifier toutes les contraintes avant l'installation. Ces contraintes sont de différentes natures, et vont être étudiées en détail dans cette partie.

➤ Contraintes juridiques :

Le projet GARI a été réalisé en collaboration avec la ville de Saint-Jean-sur-Richelieu. Afin de minimiser les démarches administratives, les sites d'installation des caméras sont choisis dans le domaine public. De plus, d'après l'article 36 du Code Civil du Québec (Publications Québec, 2018), il est interdit de « capter ou utiliser [l'image d'une personne] ou sa voix lorsqu'elle se trouve dans des lieux privés ». L'installation doit donc être réalisée de telle manière à respecter la vie privée de tout individu passant dans le champ de vision de la caméra.

➤ Contraintes de fonctionnement :

Afin de fonctionner, les caméras nécessitent une source d'énergie. Cette énergie peut provenir d'une source isolée et rechargeable (batterie et panneaux solaires par exemple), sinon, le matériel peut être raccordé à un réseau d'électricité. Pour ne pas alourdir l'installation, il a été décidé de sélectionner les sites de façon à relier le système au réseau d'électricité de la ville, on s'est donc assuré qu'un poteau électrique soit présent à proximité.

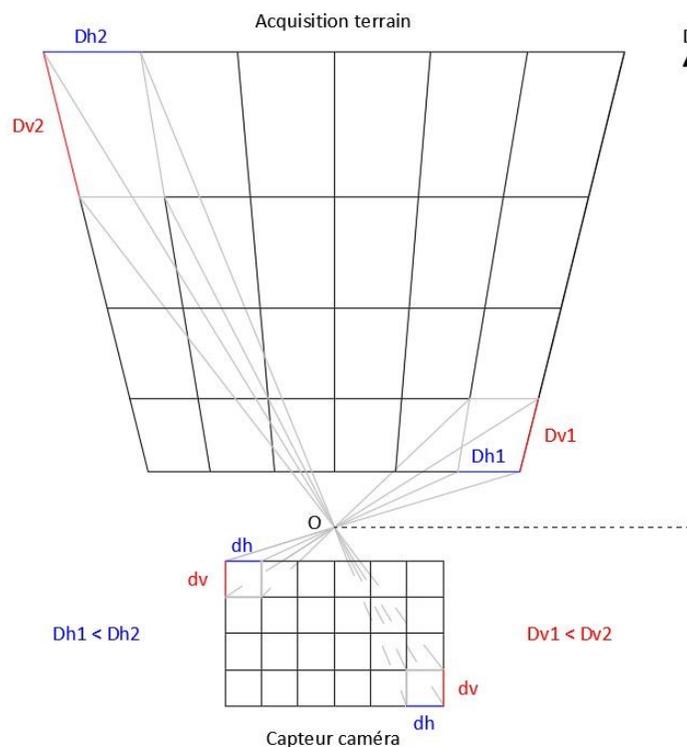
Aussi, le territoire de Saint-Jean-sur-Richelieu peut faire face à des conditions climatiques extrêmes (Environnement Canada, 2018) : la température minimale historique enregistrée est de -38°C, la température maximale est de +35°C alors que les précipitations peuvent atteindre parfois 100 mm en une journée. Il faut donc choisir des caméras qui soient étanches et résistantes à des conditions extrêmes.

Enfin, les inondations pouvant intervenir de jour comme de nuit, il faut s'assurer que les caméras possèdent un capteur permettant l'acquisition d'images lors de la nuit.

➤ Contraintes photogrammétriques :

La première contrainte est la plus évidente : la zone photographiée ne doit contenir aucun obstacle obstruant le champ de vision.

Aussi, nous sommes dans un cas de photogrammétrie terrestre, avec une prise de clichés obliques, ce qui implique que la dimension des pixels sur le terrain n'est pas égale pour toute la zone étudiée. Comme le met en évidence la Figure 3.1, les pixels situés au premier plan couvrent des dimensions inférieures aux pixels situés au dernier plan sur le terrain. Il est donc important d'estimer la résolution d'un pixel à une distance donnée.



**Figure 3.1 : Résolutions terrain d'un pixel suivant l'éloignement (D) avec le centre de perspective (O) de la caméra (adaptée de Wu et al. (2009))**

Enfin, pour tout relevé photogrammétrique, certaines précautions doivent être prises. Des règles concernant la géométrie de la scène, les spécificités de la caméra et des règles d'organisation ont été rédigées par le Comité International de la Photogrammétrie Architecturale (CIPA). Bien que le présent projet n'ait pas pour but la restitution photogrammétrique d'un bâtiment, CIPA (2018) donne les directives les plus adéquates à suivre pour l'extraction d'information quantitative à partir d'un modèle stéréoscopique.

➤ Contraintes de gestion vidéo :

Afin de faire le suivi en continu de l'aléa inondation, les informations des caméras doivent être acquises et transmises en direct avant de pouvoir être analysées. La transmission des données

peut être réalisée avec ou sans fil. Dans le cas où la transmission est sans fil, de l'équipement supplémentaire (antenne, routeur) doit être utilisé et adapté suivant la résolution de la caméra, le flux vidéo souhaité, son emplacement et son éloignement par rapport à d'autres points du réseau (Goldenberg, 2010). Ainsi, on a privilégié des sites d'installation à proximité d'infrastructures municipales où une connexion filaire est possible.

Aussi, bien que les caméras soient utilisées majoritairement dans le projet pour le mode opérationnel, on peut envisager des applications de prévision à court terme par suivi régulier du niveau d'eau. C'est la raison pour laquelle il faut tenir compte des différentes fonctionnalités possibles lors du choix du logiciel de gestion vidéo : on souhaite un logiciel capable d'effectuer des enregistrements à intervalles temporels fixes, mais aussi une interactivité qui permette d'acquérir des données en direct et en continu.

➤ Contraintes économiques :

Afin de pouvoir proposer le dispositif GARI à d'autres municipalités, la technologie à mettre en œuvre doit être la moins onéreuse possible tout en assurant son bon fonctionnement.

## **3.2 Caméra choisie**

Dans un contexte de surveillance de phénomènes climatiques ou d'infrastructures et de travaux photogrammétriques en général, on préfère utiliser des caméras de type *Single Lens Reflex* qui possèdent des distorsions géométriques plus faibles que des caméras de type *Compact*. De plus, l'exposition est plus facilement programmable sur ce type de caméras, ce qui facilite les calculs et assure une excellente précision (Luhmann *et al.*, 2013).

Les caractéristiques spécifiques au projet étant nombreuses, nous avons dû faire des compromis concernant le choix de la caméra. L'information visuelle en temps réel et l'interactivité du système étant des critères primordiaux, nous avons donc privilégié dans le choix des caméras celles permettant d'être facilement reliées et gérées à partir d'un réseau internet.

### **3.2.1 Caractéristiques techniques**

La caméra utilisée dans ce projet est une caméra de surveillance *Internet Protocol* (IP) commercialisée par la société Avigilon. Cette caméra est utilisée en parallèle avec le logiciel de gestion vidéo Avigilon Control Center (ACC) Enterprise, déjà disponible au département

informatique de la ville de Saint-Jean-sur-Richelieu. Les autres modèles de caméras présélectionnés peuvent être consultés en annexe I. Les caractéristiques principales de la caméra sélectionnée sont fournies au Tableau 3.1 ci-dessous. Les caractéristiques complètes sont fournies en annexe II.

**Tableau 3.1 : Principales caractéristiques techniques de la caméra Avigilon HDH4**

<b>Modèle</b>		HD H4 4K
<b>Type</b>		Fixe
<b>Focale minimale (mm)</b>		4,3
<b>Angles de vision (°)</b>		44 - 81
<b>Résolution (pixels)</b>		3840 x 2160
<b>Zoom optique</b>		1,8x
<b>Taille capteur (mm)</b>		6,0 x 3,4
<b>Température (°C)</b>		- 40 à + 55
<b>Capteur de nuit</b>	<b>Type</b>	DEL
	<b>Portée (m)</b>	30
	<b>Intensité minimale (lux)</b>	0
<b>Poids (kg)</b>		1,7
<b>Alimentation</b>	<b>DC (V)</b>	12
	<b>AC (V)</b>	24
	<b>Power over Ethernet</b>	IEEE 802.3af, Classe 3
<b>Consommation (W)</b>		13 max.
<b>Taille d'une image brute (Mo)</b>		24
<b>Prix</b>		≈ 1600 \$
<b>Aperçu</b>		 <p>©Avigilon Corporation</p>

Concernant le coût d'un tel système, il faut compter un coût unitaire de 1 380 \$ pour une caméra, et 205 \$ pour la licence ACC par caméra. Considérant que pour le projet nous avons acheté 6 caméras (+ 2 caméras « test ») accompagnées de 6 licences, le coût total avec taxes incluses est de 12 500 \$ environ.

### 3.2.2 Dispositif d'installation

Le dispositif de surveillance est composé de deux caméras fixées sur une base métallique. Les visées des caméras sont à peu près parallèles afin de faciliter les calculs photogrammétriques. Si la connexion avec le serveur de stockage est réalisée sans fil, elles sont installées avec un routeur et une antenne directionnelle.

Au moment de l'installation, nous n'avons pas encore d'information relative à l'impact de la longueur de la base sur la qualité de la détermination de coordonnées tridimensionnelles (Hullo, 2010). Nous avons donc décidé de mettre en place une base d'un mètre de longueur ( $B = 1\text{ m}$ ) afin d'assurer un grand recouvrement du couple stéréoscopique permettant ainsi le calcul d'un plus grand nombre de coordonnées en trois dimensions tout en facilitant l'opération de mise en correspondance des deux caméras. La Figure 3.2 illustre un dispositif de surveillance.



Figure 3.2 : Dispositif de surveillance sur le site nord à Saint-Jean-sur-Richelieu

### 3.2.3 Calcul de dimensions spécifiques

Avant l'installation, il est important d'estimer quelques dimensions usuelles en photogrammétrie suivant les caractéristiques de la caméra. Pour la suite des calculs et du projet, on a décidé de fixer la distance focale à  $f = 4.3 \text{ mm}$  afin d'avoir le champ de vision le plus large possible.

➤ Dimension d'un pixel sur le terrain

Connaissant la résolution et la taille du capteur, on peut déduire la taille d'un pixel sur le capteur : elle est de l'ordre de  $p = 1.6 \mu\text{m}$ . Cette valeur est assez faible et s'explique par la taille du capteur (Tableau 3.1), on s'attend à avoir donc plus de bruit chromatique en comparaison avec une caméra plein format<sup>5</sup> (Luhmann *et al.*, 2013).

Aussi, considérant que la dimension des pixels sur le terrain dépend de l'éloignement avec le capteur et de l'inclinaison de la caméra (*tilt*), on peut évaluer la dimension d'un pixel sur le terrain suivant trois composantes  $GSD$ <sup>6</sup> telles qu'illustrées à la Figure 3.3 et à la Figure 3.4 : les deux premières composantes ( $GSD1$  et  $GSD2$ ) suivent l'axe de visée et la troisième composante ( $GSD3$ ) est perpendiculaire aux deux autres et parallèle à la largeur du capteur.  $GSD1$  et  $GSD3$  sont des composantes planimétriques tandis que  $GSD2$  est altimétrique. Après simplification des calculs de Wu *et al.* (2009), les équations suivantes permettent d'obtenir les valeurs des composantes, les notations sont détaillées à la Figure 3.3 et à la Figure 3.4.

$$GSD1 = D - H * \tan \left( i + \arctan \left( \frac{0.5 * v - p}{f} \right) \right) \text{ avec } i = \arctan \left( \frac{0.5 * v}{f} \right) \quad (1)$$

$$GSD2 = \frac{GSD1 * H}{D} \quad (2)$$

$$GSD3 = \frac{p * D'}{f} \text{ avec } D' = \frac{H}{\cos (i + 0.5 * vfov)} \quad (3)$$

---

<sup>5</sup> Dimensions d'un capteur plein format ou *full frame* : 24 mm x 36 mm.

<sup>6</sup> *Ground Sample Distance* : résolution spatiale d'un pixel sur le terrain.

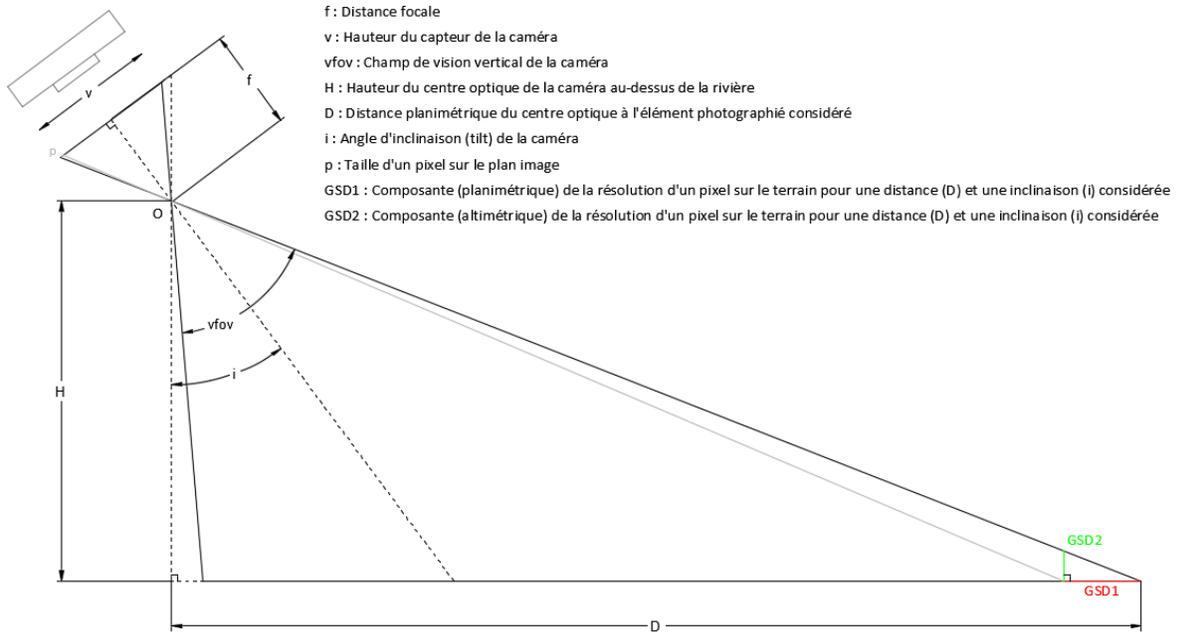


Figure 3.3 : Composantes de la résolution d'un pixel sur le terrain suivant l'axe de visée – vue de profil (adaptée de Wu *et al.* (2009))

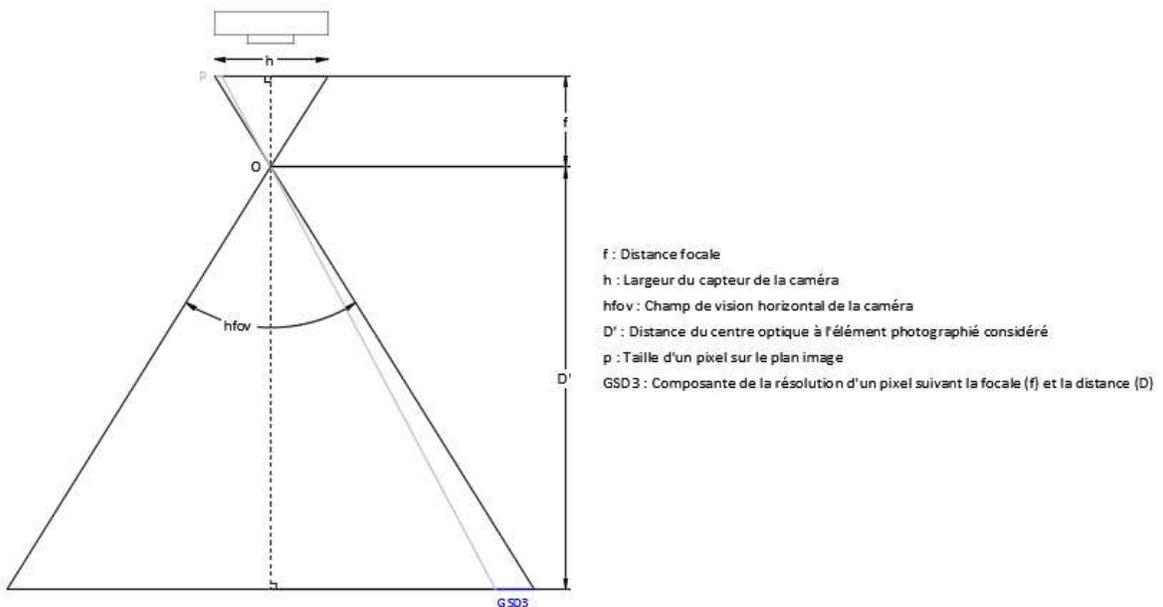
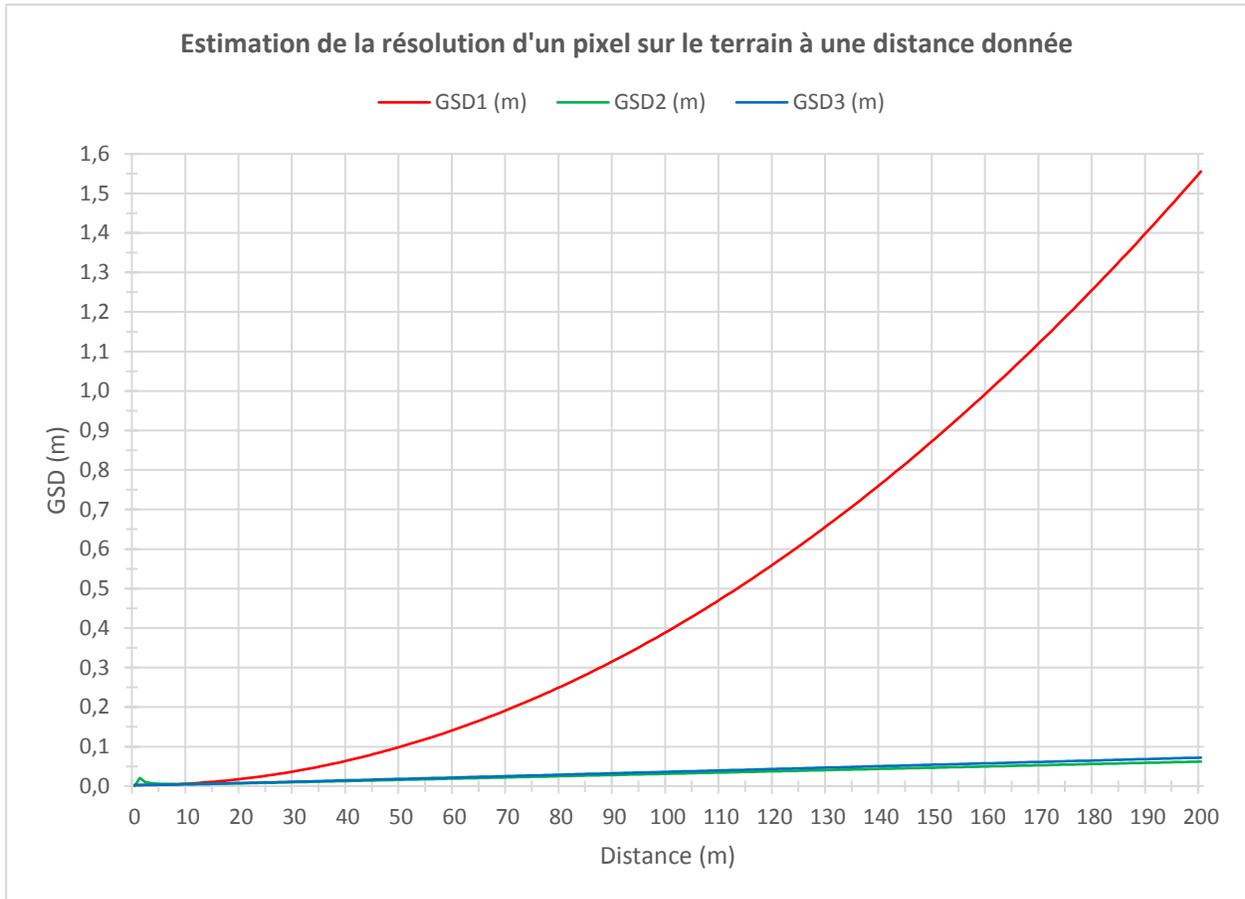


Figure 3.4 : Composante de la résolution d'un pixel sur le terrain parallèle à la largeur du capteur – vue de dessus (adaptée de Grussenmeyer (2013))

Pour avoir un ordre de grandeur de ces composantes, nous avons considéré une hauteur de la caméra au-dessus de la rivière fixée à  $H = 8 \text{ m}$  et nous avons fait varier la distance maximale d'acquisition des données  $D \in [0 \text{ m} ; 200 \text{ m}]$ . Les résultats obtenus sont affichés dans la Figure 3.5.



**Figure 3.5 : Estimation de la résolution d'un pixel sur le terrain à une distance donnée**

On peut remarquer que les valeurs de  $GSD1$  évoluent beaucoup plus rapidement que celles de  $GSD2$  et  $GSD3$ . Aussi, les premières valeurs de  $GSD2$  sont extrêmement élevées, ceci s'explique par sa définition avec l'équation (2) : si  $D$  tend vers 0 alors  $GSD2$  tend vers l'infini.

Par lecture du graphique, on peut remarquer que les valeurs de  $GSD$  sont inférieures à 40 cm jusqu'à une distance de 100 m, on peut donc espérer des résultats compétitifs avec les données satellitaires jusqu'à cette distance.

➤ Surface photographiée :

Compte tenu des valeurs de  $H$  et  $D$  précédentes, l'inclinaison de la caméra et la superficie du champ de vision varient. La superficie peut être assimilée à un trapèze, et afin d'être approximée, nous avons besoin de la valeur de  $GSD3$  pour la première et la dernière ligne de pixel suivant la hauteur du capteur (respectivement  $Dh1$  et  $Dh2$  sur la Figure 3.1). L'équation (3) nous donne le résultat pour la dernière ligne, la première ligne s'obtient de la même manière avec  $D' = \frac{H}{\cos(i - 0.5 * vfov)}$ .

La distance planimétrique entre la première et la dernière ligne s'obtient avec l'équation (4) tandis que l'équation (5) estime la superficie couverte avec la caméra :

$$\Delta D = H * (\tan(i + 0.5 * vfov) - \tan(i - 0.5 * vfov)) \quad (4)$$

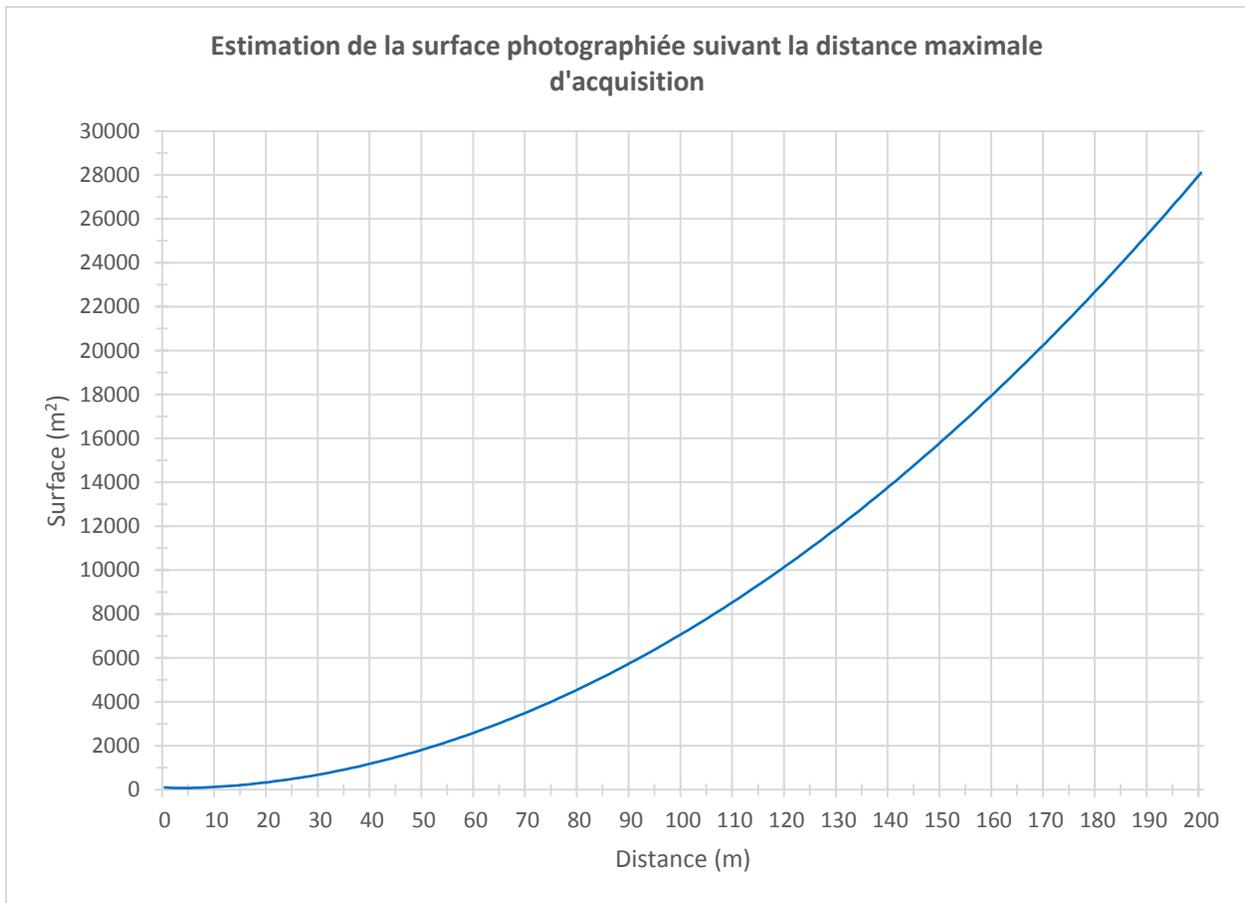
$$S \approx \frac{(n_h * GSD3_{min} + n_h * GSD3_{max}) * \Delta D}{2} \quad (5)$$

Avec :

- $n_h = 3840$ , le nombre de pixels suivant la largeur du capteur.
- $GSD3_{min}$  et  $GSD3_{max}$ , les valeurs de  $GSD3$  respectivement pour la première et la dernière ligne.

Avec la Figure 3.6, on constate que la superficie d'acquisition est dépendante de la hauteur et de l'inclinaison de la caméra. En orientant la caméra de manière à avoir une distance maximale d'acquisition à 200 m, la surface d'observation est de l'ordre de 0.028 km<sup>2</sup>, soit près de la moitié de la base de la grande pyramide de Gizeh en Égypte. Pour une distance maximale de 100 m, la superficie d'observation est de l'ordre de 7120 m<sup>2</sup>, soit la surface approximative d'un terrain de football (soccer).

L'aire d'observation est toutefois largement inférieure à la superficie couverte par les observations du satellite RADARSAT – 2 dont une tuile couvre un domaine de près de 400 km<sup>2</sup>.



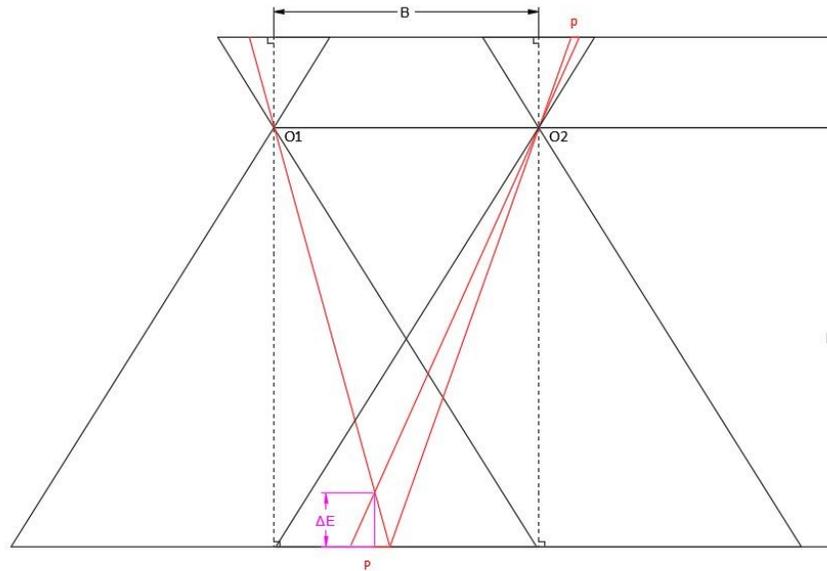
**Figure 3.6 : Estimation de la surface photographiée suivant la distance maximale d'acquisition**

➤ Erreur sur la profondeur :

Le travail étant réalisé en stéréoscopie, on peut estimer l'erreur sur la profondeur si on considère une erreur d'intersection de visées de points homologues. En considérant une erreur sur le capteur de l'ordre du pixel ( $p = 1.6 \mu m$ ), nous avons estimé l'erreur sur la profondeur. La Figure 3.7 met en évidence la situation tandis que l'équation (6) permet le calcul de l'erreur.

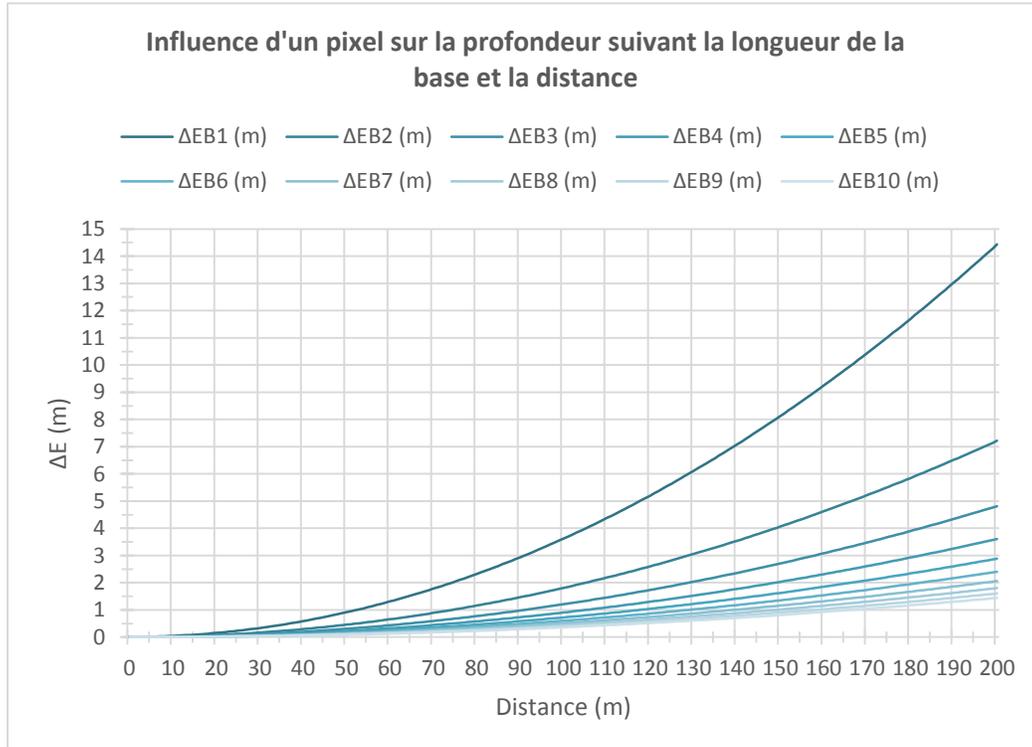
$$\Delta E = \frac{P * D}{B} = \frac{p * D^2}{f * B} \tag{6}$$

Dans notre cas, nous avons fait varier la distance  $D$  sur l'intervalle  $D \in [0 m ; 200 m]$  et la base  $B$  sur l'intervalle  $B \in [0 m ; 10 m]$ . La Figure 3.8 met en évidence les résultats obtenus ( $\Delta E_{BX}$  expose les résultats  $\Delta E$  pour  $B = X$  mètres dans l'équation (6)).



f : Distance focale  
 D : Distance du centre optique à l'élément photographié considéré  
 B : Base stéréoscopique entre les deux centres optiques O1 et O2  
 p : Taille d'un pixel sur le plan image  
 P : Taille d'un pixel sur le terrain  
 $\Delta E$  : Erreur en profondeur

**Figure 3.7 : Erreur sur la profondeur si mauvais appariement d'une distance de 1 pixel**



**Figure 3.8 : Influence d'un pixel sur la profondeur suivant la longueur de la base et la distance**

On peut s'apercevoir que les erreurs d'intersection en profondeur augmentent lorsque le rapport  $B/D$  diminue. Ainsi, plus la base est grande, plus l'erreur en profondeur est faible. Toutefois, comme en topographie classique, les meilleurs résultats sont obtenus lorsque l'angle d'intersection est de l'ordre de  $45^\circ$ , c'est-à-dire pour un rapport  $B/D$  se rapprochant de 1 (Luhmann *et al.*, 2013).

Les valeurs numériques de tous les calculs sont disponibles en annexe III.

### 3.3 Sites d'installation

Comme indiqué plus haut, la zone d'étude du projet GARI et de ce projet de maîtrise est située dans la ville de Saint-Jean-sur-Richelieu, en Montérégie dans la municipalité régionale de comté du Haut-Richelieu. La ville comprend environ 100 000 habitants sur un territoire de 234 km<sup>2</sup>, soit près de 2.2 fois la superficie de la ville de Paris. Son relief est assez plat, le point le plus haut étant à 55 m au-dessus du niveau moyen des mers, et le point le plus bas à 27 m. Elle est parcourue du sud au nord par la rivière Richelieu qui prend sa source 35 km en amont au lac Champlain et qui se jette dans le fleuve Saint-Laurent à Sorel, 88 km en aval.

Dans un souci de vérification de résultats et d'application de l'algorithme à divers contextes photographiques, il a été décidé d'installer trois systèmes stéréoscopiques répartis spatialement sur le territoire de la municipalité de janvier 2017 à juillet 2018. Le site nord possède une liaison sans fil avec le serveur de stockage, la bande passante est très faible et il est très difficile d'acquérir des données provenant simultanément des deux caméras de bonne qualité. La ligne d'eau est observée à l'interface entre l'eau et une berge naturelle. Le site central possède une liaison filaire avec le serveur de stockage, la bande passante est forte et la qualité d'enregistrement des données est optimale. La ligne d'eau est observée à l'interface entre l'eau et un quai de la marina. Le site sud possède une liaison sans fil avec le serveur de stockage, la bande passante est faible et il est assez difficile d'acquérir des données de bonne qualité provenant simultanément des deux caméras. Le champ de vision était obstrué par un arbre après installation initiale du dispositif<sup>7</sup>, le changement de ce dernier ne permet cependant pas d'observer la ligne d'eau avec une précision suffisante. La Figure 3.9 met en évidence l'emplacement des trois sites. Des informations supplémentaires sont disponibles à l'annexe IV.

---

<sup>7</sup> Réalisée par les équipes techniques de la ville de Saint-Jean-sur-Richelieu.



Figure 3.9 : Emplacements sélectionnés pour le réseau de surveillance par caméras

### 3.4 Sites de tests

Afin de valider les différentes parties de la méthodologie, trois sites de tests ont été utilisés à Québec.

#### 3.4.1 Traverse Québec-Lévis

Pendant un mois, un dispositif de surveillance stéréoscopique a été installé à la traverse Québec-Lévis afin de détecter la ligne d'eau sur le quai : le fleuve Saint Laurent étant affecté par des marées de plusieurs mètres, cette installation nous a permis d'affiner l'algorithme de détection de la ligne d'eau. Des mesures de terrain pour réaliser des tests d'orientation extérieure des caméras ont aussi été effectuées.

La Figure 3.10 met en évidence deux photos acquises par la même caméra à deux instants d'une même journée, on peut se rendre compte de la variation du niveau d'eau et des changements de conditions d'éclairage.

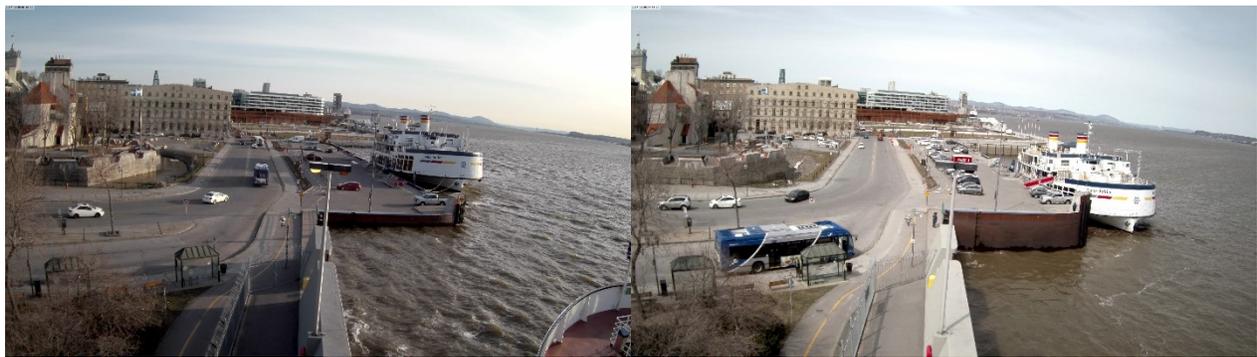


Figure 3.10 : Exemples de photographies acquises par la même caméra au cours d'une même journée

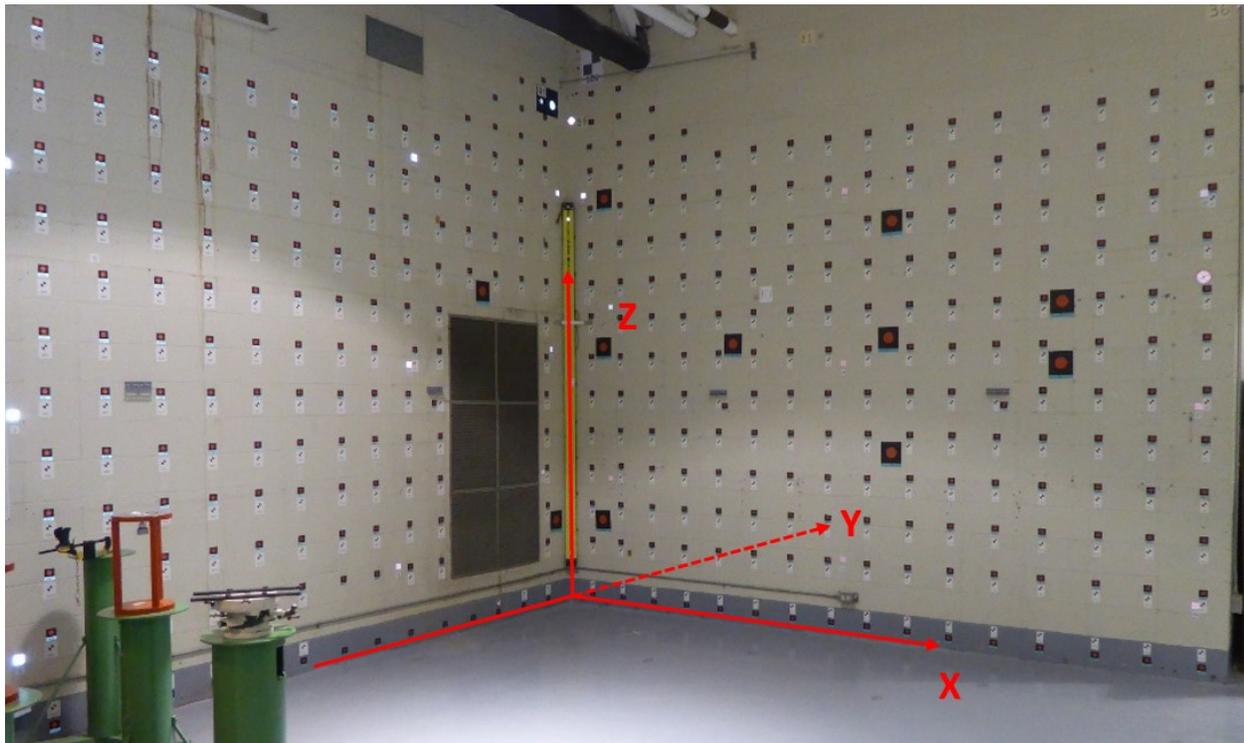
#### 3.4.2 Laboratoire de métrologie de l'Université Laval

Le laboratoire de métrologie est situé au sein du Département des sciences géomatiques de la Faculté de Foresterie, de Géographie et de Géomatique de l'Université Laval. Un réseau de cibles y a été mis en place à des fins d'étalonnage de caméras. Dans le cadre du projet, nous l'avons utilisé pour tester l'algorithme d'orientation extérieure des caméras et quantifier l'impact sur les résultats des changements de base et de distance avec l'objet à modéliser.

Le réseau comporte 368 cibles disposées sur deux murs perpendiculaires, il est divisé en plusieurs séries :

- 149 cibles de petite taille et 2 de grande taille sont fixées sur le mur de gauche.
- 208 cibles de petite taille et 9 de grande taille sont fixées sur le mur de droite.

Les coordonnées de chacune de ces cibles ont été définies par intersection spatiale dans un repère tridimensionnel à l'aide de deux stations totales. Les écarts-types de l'ensemble des coordonnées des cibles sont inférieurs au millimètre. Les deux murs de calibration et les axes du système de coordonnées de référence locale sont visibles sur la Figure 3.11. L'algorithme d'orientation a ainsi été testé dans un environnement contrôlé, donc dans des conditions optimales d'acquisition de données.



**Figure 3.11 : Murs de calibration du laboratoire de métrologie**

### **3.4.3 Terrasse de l'INRS**

Afin de valider notre approche en milieu naturel et dans un souci de simplifier le travail d'acquisition de points géoréférencés (essentiels au calcul d'orientation), nous avons décidé d'effectuer des mesures depuis la terrasse de l'INRS en effectuant des clichés du stationnement de la rue Dorchester. La Figure 3.12 met en évidence un couple stéréoscopique acquis depuis la terrasse.



**Figure 3.12 : Exemple d'un couple stéréoscopique acquis depuis la terrasse de l'INRS**

À l'aide d'une station totale robotisée, un levé topographique de la zone a été effectué pour établir un réseau de 39 points d'appui visibles sur les deux images des couples stéréoscopiques. Ces points ont été géoréférencés dans le système planimétrique NAD 83 UTM 19 et le système altimétrique CGVD28. La Figure 3.13 met en évidence les points géoréférencés et la station totale utilisée. Les caractéristiques techniques de la station totale sont fournies à l'annexe V. Une version plus grande du document des points d'appui est disponible à l'annexe VI.



**Figure 3.13 : Station totale Leica TS16 et points d'appui définis sur le stationnement de la rue Dorchester**

## 4 MÉTHODES

Afin de créer un programme automatique adapté en même temps aux travaux d'analyse d'images et aux calculs photogrammétriques, il a été décidé d'utiliser un logiciel de programmation facilement compréhensible et adapté à ces deux domaines d'étude. Ainsi, la plupart des algorithmes qui sont présentés ont été développés sous Matlab R2017a ©.

### 4.1 Extraction de la ligne d'eau sur une image

La première étape de l'algorithme est de définir les coordonnées pixelliques de la ligne d'eau sur une image du couple stéréoscopique à un instant donné. Nous allons expliquer le traitement d'une séquence unique dans cette partie, l'automatisation est détaillée dans le paragraphe 4.4.

#### 4.1.1 Format des données utilisées

Avigilon Control Center archive les données dans un format natif propre à la compagnie. Il est toutefois possible d'extraire des fichiers sous différents formats :

- photos : TIFF, PNG, JPEG, PDF.
- vidéos : AVI.

Des tests ont été effectués avec des fichiers JPEG et TIFF dans le cadre de notre étude. Toutefois, étant donné que le format TIFF est un des plus couramment utilisés et assurant une compression sans perte d'information, nous avons effectué la majorité des calculs avec ce format.

Nous avons extrait des données pour des séquences de 60 secondes à 1 image par seconde, soit un total de 60 images numérotées et stockées dans un dossier. La durée a été déterminée empiriquement de telle manière à avoir assez d'information pour un calcul précis de la ligne d'eau sans toutefois augmenter significativement la durée d'exécution du programme. La nomenclature des dossiers est très importante afin de définir l'enchaînement des séquences au cours du temps. Arbitrairement, nous avons choisi la nomenclature NOM\_DATE\_HEURE où :

- NOM est composé du nom du site et de *droite* ou *gauche* suivant le positionnement de la caméra dans le couple stéréoscopique.
- DATE spécifie la journée sous le format AAMMJJ (année-mois-jour).
- HEURE spécifie l'heure de début d'acquisition sous le format HHMM (heure-minutes).

### 4.1.2 Définition d'une région d'intérêt

Dans un premier temps, nous importons une à une les photos dans Matlab afin de créer une image moyenne de la séquence. Cette importation successive sans stockage de toutes les données permet de ne pas saturer l'espace de calcul nécessaire au bon fonctionnement du logiciel. La Figure 4.1 met en évidence la première photo d'une séquence à gauche et l'image moyenne de la séquence à droite : on peut remarquer un lissage des pixels sur le plan d'eau, favorisant l'étape de segmentation (cf. paragraphe 4.1.5).



Figure 4.1 : Première photo d'une séquence et image moyenne de séquence – site central de Saint-Jean-sur-Richelieu

Une fois l'image moyenne créée, nous définissons manuellement une région d'intérêt ou *Region Of Interest (ROI)* afin de limiter la zone de recherche et d'extraction de la ligne. Cette zone est polygonale et pour l'ensemble des calculs jusqu'à l'étape d'extraction de la ligne, c'est le rectangle défini par les valeurs extrêmes des pixels qui est considéré (Figure 4.2 et Figure 4.4).

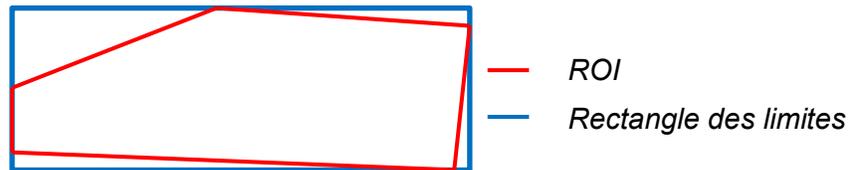


Figure 4.2 : Région d'étude (rouge) et limite considérée pour la plupart des traitements (bleu)

La Figure 4.3 met en évidence une région d'intérêt où la ligne est correctement définie (couleur verte) et une région d'intérêt entraînant des résultats faux (couleur rouge), il y a une différence de hauteur entre l'interface observée (haut du mur /eau) et l'interface réelle.

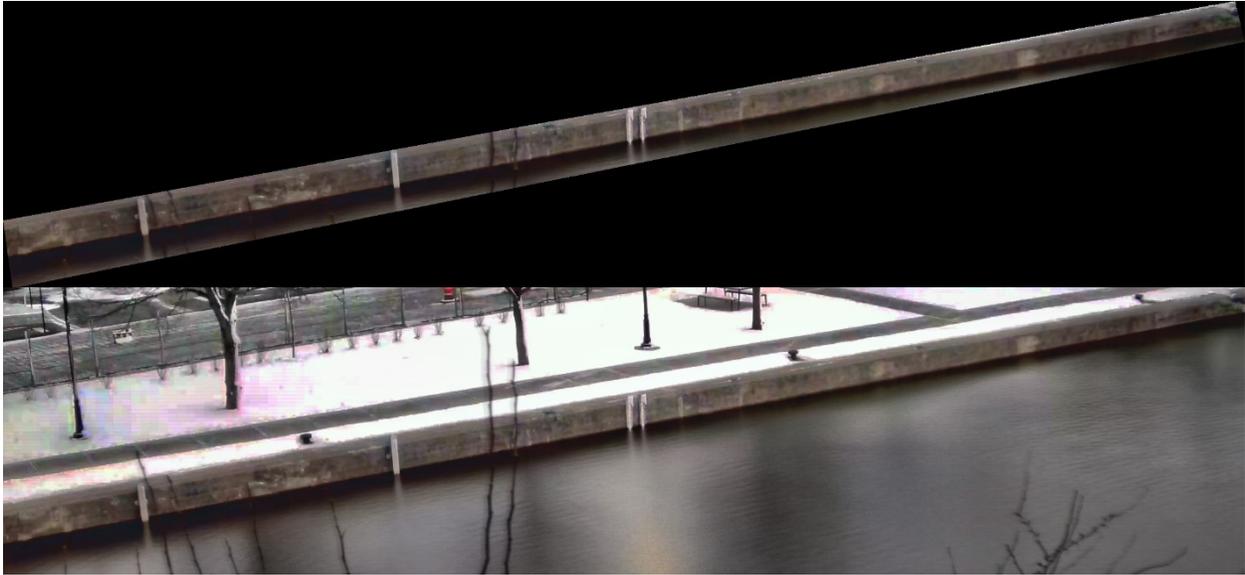


Figure 4.3 : Image moyenne et régions d'études – traverse Québec-Lévis

#### 4.1.3 Prétraitements et calcul d'image moyenne

Une fois la région d'intérêt définie, nous réimportons les photos une à une en les découpant aux dimensions de la ROI, nous améliorons le contraste à l'aide d'une fonction (*adaptisteq.m*) et calculons de nouveau l'image moyenne. La Figure 4.4 met en évidence une image moyenne découpée et rehaussée aux limites de la ROI (image du haut) et du rectangle de limites associé (image du bas).

Ce recalcul d'image moyenne s'explique par le fait que le premier ne sert qu'à définir la ROI, le second est réalisé à l'aide de la ROI afin de réduire le temps de calcul en ne traitant que l'information nécessaire à l'extraction de la ligne d'eau.



**Figure 4.4 : Image moyenne rehaussée et découpée selon la ROI (en haut) et selon le rectangle de limites associé (en bas) – site central de Saint-Jean-sur-Richelieu**

#### **4.1.4 Définition des sites d'entraînement**

L'étape de classification de l'image (cf. paragraphe 4.1.6) en deux classes distinctes (pixels appartenant à l'eau et au reste de l'image) utilise une technique supervisée et nécessite par conséquent la création de sites d'entraînement.

Les sites d'entraînement sont des zones homogènes dont on connaît la nature et définies manuellement par l'opérateur. Les caractéristiques spectrales des sites sont utilisées par l'algorithme de classification comme données d'apprentissage afin de traiter le reste de l'image.

La Figure 4.5 expose deux sites d'entraînement pour l'eau (en bleu) et le reste de l'image (en rouge).



**Figure 4.5 : Sites d'entraînement de l'eau (en bleu) et du reste de l'image (en rouge) – site central de Saint-Jean-sur-Richelieu**

#### 4.1.5 Segmentation de l'image

La segmentation d'une image est un processus qui permet de regrouper des pixels ensemble suivant des caractéristiques spécifiques afin de réduire la quantité d'information à traiter. De nombreuses techniques existent se basant sur un ensemble de paramètres pouvant résulter, uniquement ou simultanément, de l'utilisation des données spectrales des pixels brutes, de produits dérivés de l'information contenue dans les pixels (fichiers matriciels de contours, d'entropie, de variance locale...), de données spatiales supplémentaires pour imposer des contraintes (fichiers vectoriels de tracés routiers, d'hydrologie...).

Dans le cas de notre étude, nous avons utilisé une méthode d'agglomération basée sur les propriétés spectrales des pixels tenant compte de la connectivité spatiale et imposant la formation d'objets de taille et de forme semblables : la méthode de segmentation *Simple Linear Iterative Clustering* (Achanta et al., 2012).

Cet algorithme itératif présente la séquence d'opérations suivante :

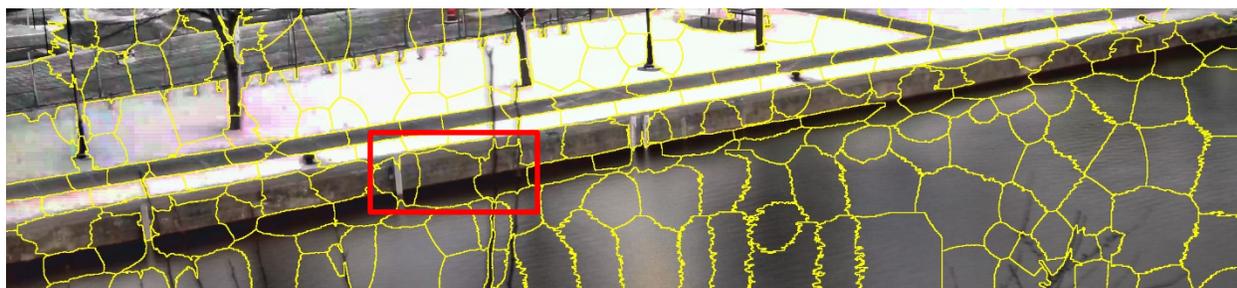
1. Définition du nombre d'objets ou *superpixels* à créer  $k$  et initialisation des noyaux  $C_i = [l_i, a_i, b_i, x_i, y_i]$ <sup>8</sup> sur une grille régulière de la taille de l'image et dont les nœuds sont séparés d'une distance  $S = \sqrt{N/k}$  où  $N$  désigne le nombre de pixels de l'image.
2. Chaque pixel de l'image est ensuite affecté au noyau le plus proche en limitant l'espace de recherche à une région d'aire de  $2S * 2S$  à partir du pixel considéré.
3. Les noyaux  $C_i$  sont ajustés en calculant les moyennes de l'ensemble des pixels affectés à chaque centre.
4. L'erreur résiduelle entre les anciens et nouveaux noyaux est calculée à l'aide d'une norme L2.
5. Le réassignement des pixels aux nouveaux noyaux peut de nouveau être effectué.

Le calcul s'arrête lorsque l'erreur résiduelle devient inférieure à une valeur seuil fixée préalablement ou après un nombre fixe d'itérations. D'après Achanta *et al.* (2012), 10 itérations suffisent à obtenir la convergence du calcul dans la plupart des cas. Nous avons donc considéré ce critère comme condition d'arrêt. Pour éliminer les pixels isolés, une analyse de connectivité est réalisée en dernière étape.

---

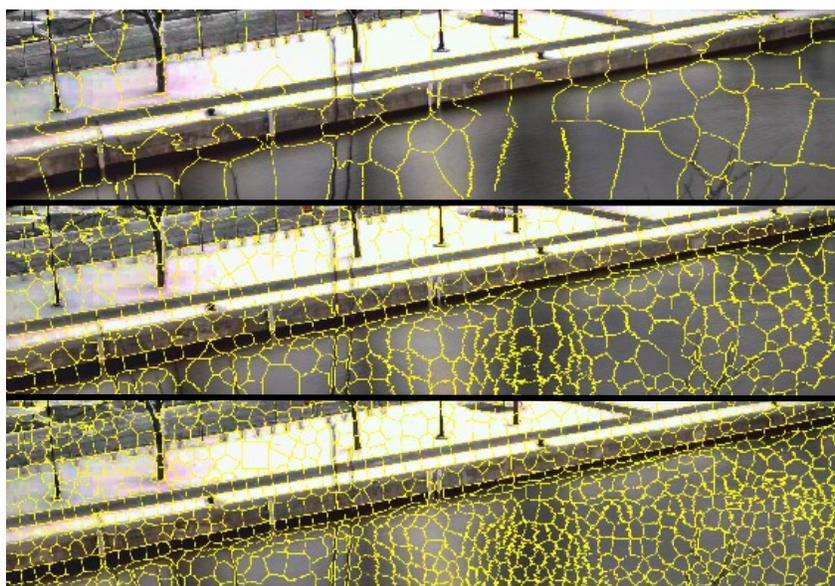
<sup>8</sup> L'espace couleur utilisé est *CIELAB*.

Aussi, après plusieurs essais, on a pu se rendre compte que les résultats de segmentation peuvent être différents pour une même scène suivant les conditions d'éclairage avec un nombre d'objets à définir  $k$  fixe : il se peut que les objets créés appartiennent aux deux classes de sortie simultanément. Par exemple, le rectangle de la Figure 4.6 contient des segments appartenant aux deux classes.



**Figure 4.6 : Exemple de segmentation ( $k = 200$ ) – site central de Saint-Jean-sur-Richelieu**

Pour pouvoir pallier à ce problème, nous avons décidé de faire plusieurs segmentations successives de l'image moyenne d'une même séquence en faisant varier le nombre de *superpixels* à créer. Ce sont en tout dix segmentations différentes ( $k$  variant de 100 à 1000) qui sont réalisées pour chaque époque (Figure 4.7) auxquelles sont ensuite associées dix classifications.



**Figure 4.7 : Exemples de segmentations réalisées ( $k \in [100 ; 500 ; 1000]$ ) – site central de Saint-Jean-sur-Richelieu**

#### 4.1.6 Classification de l'image

La classification est un processus qui permet de discriminer une image en plusieurs classes définissant une thématique particulière. On peut s'appuyer sur une image brute ou sur une image segmentée, ceci permettant à l'algorithme de traiter une quantité d'information réduite et par conséquent de simplifier les calculs et de diminuer le temps d'exécution.

Dans notre programme, nous avons considéré les images segmentées auparavant afin de créer deux classes suivant les parties définissant l'eau et celles composant le reste de l'image.

La méthode de classification utilisée est connue sous le nom de *lazy snapping* (Li *et al.*, 2004). Cette méthode permet de différencier une image en deux parties distinctes : une considérée comme l'avant-plan (dans notre cas, les surfaces d'eau) et une considérée comme l'arrière-plan (dans notre cas, tout ce qui ne représente pas l'eau).

Pour cela, l'objectif est de minimiser une fonction d'énergie définie par :

$$E(X) = \sum_{i \in V1} E_1(x_i) + \lambda \sum_{(i,j) \in V2} E_2(x_i, x_j) \quad (7)$$

Avec :

- $E_1(x_i)$ , l'énergie de similarité du *superpixel*  $i$  appartenant à l'ensemble  $V1$  des *superpixels* de l'image.
- $E_2(x_i, x_j)$ , l'énergie issue du gradient des arcs entre les *superpixels*  $i$  et  $j$  définis dans l'ensemble  $V2$ .

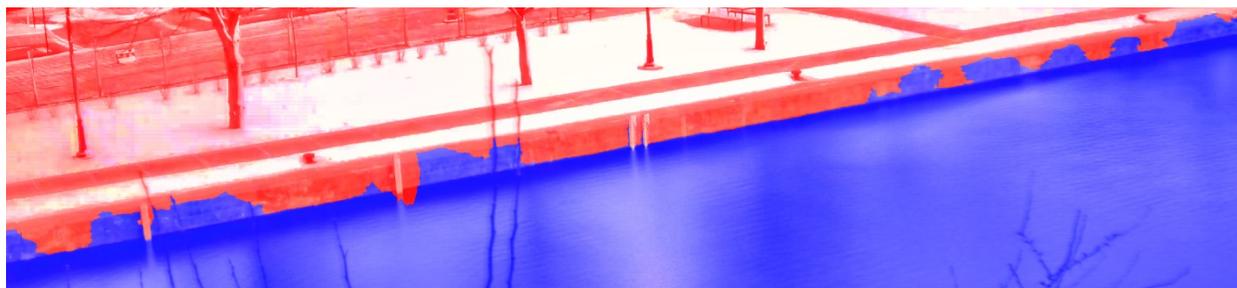
Plus d'informations concernant la définition de  $E_1$  et  $E_2$  et la minimisation de la fonction  $E$  est disponible dans Li *et al.* (2004).

Pour une époque<sup>9</sup>, on obtient autant de classifications que de segmentations préalablement définies. Dans la Figure 4.8, le résultat de la classification avec la seconde image segmentée ( $k = 200$ ) est exposée; les parties bleues représentent les surfaces d'eau (auxquelles sont associées la valeur numérique 1) tandis que les parties rouges constituent le reste de l'image (auxquelles sont associées la valeur 0).

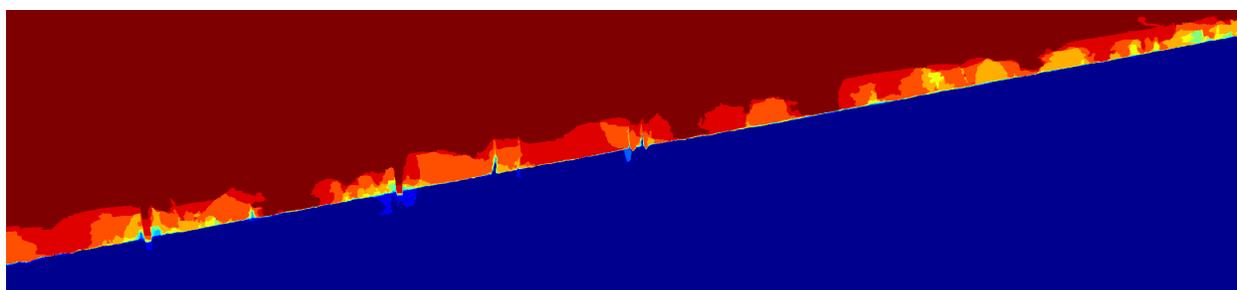
---

<sup>9</sup> Pour tout le mémoire, le terme « époque » réfère au moment d'acquisition d'une séquence d'images.

Par la suite, on effectue la somme de toutes les classifications successives où les pixels prennent une valeur entre 0 (rouge) et 10 (bleu). Si la valeur du pixel est égale à 10, ce dernier a été classifié comme appartenant à une surface d'eau lors des dix simulations (segmentation + classification) réalisées. Au contraire si la valeur est égale à 0, celui-ci n'a jamais été attribué à la classe d'eau. La Figure 4.9 illustre la somme des images de classification.

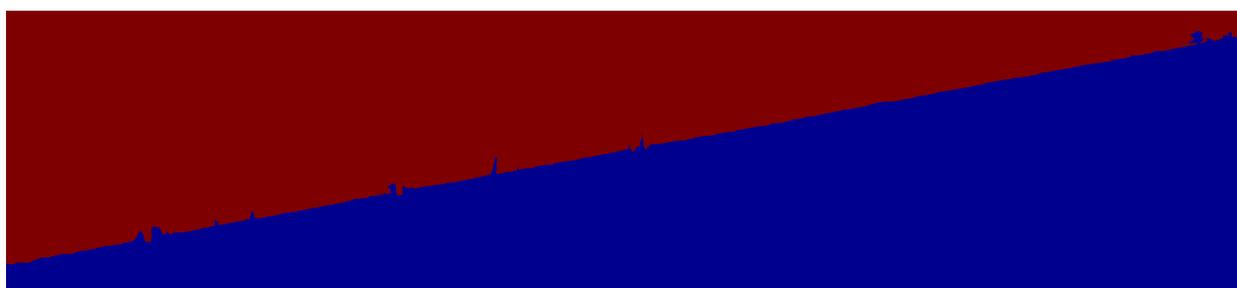


**Figure 4.8 : Résultat de la classification avec la seconde image segmentée (valeurs égales à 0 en rouge et 1 en bleu) – site central de Saint-Jean-sur-Richelieu**



**Figure 4.9 : Somme de toutes les classifications obtenues (valeurs comprises entre 0 en rouge et 10 en bleu) – site central de Saint-Jean-sur-Richelieu**

Afin de déterminer la limite entre l'eau et le reste de l'image, on a appliqué un seuillage simple en considérant que les pixels ayant une valeur supérieure ou égale à 5 appartiennent à la classe d'eau tandis que les autres appartiennent au reste de l'image (Figure 4.10).



**Figure 4.10 : Résultat final de classification (valeurs égales à 0 en rouge et 10 en bleu) – site central de Saint-Jean-sur-Richelieu**

#### 4.1.7 Détection de contour et extraction de la ligne d'eau

Une détection de contour permet de localiser les pixels situés à une interface entre deux zones homogènes par l'intermédiaire d'un calcul de gradient. La fonction *edge.m* permet de faire divers calculs de gradients entraînant des résultats légèrement différents. Compte tenu de la simplicité de l'image de classification, nous avons laissé les paramètres de base afin de détecter les pixels à l'interface entre les deux classes.

L'application de la région d'étude permet par la suite de sélectionner les pixels appartenant à la ligne d'eau (en jaune sur la Figure 4.11) et de stocker les coordonnées du système image bidimensionnel dans un tableau avant la transformation en coordonnées tridimensionnelles.

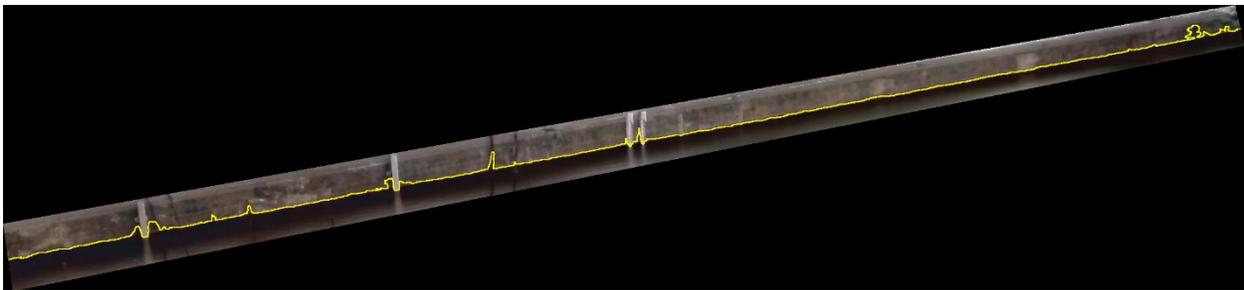


Figure 4.11 : Ligne d'eau extraite (en jaune) – site central de Saint-Jean-sur-Richelieu

#### 4.1.8 Validation des résultats

Afin de vérifier l'étape d'extraction de la ligne d'eau, la méthode *Delphi* a été utilisée (Skulmoski *et al.*, 2007). Dans cette approche un groupe de personnes, appelés aussi experts, sont sollicités afin de connaître leur avis sur le problème auquel nous sommes confrontés. Les résultats de l'ensemble des participants sont ensuite analysés afin d'estimer la validité de l'approche scientifique développée. Dans notre projet, nous avons demandé à un groupe de personnes de venir répondre à la question suivante : où se situe la ligne d'eau sur l'image découpée ? Pour cela, un algorithme de numérisation manuelle de la ligne d'eau a été créé. Une fois l'ensemble des données recueillies, nous avons fait une analyse par colonne afin de calculer :

- la moyenne des observations,  $\mu$ .
- l'écart-type des observations,  $\sigma$ .
- l'intervalle de confiance à 95% issu de la table de la loi normale centrée réduite ( $z = 1.96$ ),  $IC = [\mu - 1.96 * \sigma ; \mu + 1.96 * \sigma]$ .

Nous avons par la suite comptabilisé les pixels de la ligne d'eau extraite situés à l'intérieur de l'intervalle de confiance pour en déduire le rendement avec la formule :

$$\rho = \frac{\text{nombre de pixels de la ligne d'eau extraite appartenant à IC}}{\text{nombre total de pixels de la ligne d'eau extraite}} \quad (8)$$

## 4.2 Recherche de la ligne d'eau sur une autre image

Une fois la ligne d'eau extraite à partir d'un jeu de données issu de la première caméra, il convient de rechercher les pixels sur la seconde image du couple stéréoscopique. Pour cela, nous avons décidé d'utiliser une technique de corrélation d'images afin de mettre en correspondance les points de ligne d'eau sur les deux images.

Le principe de l'appariement de point homologue par corrélation d'images est le suivant :

1. Définition du point d'intérêt sur la première image et découpage d'une imagerie associée suivant un voisinage défini.
2. Parcours de la seconde image du couple avec l'imagerie créée sur la première image et calcul de la corrélation pour chaque pixel possible. Dans notre cas, nous avons utilisé la fonction *normxcorr2.m* qui utilise la formule suivante (MathWorks, 2018) :

$$\gamma(u, v) = \frac{\sum_{x,y} (f(x, y) - \overline{f_{u,v}})(t(x - u, y - v) - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{x,y} (f(x, y) - \overline{f_{u,v}})^2 * \sum_{x,y} (t(x - u, y - v) - \bar{t})^2}} \quad (9)$$

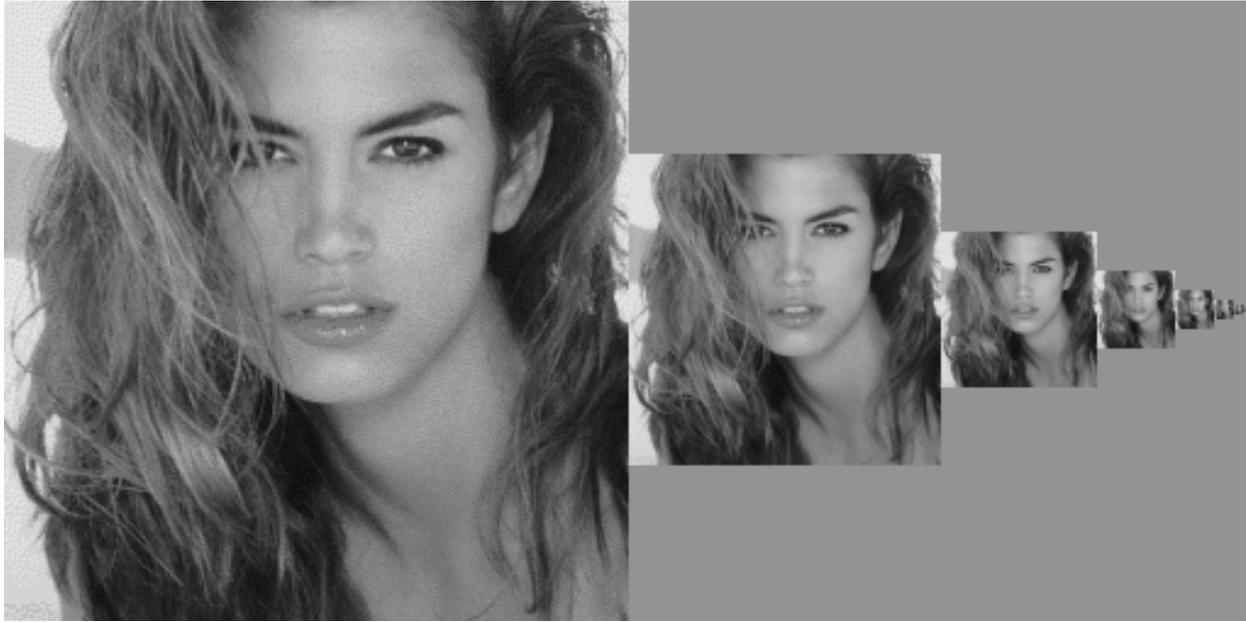
Avec :

- $f$ , l'image considérée.
  - $t$ , l'imagerie considérée et positionnée à  $(u, v)$ .
  - $\overline{f_{u,v}}$ , la moyenne des valeurs spectrales de  $f(x, y)$  dans la région de l'imagerie.
  - $\bar{t}$ , la moyenne des valeurs spectrales de l'imagerie.
3. Recherche de la corrélation maximale pour la mise en correspondance des deux points.

Cette technique est efficace mais elle est très chronophage et exigeante en termes de mémoire vive. Afin de contourner ce problème, un algorithme basé sur les pyramides d'images a été écrit.

Une pyramide d'images consiste à rééchantillonner l'image et l'imagerie de manière à réduire le niveau d'information (Figure 4.12) : le calcul est effectué sur une image moins grande,

permettant d'obtenir rapidement des valeurs approchées pour l'emplacement de corrélation maximale. Ces valeurs approchées sont ensuite utilisées dans le niveau supérieur pour découper l'image à une zone de recherche dont la dimension correspond à 150% de l'imagette au niveau considéré et ainsi de suite jusqu'à l'obtention des coordonnées sur l'image originale.



**Figure 4.12 : Exemple de pyramide d'images (Pattern Recognition and Image Processing Group, 2015)**

Une fois l'ensemble des points localisés sur la seconde image, une analyse statistique *RANdom SAMple Consensus*<sup>10</sup> (Shi *et al.*, 2013) est réalisée pour éliminer les valeurs aberrantes.

Toutefois, l'obtention de résultats corrects est encore limitée, des ajustements concernant la taille de l'imagette et la zone de recherche doivent être effectués afin d'obtenir un bon compromis entre le temps d'exécution et la qualité d'appariement des points homologues.

---

<sup>10</sup> RANSAC

### 4.3 Géoréférencement de la ligne d'eau

Le géoréférencement est l'étape qui permet de faire la transformation des coordonnées du système photographique vers un système tridimensionnel particulier (Figure 4.13). Deux étapes principales sont à réaliser pour atteindre l'objectif :

- l'orientation intérieure : passage d'un système 2D pixellique à un système 2D métrique.
- l'orientation extérieure : passage d'un système 2D métrique à un système 3D connu.

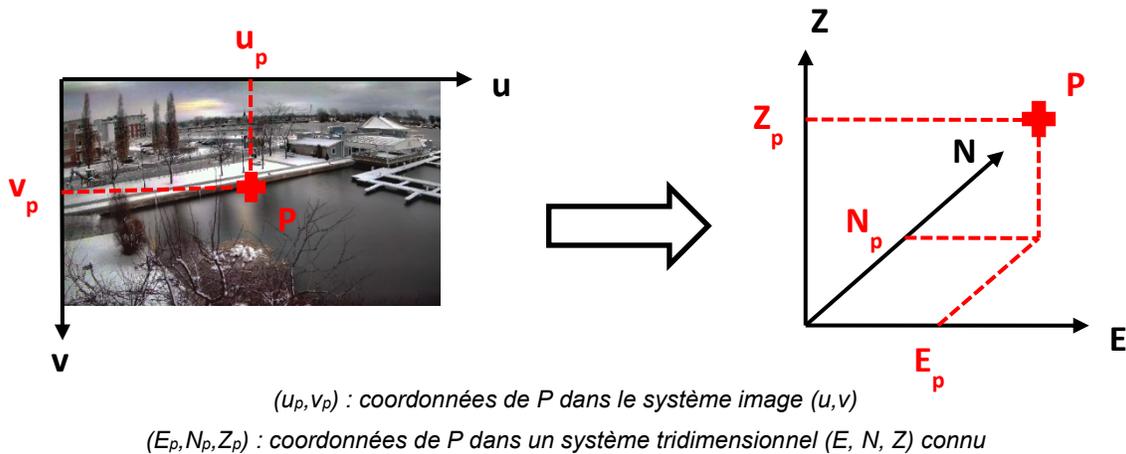


Figure 4.13 : Représentation schématique de l'étape de géoréférencement

#### 4.3.1 Orientation intérieure

L'orientation intérieure est le procédé qui consiste à déterminer les éléments mathématiques et instrumentaux nécessaires à la description précise du système imageur (Luhmann *et al.*, 2013), à savoir :

- les coordonnées du point principal.
- la distance focale.
- les paramètres de distorsion.

La première étape consiste à faire un changement de système comme illustré à la Figure 4.14 :

$$\begin{bmatrix} x'_p \\ y'_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.5 * s'_x + p * u_p \\ 0.5 * s'_y - p * v_p \end{bmatrix} \quad (10)$$

Avec :

- $(x'_p, y'_p)$ , coordonnées mesurées du point  $P$  dans le système photographique (en mm).
- $(u_p, v_p)$ , coordonnées mesurées du point  $P$  dans le système image (en pixels).
- $p = 1.6 \mu m$ , taille d'un pixel sur le capteur.
- $s'_x, s'_y$ , largeur et hauteur du capteur (en mm).

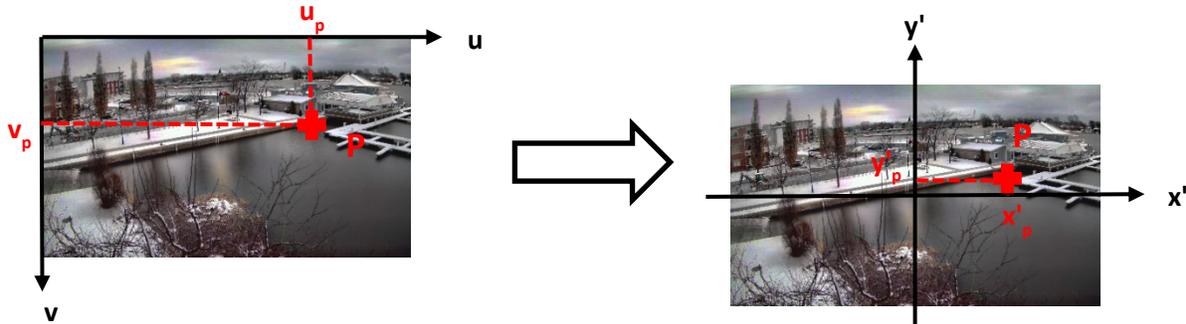


Figure 4.14 : Du système image (pixels) vers le système photographique (mm)

Toutefois, la caméra comporte des défauts : la projection orthogonale du centre optique sur le capteur est disjointe du centre du capteur, il y a la présence de distorsions. Le modèle communément appelé de *pinhole camera* permet de représenter le système d'acquisition, une illustration est donnée à la Figure 4.15.

Ainsi, les coordonnées d'un point en particulier dans le système photographique sont données par le triplet (Figure 4.15) :

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_p - x'_0 - \Delta x' \\ y'_p - y'_0 - \Delta y' \\ -f \end{bmatrix} \quad (11)$$

Où :

- $(x', y')$ , coordonnées corrigées du point  $P$  dans le système photographique (en mm).
- $(x'_p, y'_p)$ , coordonnées mesurées du point  $P$  dans le système photographique (en mm).
- $(x'_0, y'_0)$ , les coordonnées du point principal.
- $f$ , la distance principale ou focale.
- $\Delta x', \Delta y'$ , les corrections dues aux distorsions.

Dans notre cas, les corrections sont issues de deux types de distorsions différentes :

- les distorsions radiales (rad) qui proviennent d'un défaut de fabrication des lentilles et dépendent de la mise au point : extraction de trois paramètres  $K1, K2, K3$ .
- les distorsions tangentielles (tan) issues d'un défaut de centrage des lentilles : extraction de deux paramètres  $P1, P2$ .

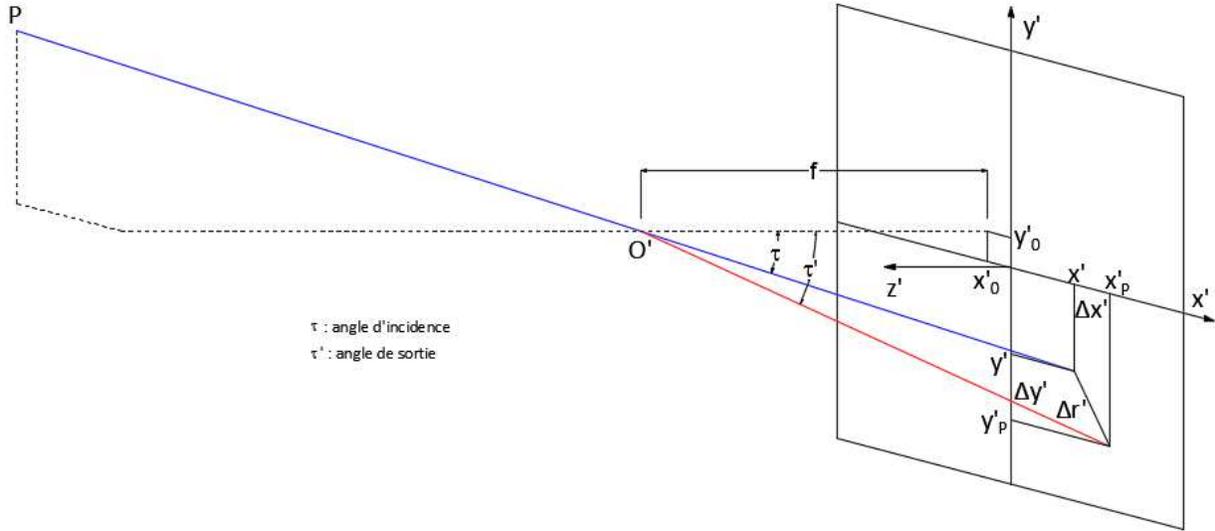


Figure 4.15 : Orientation intérieure, *Pinhole camera model* (adaptée de Luhmann et al. (2013))

Les distorsions s'expriment de la manière suivante (Figure 4.15) :

$$\begin{cases} \Delta x' = \Delta x'_{rad} + \Delta x'_{tan} \\ \Delta y' = \Delta y'_{rad} + \Delta y'_{tan} \end{cases} \quad (12)$$

Où :

$$\begin{aligned} \text{Distorsions radiales} & \begin{cases} \Delta x'_{rad} = x' * \frac{\Delta r'_{rad}}{r'} = x' * (K1 * r'^2 + K2 * r'^4 + K3 * r'^6) \\ \Delta y'_{rad} = y' * \frac{\Delta r'_{rad}}{r'} = y' * (K1 * r'^2 + K2 * r'^4 + K3 * r'^6) \end{cases} \\ \text{Distorsions tangentielles} & \begin{cases} \Delta x'_{tan} = 2 * P1 * x' * y' + P2 * (r'^2 + 2 * x'^2) \\ \Delta y'_{tan} = 2 * P2 * x' * y' + P1 * (r'^2 + 2 * x'^2) \end{cases} \end{aligned} \quad (13)$$

Et  $r'$  défini par :

$$r' = \sqrt{(x'_p - x'_0)^2 + (y'_p - y'_0)^2} \quad (14)$$

Les détails de calcul de l'orientation intérieure sont explicités dans Bouguet (2002) et sur le site internet d'OpenCV (2015). Aussi, pour réaliser cette étape, nous avons utilisé un logiciel développé par le Commissariat à l'Énergie Atomique (2016) qui permet d'effectuer d'une manière plus efficace la calibration de caméras et avec lequel on peut stocker des vidéos et extraire uniquement les trames utiles au calcul. La détection des points d'appui sur la mire de calibration est effectuée automatiquement.

En sortie, un fichier de paramétrage avec l'ensemble des paramètres est extrait et un script Python a été écrit pour faire la correction automatique des images associées à une caméra à l'aide de fonctions présentes dans la librairie OpenCV (2015).

### 4.3.2 Orientation extérieure

L'orientation extérieure d'un couple stéréoscopique est le procédé qui consiste à assurer le passage du système de coordonnées photographique bidimensionnel à un système objet ou terrain tridimensionnel dans un référentiel connu à l'aide deux images observant la même scène. Ce processus nécessite par conséquent l'utilisation de deux caméras.

Comme nous l'avons vu au paragraphe 2.3.2, deux moyens différents existent afin de trouver l'ensemble des douze paramètres d'orientation et de position des deux caméras. Nous utilisons ici un calcul en deux étapes constitué de l'orientation relative et de l'orientation absolue. La méthode présentée ici est adaptée de Grussenmeyer (2013) et Boulianne (2015).

#### ➤ L'orientation relative

L'orientation relative permet de déterminer les éléments de translation et de rotation de la première image du couple par rapport à la seconde afin d'éliminer la parallaxe Y. Cinq paramètres sont à définir lors de l'orientation relative avec au choix deux options :

- deux éléments de translation et trois de rotation.
- cinq éléments de rotation.

Pour pouvoir comparer plus facilement les résultats (cf. paragraphe 4.3.3), nous avons opté pour la deuxième option (cinq éléments de rotation). Ainsi, schématiquement, le problème peut être représenté par la Figure 4.16.

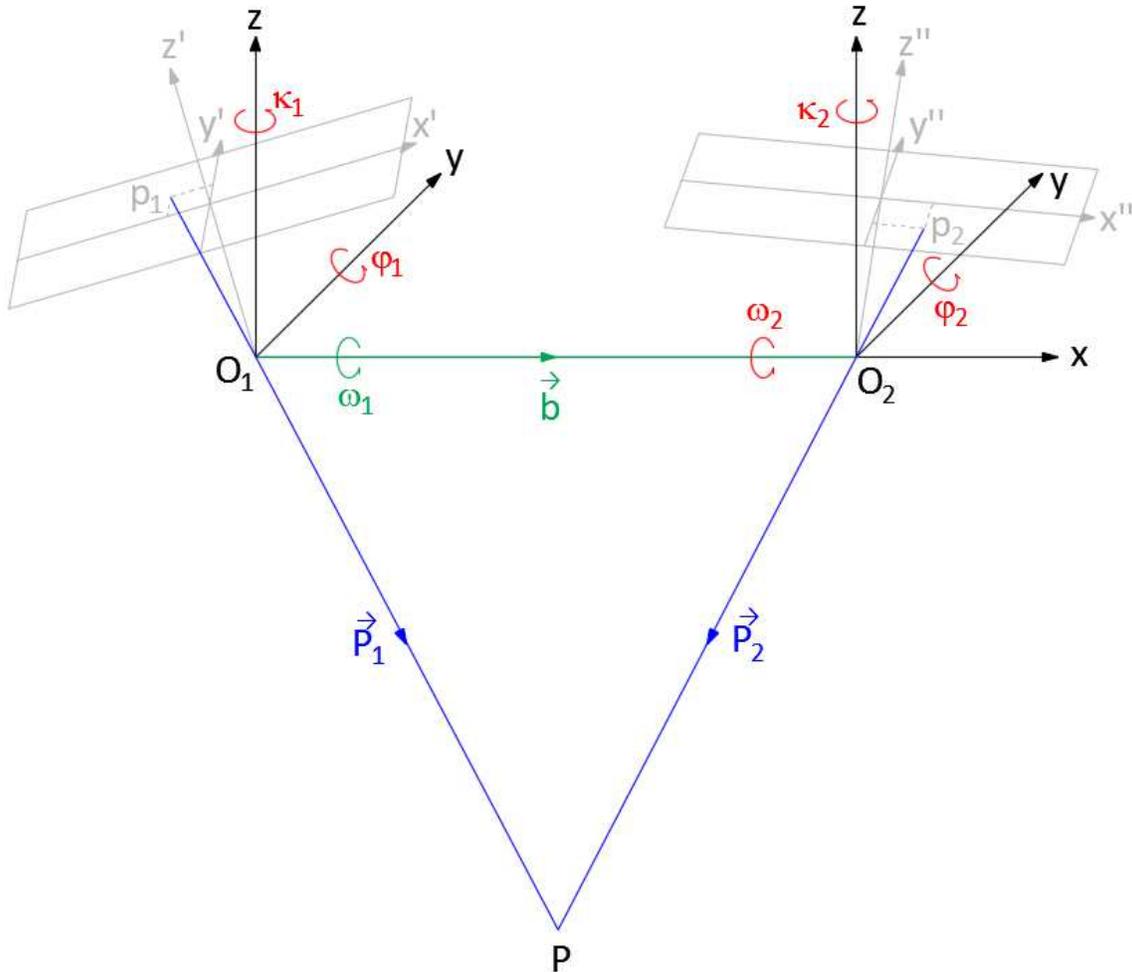


Figure 4.16 : Orientation relative et systèmes de coordonnées photographiques et « modèle » (adaptée de Luhmann *et al.* (2013))

Sachant que les visées des deux caméras sont presque parallèles, on pose comme conditions initiales sur les angles de rotation :

$$\varphi_1 = \kappa_1 = \omega_2 = \varphi_2 = \kappa_2 = 0 \quad (15)$$

De plus, on pose les contraintes suivantes :

$$\begin{cases} x_{01} = y_{01} = z_{01} = y_{02} = z_{02} ; x_{02} = 1 ; \vec{b} = [1,0,0] \\ \omega_1 = 0 \end{cases} \quad (16)$$

On peut exprimer les vecteurs  $\vec{P}_1, \vec{P}_2$  par :

$$\begin{cases} \vec{P}_1 = R_1(\omega_1, \varphi_1, \kappa_1) * p_1 \\ \vec{P}_2 = R_2(\omega_2, \varphi_2, \kappa_2) * p_2 \end{cases} \quad (17)$$

Avec :

- $R_1, R_2$ , des matrices de rotation tridimensionnelles pouvant avoir différentes formes (cf annexe VII).
- $p_1 = [x', y', -f]$ , le triplet de coordonnées du point homologue  $P$  sur la première image.
- $p_2 = [x'', y'', -f]$ , le triplet de coordonnées du point homologue  $P$  sur la seconde image.

Il reste donc les valeurs de  $\omega_2, \varphi_1, \varphi_2, \kappa_1, \kappa_2$  à déterminer. On peut remarquer que les trois vecteurs  $\vec{b}, \vec{P}_1, \vec{P}_2$  sont coplanaires. Cette condition de coplanéité s'exprime mathématiquement par l'équation :

$$\Delta = \det(\vec{b}, \vec{P}_1, \vec{P}_2) = \begin{vmatrix} 1 & P_{1x} & P_{2x} \\ 0 & P_{1y} & P_{2y} \\ 0 & P_{1z} & P_{2z} \end{vmatrix} = 0 \quad (18)$$

Ce qui équivaut donc à :

$$\Delta = P_{1y} * P_{2z} - P_{1z} * P_{2y} = 0 \quad (19)$$

Par développement en série de Taylor on a (en ne retenant que les termes du premier ordre) :

$$\Delta = \left( \frac{\partial \Delta}{\partial \varphi_1} \right)_0 d\varphi_1 + \left( \frac{\partial \Delta}{\partial \kappa_1} \right)_0 d\kappa_1 + \left( \frac{\partial \Delta}{\partial \omega_2} \right)_0 d\omega_2 + \left( \frac{\partial \Delta}{\partial \varphi_2} \right)_0 d\varphi_2 + \left( \frac{\partial \Delta}{\partial \kappa_2} \right)_0 d\kappa_2 + \Delta_0 = 0 \quad (20)$$

Par calcul des dérivées et simplification, on obtient :

$$\begin{cases} \frac{\partial \Delta}{\partial \varphi_1} = \frac{\partial R_{1y}}{\partial \varphi_1} * p_1 * P_{2z} - \frac{\partial R_{1z}}{\partial \varphi_1} * p_1 * P_{2y} \\ \frac{\partial \Delta}{\partial \kappa_1} = \frac{\partial R_{1y}}{\partial \kappa_1} * p_1 * P_{2z} - \frac{\partial R_{1z}}{\partial \kappa_1} * p_1 * P_{2y} \\ \frac{\partial \Delta}{\partial \omega_2} = \frac{\partial R_{2z}}{\partial \omega_2} * p_2 * P_{1y} - \frac{\partial R_{2y}}{\partial \omega_2} * p_2 * P_{1z} \\ \frac{\partial \Delta}{\partial \varphi_2} = \frac{\partial R_{2z}}{\partial \varphi_2} * p_2 * P_{1y} - \frac{\partial R_{2y}}{\partial \varphi_2} * p_2 * P_{1z} \\ \frac{\partial \Delta}{\partial \kappa_2} = \frac{\partial R_{2z}}{\partial \kappa_2} * p_2 * P_{1y} - \frac{\partial R_{2y}}{\partial \kappa_2} * p_2 * P_{1z} \end{cases} \quad (21)$$

Ainsi, en considérant  $n$  points homologues, on obtient le système suivant :

$$\begin{pmatrix} \left(\frac{\partial \Delta}{\partial \varphi_1}\right)_{01} & \left(\frac{\partial \Delta}{\partial \kappa_1}\right)_{01} & \left(\frac{\partial \Delta}{\partial \omega_2}\right)_{01} & \left(\frac{\partial \Delta}{\partial \varphi_2}\right)_{01} & \left(\frac{\partial \Delta}{\partial \kappa_2}\right)_{01} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \left(\frac{\partial \Delta}{\partial \varphi_1}\right)_{0n} & \left(\frac{\partial \Delta}{\partial \kappa_1}\right)_{0n} & \left(\frac{\partial \Delta}{\partial \omega_2}\right)_{0n} & \left(\frac{\partial \Delta}{\partial \varphi_2}\right)_{0n} & \left(\frac{\partial \Delta}{\partial \kappa_2}\right)_{0n} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} d\varphi_1 \\ d\kappa_1 \\ d\omega_2 \\ d\varphi_2 \\ d\kappa_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\Delta_{01} \\ \vdots \\ -\Delta_{0n} \end{pmatrix} \quad (22)$$

Sachant qu'il y a cinq inconnues, il faut un minimum de cinq points homologues pour la résolution du système. Ces points peuvent être repérés par un opérateur qui effectue la numérisation des points sur les deux images du couple; cependant, il est plus efficace et moins contraignant d'utiliser une méthode de mise en correspondance automatique de points homologues. Sachant que la méthode de détection de points d'intérêt *Scale Invariant Feature Transform (SIFT)* développée par Lowe (2004) est une des plus efficaces actuellement, nous avons décidé de l'utiliser dans le cadre du projet. Une analyse *RANSAC* est par la suite effectuée pour éliminer les mauvaises mises en correspondance de points homologues.

Le système de l'équation (21) est de la forme  $AX = B$ , et peut être résolu avec la théorie des moindres carrés de la façon suivante :

$$X = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (23)$$

On peut en déduire par la même occasion les résidus  $V$ , la racine carrée de l'erreur moyenne quadratique (*Root Mean Square Error* en anglais ou *RMSE*) sur l'unité de poids  $mq_0$  et sur les inconnues  $mq_X$  :

$$\begin{aligned} V &= AX - B \\ mq_0 &= \sqrt{\frac{V^T V}{n - 5}} \\ mq_X &= \sqrt{mq_0^2 * (A^T A)^{-1}} \end{aligned} \quad (24)$$

Les nouvelles valeurs des angles sont ensuite obtenues avec :

$$\begin{cases} \varphi_1 = \varphi_1 + d\varphi_1 \\ \kappa_1 = \kappa_1 + d\kappa_1 \\ \omega_2 = \omega_2 + d\omega_2 \\ \varphi_2 = \varphi_2 + d\varphi_2 \\ \kappa_2 = \kappa_2 + d\kappa_2 \end{cases} \quad (25)$$

Le calcul est itératif et s'exécute jusqu'à ce que toutes les composantes de  $X$  soit inférieures à  $10^{-10}$ . Ce critère de convergence du calcul a été mis en place empiriquement.

Une fois les paramètres d'orientation relative calculés, les coordonnées « modèle » tridimensionnelles de l'ensemble des pixels visibles simultanément sur les deux photos peuvent être calculées. Pour cela, on utilise les équations de colinéarité<sup>11</sup> :

$$\begin{cases} x = x_0 + (z - z_0) \frac{R_{(1,1)} * (x' - x'_0) + R_{(1,2)} * (y' - y'_0) - R_{(1,3)} * f}{R_{(3,1)} * (x' - x'_0) + R_{(3,2)} * (y' - y'_0) - R_{(3,3)} * f} = x_0 + (z - z_0) * K_x \\ y = y_0 + (z - z_0) \frac{R_{(2,1)} * (x' - x'_0) + R_{(2,2)} * (y' - y'_0) - R_{(2,3)} * f}{R_{(3,1)} * (x' - x'_0) + R_{(3,2)} * (y' - y'_0) - R_{(3,3)} * f} = y_0 + (z - z_0) * K_y \end{cases} \quad (26)$$

À l'aide de ces équations et des contraintes imposées auparavant (cf. équation (16)), on obtient pour un point homologue les quatre équations suivantes :

$$\begin{cases} x_P = x_{01} + (z_P - z_{01}) * K_{xP1} \\ y_P = y_{01} + (z_P - z_{01}) * K_{yP1} \\ x_P = x_{02} + (z_P - z_{02}) * K_{xP2} \\ y_P = y_{02} + (z_P - z_{02}) * K_{yP2} \end{cases} \quad (27)$$

Donc, sous forme matricielle :

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & -K_{xP1} \\ 0 & 1 & -K_{yP1} \\ 1 & 0 & -K_{xP2} \\ 0 & 1 & -K_{yP2} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} x_P \\ y_P \\ z_P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{01} - z_{01} * K_{xP1} \\ y_{01} - z_{01} * K_{yP1} \\ x_{02} - z_{02} * K_{xP2} \\ y_{02} - z_{02} * K_{yP2} \end{pmatrix} \quad (28)$$

On se retrouve de nouveau avec un système  $AX = B$  pouvant être résolu par les moindres carrés afin de trouver le triplet de coordonnées « modèle »  $[x_P, y_P, z_P]$ .

➤ L'orientation absolue :

Nous avons déterminé les coordonnées « modèle » des points homologues dans un système tridimensionnel à échelle arbitraire. Il convient maintenant de transformer ces coordonnées dans un système de référence tridimensionnel connu. Pour effectuer cette transformation, nous utilisons une similitude spatiale à sept paramètres définie avec l'équation (Boulianne, 2015) :

---

<sup>11</sup>  $R$  est la matrice de rotation utilisée auparavant associée à l'image considérée.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = s * R(\omega, \varphi, \kappa) * \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{pmatrix} \quad (29)$$

Avec :

- $X, Y, Z$ , les coordonnées du point homologue considéré dans le système de référence final.
- $s$ , un facteur d'échelle entre le système des coordonnées modèle et le système de référence final.
- $R(\omega, \varphi, \kappa)$ , une matrice de rotation tridimensionnelle (cf. forme Dr Blais dans annexe VII).
- $x, y, z$ , les coordonnées « modèle » du point homologue considéré.
- $T_X, T_Y, T_Z$ , les éléments de translation entre les deux origines des systèmes coordonnées modèle et final.

En supposant les angles de rotation faibles, la matrice de rotation est de la forme (Boulianne, 2015) :

$$R = \begin{pmatrix} 1 & -\kappa & -\varphi \\ \kappa & 1 & -\omega \\ \varphi & \omega & 1 \end{pmatrix} \quad (30)$$

En imposant ensuite la notation :

$$\begin{aligned} a &= s & e &= T_X \\ b &= -K * \kappa & f &= T_Y \\ c &= K * \varphi & g &= T_Z \\ d &= K * \omega \end{aligned} \quad (31)$$

On peut réorganiser l'équation (28) de la manière suivante :

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x & y & -z & 0 & 1 & 0 & 0 \\ y & -x & 0 & -z & 0 & 1 & 0 \\ z & 0 & x & y & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \\ g \end{pmatrix} \quad (32)$$

Comme précédemment, ce système  $AX = B$  peut être résolu par la méthode des moindres carrés. Sachant qu'il y a sept inconnues à déterminer, il faut donc un minimum de deux points d'appui connus en planimétrie et un point d'appui connu en altimétrie pour résoudre le système. Une fois les points d'appui numérisés manuellement sur chaque image, le calcul des

coordonnées « modèle » est effectué afin de servir d'observations pour la résolution de l'équation (32).

Les valeurs de  $s, \omega, \varphi, \kappa, T_X, T_Y, T_Z$  sont ensuite obtenues avec les formules suivantes (Boulianne, 2015) :

$$\left\{ \begin{array}{l} s = \sqrt{a^2 + b^2} \\ \omega = \arctan\left(\frac{d}{s}\right) \\ \varphi = \arctan\left(\frac{c}{s}\right) \\ \kappa = \arctan\left(\frac{-b}{a}\right) \\ T_X = e \\ T_Y = f \\ T_Z = g \end{array} \right. \quad (33)$$

Ces valeurs sont approchées et des itérations doivent être effectuées pour obtenir les valeurs finales<sup>12</sup>. Le calcul s'arrête lorsque le facteur d'échelle se stabilise ( $1 - 0.001 < s < 1 + 0.001$ ), la matrice de rotation se rapproche d'une matrice identité ( $1 - 0.00001 < R < 1 + 0.00001$ ) et le vecteur translation devient nul ( $-0.0001 < T_X < 0.0001$  ;  $-0.0001 < T_Y < 0.000$  ;  $-0.0001 < T_Z < 0.0001$ ).

Cependant,  $s, \omega, \varphi, \kappa, T_X, T_Y, T_Z$  sont exprimés en fonctions de  $a, b, c, d, e, f, g$ , les racines carrées des erreurs moyennes quadratiques des inconnues sont alors calculées à l'aide des formules de propagation d'erreurs (Ku, 1966).

Les cinq paramètres d'orientation relative et les sept paramètres d'orientation absolue ayant été déterminés, il suffit d'appliquer successivement les équations (28) et (29) pour obtenir les coordonnées de n'importe quel point homologue dans le système de référence tridimensionnel choisi.

### 4.3.3 Validation des résultats

➤ Orientation intérieure :

On a effectué une vérification en s'assurant que les coordonnées du point principal sont proches du centre du capteur, que la distance principale obtenue est de l'ordre de celle fournie

---

<sup>12</sup> Qui correspondent à la somme des valeurs successives des inconnues de l'équation (33).

par le constructeur et que les coefficients de distorsion tangentielle sont inférieurs aux coefficients de distorsion radiale. Aussi, pour un jeu d'images issues de la caméra étudiée, nous avons vérifié que les lignes qui apparaissent courbes sur les images originales sont droites sur les images corrigées en distorsion.

➤ Orientation extérieure :

Après orientation relative, l'angle d'intersection moyen des visées des points homologues issues des deux capteurs est calculé par l'équation (Luhmann *et al.*, 2013) :

$$\cos(\alpha) = \frac{P_1^T P_2}{|P_1| * |P_2|} \quad (34)$$

On en déduit par la suite une approximation du rapport  $B/D$ <sup>13</sup> :

$$B/D \approx 2 * \arctan(0.5 * \alpha) \quad (35)$$

On peut aussi vérifier que les éléments de rotation  $\omega, \varphi, \kappa$  sont similaires entre les deux caméras et que les racines carrées des erreurs moyennes quadratiques associées sont faibles.

Après orientation absolue, on peut calculer la base  $B$  avec la formule (28) en remplaçant les coordonnées « modèle » par  $\vec{b}$ . On peut comparer la valeur calculée avec une prise de mesure manuelle (ayant été effectuée au préalable pendant l'acquisition).

Aussi, nous avons isolé pour chaque couple stéréoscopique un jeu de points d'appui qui n'ont pas servi au calcul d'orientation mais comme données de contrôle uniquement. En analysant les résidus, on peut estimer la validité et la qualité du calcul d'orientation.

## 4.4 Automatisation de l'algorithme

Jusqu'à présent, nous nous sommes intéressés au traitement d'une séquence unique. Cependant, comment peut-on rendre le processus automatique ?

Sachant que les caméras sont immobiles et fixées solidement à leur armature d'accroche et que par conséquent les orientations intérieure et extérieure ne doivent être effectuées qu'une

---

<sup>13</sup> Où  $B$  est la distance entre les deux centres optiques et  $D$ , l'éloignement du couple stéréoscopique avec l'objet d'intérêt.

seule fois, le passage des coordonnées pixelliques aux coordonnées tridimensionnelles dans le référentiel souhaité peut donc être réalisé à chaque époque avec les paramètres calculés.

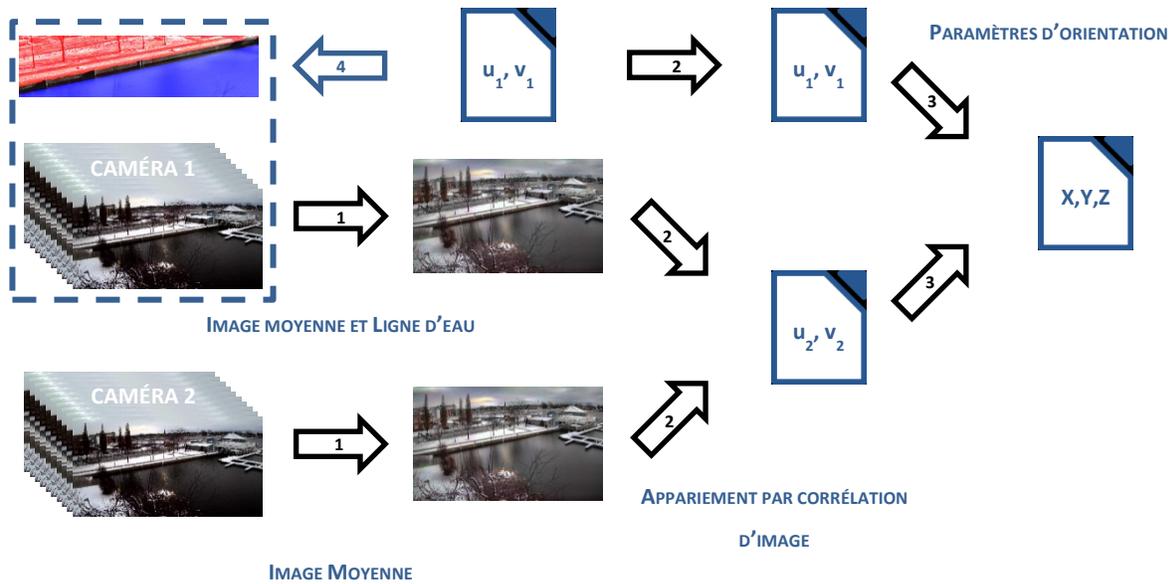
Toutefois, l'extraction de la ligne d'eau est basée sur des sites d'entraînement valides à une époque donnée. Pour une autre époque, la ligne d'eau peut avoir bougé sur l'image et les sites sont alors mal définis. Par conséquent nous devons trouver un moyen de mettre à jour régulièrement la superficie des sites.

Ainsi, pour chaque époque  $t$ , nous avons créé une zone tampon autour de la ligne d'eau trouvée à l'époque  $t - 1$  afin de déterminer les nouveaux sites d'entraînement. La valeur de la zone tampon doit être fixée empiriquement. Dans la majorité des analyses effectuées dans le cadre du projet, cette valeur a été fixée à 30 pixels de part et d'autre de la ligne d'eau. Cependant, si le niveau d'eau subit des évolutions importantes régulières au cours du temps (marées par exemple), cette valeur peut être augmentée ou diminuée pour ne pas entraîner d'erreurs lors de la phase de classification.

La Figure 4.17 montre les sites d'entraînement définis de part et d'autre de la zone tampon autour de la ligne d'eau tandis que la Figure 4.18 résume le traitement automatique des séquences au fil du temps.



**Figure 4.17 : Définition des nouveaux sites d'entraînement – site central de Saint-Jean-sur-Richelieu**



**Figure 4.18 : Traitement automatique des séquences d'images au fil du temps**

Pour la première époque, les images moyennes des séquences d'images issues des deux caméras sont calculées et la ligne d'eau est extraite pour la caméra 1 (étape 1). À l'aide des coordonnées du système image de la ligne d'eau pour la caméra 1, les coordonnées dans le système image de la caméra 2 sont recherchées par corrélation d'images (étape 2). Les coordonnées bidimensionnelles de la ligne d'eau étant connues pour les deux caméras, les coordonnées tridimensionnelles sont déterminées avec les paramètres d'orientations intérieure et extérieure préalablement calculés (étape 3). Pour la seconde époque, les coordonnées bidimensionnelles de la caméra 1 obtenues à l'issue de l'étape 1 sont utilisées pour redéfinir les sites d'entraînement (étape 4). L'ensemble du processus peut alors être relancé à partir de l'étape 1; les époques subséquentes sont traitées de la même manière que l'époque 2.

La méthodologie de détermination de la ligne d'eau dans un référentiel tridimensionnel connu a été exposé à la fois pour le traitement d'une seule séquence d'images, mais aussi pour l'enchaînement automatique de séquences d'images successives, ces séquences pouvant être séparées de quelques minutes à quelques heures suivant l'évolution du niveau d'eau et de la valeur de la zone tampon empirique mise en place. Le prochain chapitre est consacré aux résultats obtenus.

## 5 RÉSULTATS

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats obtenus pendant ce travail de recherche par rapport aux deux sous-objectifs :

1. Extraire la ligne d'eau à partir des images acquises par les caméras.
2. Géoréférencer la ligne d'eau extraite afin d'obtenir le niveau d'eau.

Dans un premier temps, la performance de l'algorithme d'extraction de la ligne d'eau est évoquée, puis un bilan de la technique de géoréférencement est exposé. Enfin, quelques recommandations et pistes d'amélioration pour rendre le système plus rapide et plus robuste sont discutées.

### 5.1 Extraction de la ligne d'eau

La technique d'extraction de la ligne d'eau a été testée avec principalement des images issues des caméras de droite des couples stéréoscopiques des sites nord et central à Saint-Jean-sur-Richelieu ainsi que de la caméra de droite du couple stéréoscopique installé à la traverse Québec-Lévis.

Les résultats obtenus pour chacun des trois capteurs ont été analysés séparément. Il est à noter que les séquences d'images qui ont été sélectionnées pour ces tests présentent volontairement des caractéristiques très différentes au niveau de la fréquence d'enregistrement, de la résolution du capteur, de la qualité d'acquisition, des conditions météorologiques et du contexte photographié (présence de neige ou non, marée haute ou basse...). Les caractéristiques des observations sont données pour chacun des trois ensembles.

#### 5.1.1 Site nord de Saint-Jean-sur-Richelieu

Au nord de Saint-Jean-sur-Richelieu, la cohérence des résultats a été validée pour la journée du 15 mars 2018. Les caractéristiques des observations sont les suivantes :

- Acquisition de quatre séquences à 08:00, 10:00, 14:00 et 18:00.
- Résolution réduite à 3072 x 1728 pixels (bande passante faible). Malgré cette précaution, on remarque des défauts de qualité lors de l'enregistrement sur plusieurs clichés (seconde image de la Figure 5.2, les valeurs spectrales des pixels du banc de droite s'étendent jusqu'au bas de la photographie).

- Météo : neigeux et nuageux pour la première séquence évoluant en soleil à partir de 14:00 (Figure 5.1).
- Contexte photographié : présence de neige au sol mais pas de glace présente sur la rivière, passage de volatiles sur le plan d'eau à 10:00 (première image de la Figure 5.2).



**Figure 5.1 : Images moyennes des séquences acquises pour la journée du 15 mars 2018 de 08:00 à 18:00 (ordre de gauche à droite et du haut vers le bas) au site nord de Saint-Jean-sur-Richelieu**

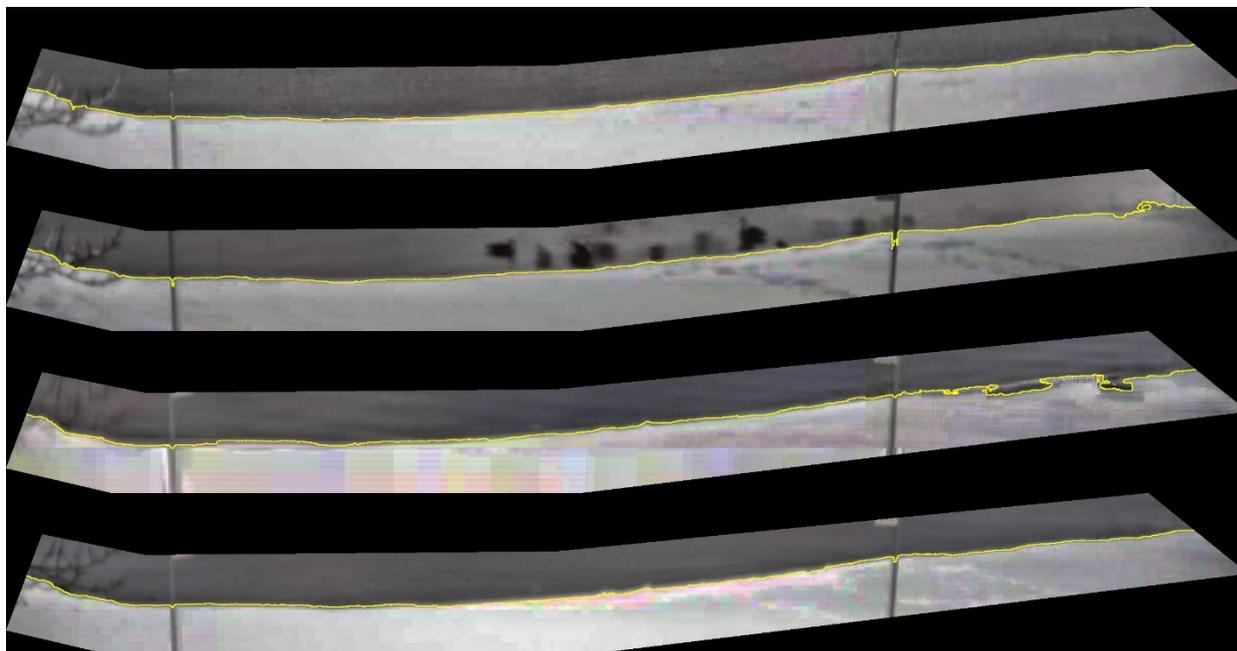


**Figure 5.2 : Exemples de photographies acquises au cours de la journée du 15 mars 2018 au site nord de Saint-Jean-sur-Richelieu**

Les sites d'entraînement ont été définis sur l'image moyenne de la séquence de 08:00 puis le reste du calcul s'est effectué automatiquement tel que présenté au paragraphe 4.4.

Comme expliqué au paragraphe 4.1.8, nous avons utilisé la méthode *Delphi* pour évaluer le bon fonctionnement de l'algorithme. Ce sont en tout 19 personnes qui ont participé à la numérisation de la ligne d'eau sur les quatre images moyennes précédentes.

La Figure 5.3 expose les résultats de ligne d'eau extraite avec la méthode mise en place tandis que la Figure 5.4 superpose ces résultats avec ceux générés par l'analyse *Delphi*. Le Tableau 5.1 expose les résultats de rendement obtenus pour les quatre séquences.



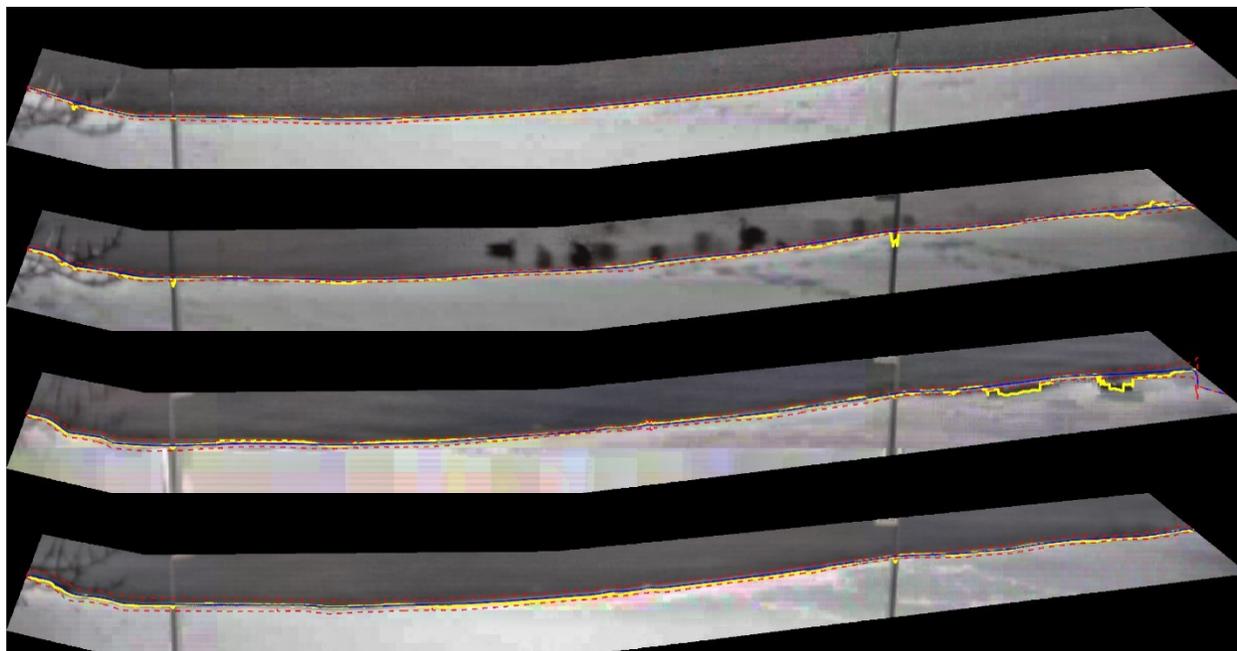
**Figure 5.3 : Lignes d'eau calculées (en jaune) sur les quatre images moyennes découpées de 08:00 (en haut) à 18:00 (en bas)**

**Tableau 5.1 : Rendements obtenus pour chaque séquence et rendement moyen – Site nord de Saint-Jean-sur-Richelieu**

Numéro Séquence	1	2	3	4
$\rho$	0.982	0.910	0.905	0.995
$\rho$ moyen	0.948			

Avec ces valeurs, on peut se rendre compte que les résultats fournis par l'algorithme sont intéressants puisque plus de 90% des pixels sont compris dans l'intervalle de confiance à chaque époque, la moyenne étant proche de 95%. Ces rendements élevés s'expliquent par la forte différence spectrale entre les valeurs d'eau et de neige, facilitant l'étape de classification.

Les résultats les plus faibles sont obtenus à 10:00 et 14:00, heures auxquelles les plus fortes perturbations ont été enregistrées. Il est même assez difficile de repérer à l'œil la ligne d'eau sur le dernier quart droit de chaque image moyenne (seconde et troisième images de la Figure 5.3).



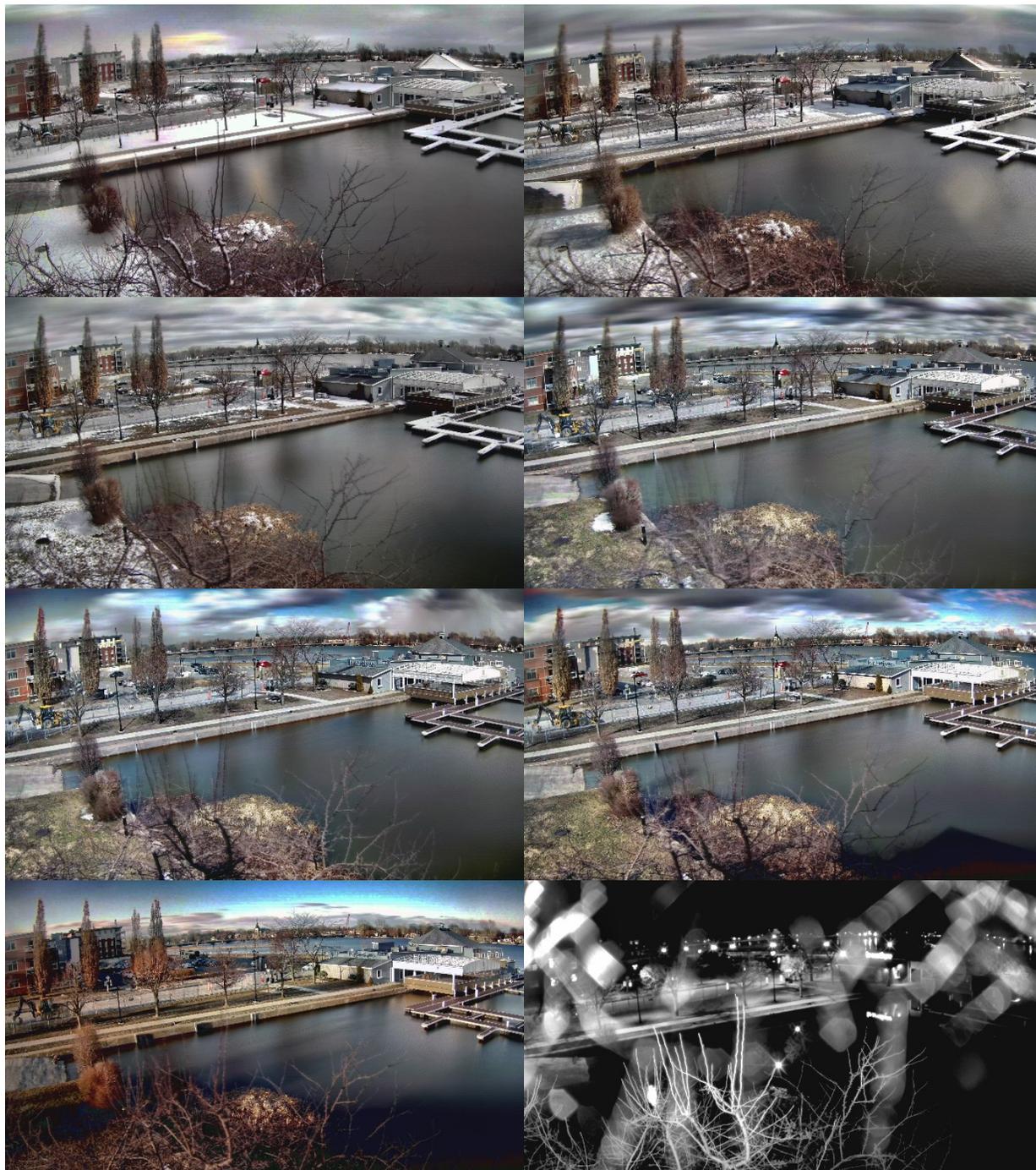
**Figure 5.4 : Lignes d'eau calculées (en jaune), moyennes des lignes d'eau numérisées (en bleu), et intervalle de confiance (en rouge) sur les quatre images moyennes découpées de 08:00 (en haut) à 18:00 (en bas)**

### **5.1.2 Site central de Saint-Jean-sur Richelieu**

À la marina de Saint-Jean-sur-Richelieu, la méthode a été validée sur la journée du 17 avril 2018. Les caractéristiques d'observations sont les suivantes :

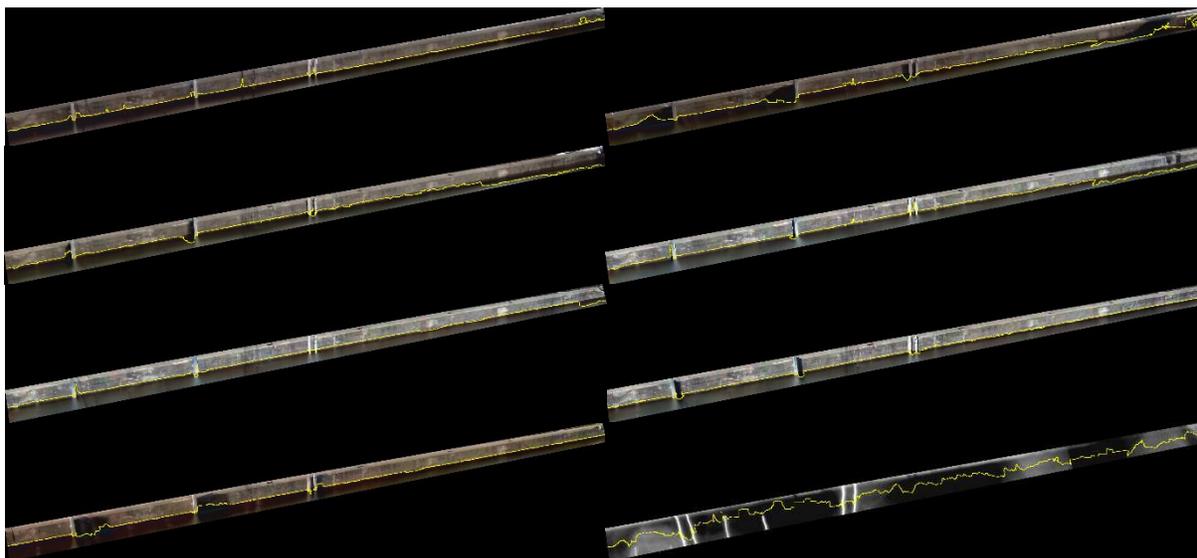
- Acquisition de sept séquences de jour à 06:25, 08:25, 10:25, 12:25, 14:25, 16:25, 18:25 et une séquence de nuit à 21:25.
- Météo : nuageux le matin, ensoleillé à partir de 14:25.
- Contexte photographié : présence de neige au sol le matin, fonte au cours de la journée devenant totale à partir de 14:25.
- La validation a été effectuée avec les mêmes 19 experts.

La Figure 5.5 expose les images moyennes de chaque séquence et la Figure 5.6 montre les lignes d'eau calculées aux images moyennes découpées à la région d'intérêt.



**Figure 5.5 : Images moyennes des séquences acquises pour la journée du 17 avril 2018 de 06:25 à 21:25 (ordre de gauche à droite et du haut vers le bas) au site central de Saint-Jean-sur-Richelieu**

Concernant la séquence acquise à 21:25, l'image moyenne obtenue est visible avec la dernière imagerie de la Figure 5.5. On peut s'apercevoir que le capteur est obstrué par un élément extérieur (vraisemblablement une toile d'araignée). Nous avons toutefois réalisé le calcul d'extraction, mais la présence de cet objet couplée à des mauvaises conditions d'éclairage (quai dans le noir total même après amélioration du contraste, reflets sur l'eau...), ont entraîné des résultats visiblement faux (dernière image de la Figure 5.6). Aussi, la numérisation de la ligne d'eau dans ces conditions est impossible donc la validation avec la méthode *Delphi* n'a pas été réalisée pour cette séquence.



**Figure 5.6 : Lignes d'eau calculées (en jaune) sur les huit images moyennes découpées de 06:25 à 21:25 (ordre de gauche à droite et du haut vers le bas)**

La Figure 5.7 superpose la ligne d'eau calculée avec les résultats de validation obtenus et le Tableau 5.2 met en évidence les rendements pour chaque séquence.

**Tableau 5.2 : Rendements obtenus pour chaque séquence et rendement moyen – Site central de Saint-Jean-sur-Richelieu**

Numéro Séquence	1	2	3	4	5	6	7
$\rho$	0.934	0.705	0.276	0.223	0.271	0.561	0.798
$\rho$ moyen	0.538						

Les sites d'entraînement ayant été définis manuellement sur la première séquence, la valeur de rendement est donc importante, de près de 93%.

La chute de l'ordre de 23% sur la seconde séquence s'explique par les valeurs spectrales du dernier quart de l'image. Le quai génère une ombre sur l'eau et la différence d'intensité entre le quai et l'eau dans l'ombre est moins importante qu'entre la partie ombragée de l'eau et la partie non ombragée, l'algorithme de classification détecte donc cette interface et non la ligne d'eau réelle (rectangle rouge Figure 5.8).

À la troisième séquence, on observe une nouvelle chute d'environ 43% mais visuellement, celle-ci n'est que peu détectable sur l'image découpée. Cependant, si on effectue un zoom, on peut comprendre cette baisse significative de rendement. Le quai est mouillé dans sa partie basse, l'œil humain est capable de faire cette distinction mais l'algorithme de classification, qui a pour but de minimiser une fonction d'énergie, ne peut pas la réaliser et par conséquent c'est l'interface entre le quai sec et le quai mouillé qui est détectée (Figure 5.9). Il est à noter que, puisque les sites d'entraînement à une époque  $t$  sont définis à partir de la ligne d'eau définie à l'époque  $t - 1$ , l'erreur apparue à la seconde séquence se propage à la troisième.

Pour les séquences 4 et 5, le changement non significatif des valeurs spectrales explique le phénomène de propagation d'erreurs et des rendements similaires à ceux de la séquence 3.

Pour les séquences 6 et 7, l'atténuation de l'ombre dans le dernier quart de l'image occasionne une détection de la ligne d'eau à proximité du quai. Cependant, ce dernier étant encore mouillé sur sa partie basse, il subsiste des erreurs et c'est la raison pour laquelle le rendement n'atteint pas 80%.

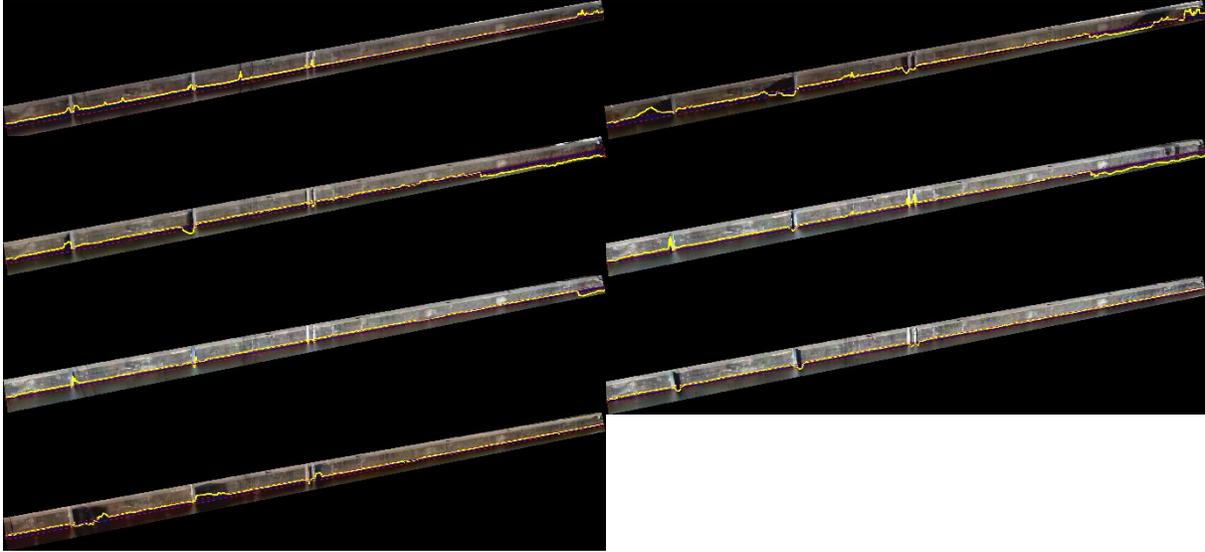


Figure 5.7 : Lignes d'eau calculées (en jaune), moyennes des lignes d'eau numérisées (en bleu), et intervalle de confiance (en rouge) sur les huit images moyennes découpées de 06:25 à 21:25 (ordre de gauche à droite et du haut vers le bas)



Figure 5.8 : Image moyenne de la séquence de 08:25 – Site central de Saint-Jean-sur-Richelieu

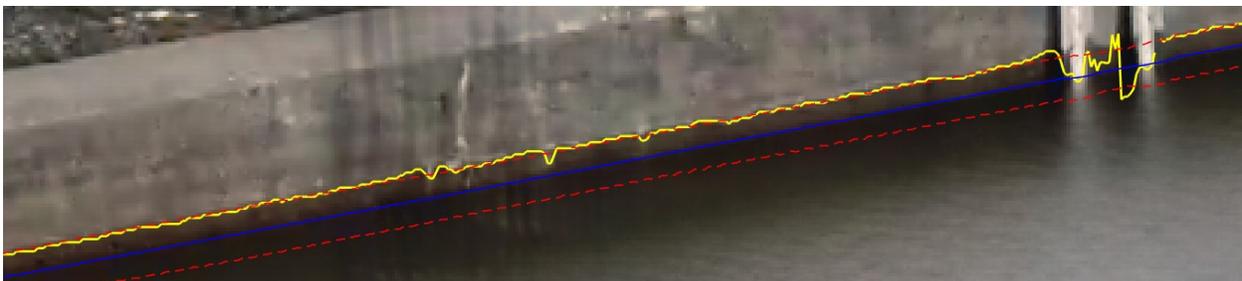


Figure 5.9 : Zoom sur l'image moyenne de la séquence de 10:25 avec la ligne d'eau calculée (en jaune), la valeur moyenne des lignes numérisées (en bleu), et l'intervalle de confiance (en rouge)

### 5.1.3 Traverse Québec-Lévis

À la traverse Québec-Lévis, nous avons validé la méthode sur la journée du 25 avril 2017.

Les caractéristiques d'observations sont les suivantes :

- Acquisition de quatre séquences à 14:36, 14:56, 15:16 et à 15:36.
- Météo : ensoleillé pendant toute la période d'acquisition.
- Contexte photographié : quai Dalhousie et fleuve Saint-Laurent, montée du niveau de l'eau durant l'heure d'acquisition, passage d'un mélange de formes hétérogènes sur le plan d'eau à partir de 14:56.
- La validation a été effectuée avec les mêmes 19 experts.

La Figure 5.10 expose les images moyennes de chaque séquence. La Figure 5.11 montre les lignes d'eau calculées sur les images moyennes découpées à la région d'intérêt. La Figure 5.12 met en évidence les résultats de validation. Le Tableau 5.3 expose les rendements obtenus pour ces séquences.



**Figure 5.10 : Images moyennes des séquences acquises pour la journée du 25 avril 2017 de 14:36 à 15:36 (ordre de gauche à droite et du haut vers le bas) à la traverse Québec-Lévis**

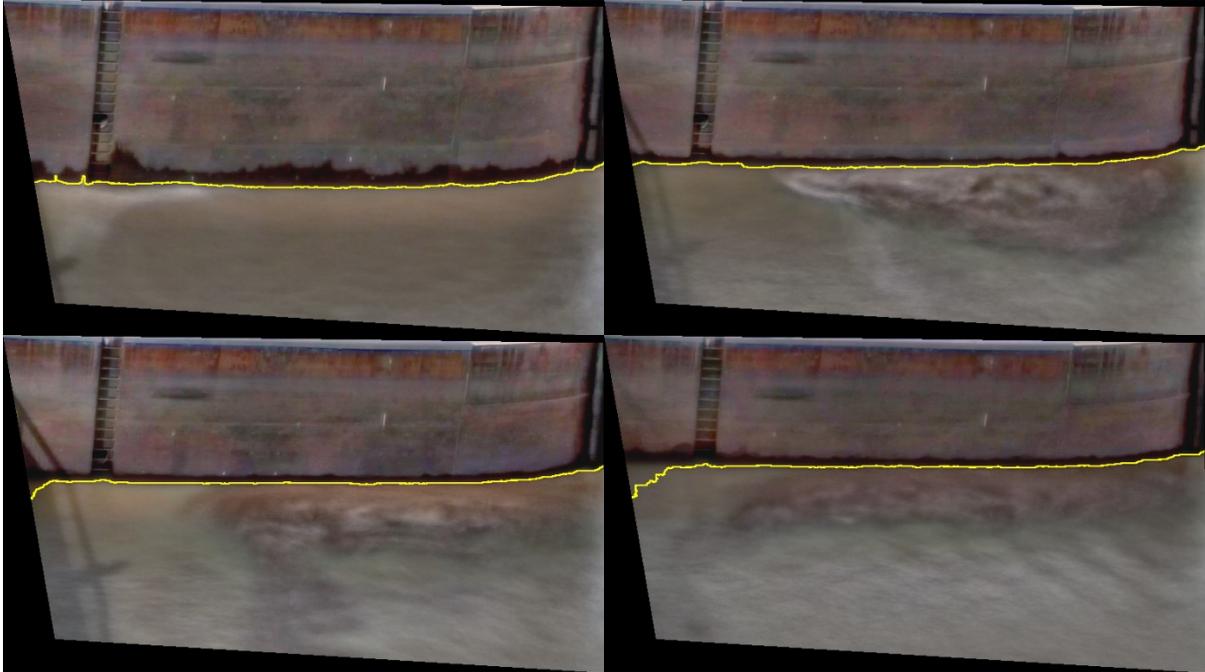


Figure 5.11 : Lignes d'eau calculées (en jaune) sur les quatre images moyennes découpées de 14:36 à 15:36 (ordre de gauche à droite et du haut vers le bas)

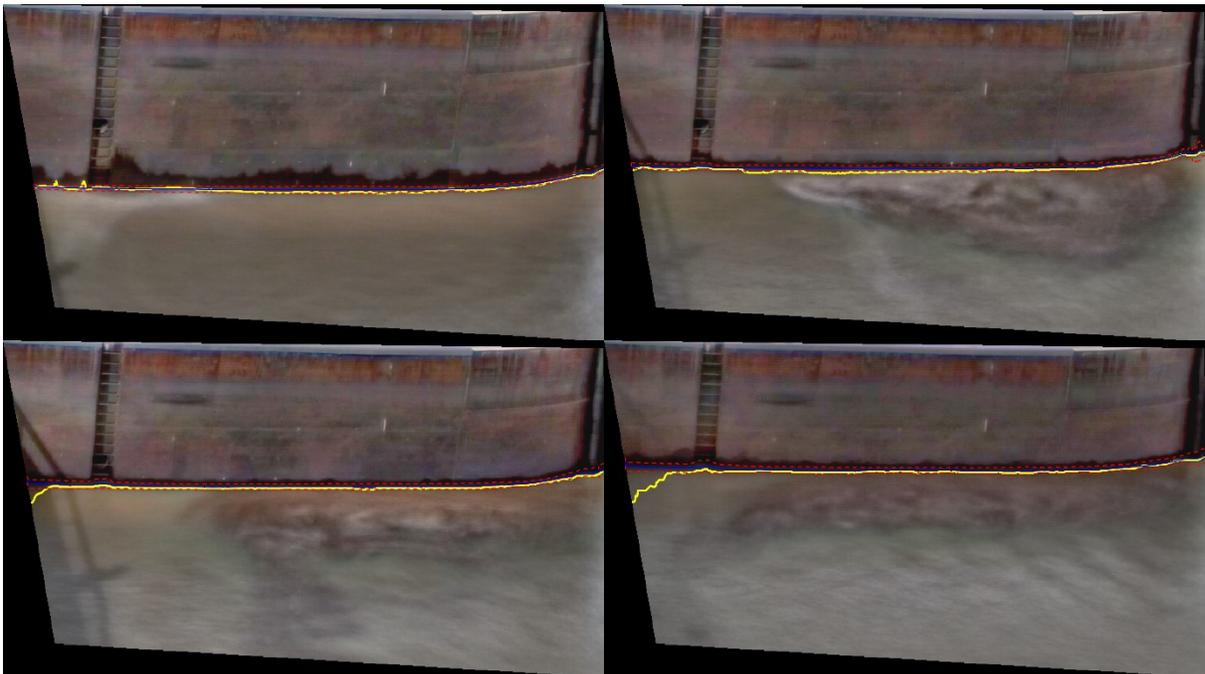


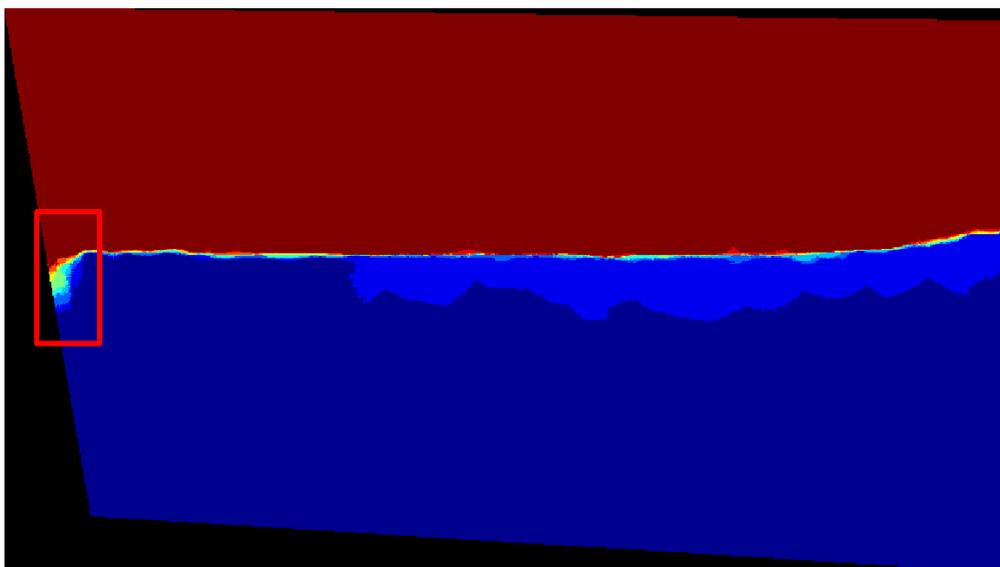
Figure 5.12 : Lignes d'eau calculées (en jaune), moyennes des lignes d'eau numérisées (en bleu), et intervalle de confiance (en rouge) sur les quatre images moyennes découpées de 14:36 à 15:36 (ordre de gauche à droite et du haut vers le bas)

**Tableau 5.3 : Rendements obtenus pour chaque séquence et rendement moyen – Traverse Québec-Lévis**

Numéro Séquence	1	2	3	4
$\rho$	0.929	0.639	0.940	0.917
$\rho$ moyen	0.856			

Premièrement, les images de la Figure 5.11 et de la Figure 5.12 illustrent la montée du niveau d'eau au cours de l'heure d'acquisition : la surface de la photo consacrée au quai est de plus en plus réduite.

Pour trois des quatre séquences, le rendement est supérieur à 90%. Pour la seconde séquence, le mélange hétérogène décrit plus haut entraîne des mauvais traitements lors de la segmentation et de la classification. Pour la troisième séquence, l'algorithme « décroche » à gauche de l'image et cette erreur est transmise à la dernière séquence. Ceci est dû à une incertitude importante sur l'appartenance des pixels à l'une des classes à l'issue des simulations. L'image de classification finale (rectangle de la Figure 5.13) le met en évidence avec l'éventail de couleur étendu dans cette zone signifiant que les pixels ne sont pas attribués à la même classe pour toutes les simulations.



**Figure 5.13 : Image de classification finale à 15:16 à la traverse Québec-Lévis**

Généralement, l'algorithme d'extraction de la ligne d'eau fonctionne d'une manière efficace et rapide. En effet, le rendement est supérieur à 90% pour toutes les premières séquences de chaque journée, ceci étant dû à la définition manuelle précise des sites d'entraînement. Pour les séquences suivantes, les erreurs d'extraction de la ligne d'eau sont plus induites par l'apparition d'objets ou liées aux propriétés physiques des éléments observés que par les changements de luminosité. Enfin, le temps de traitement d'une séquence est en moyenne de deux minutes, dépendamment de la taille de la région d'intérêt créée.

## 5.2 Géoréférencement de la ligne d'eau

Pour le géoréférencement, on doit distinguer les résultats acquis au terme de l'orientation intérieure, utilisant chaque caméra individuellement, de ceux acquis après l'orientation extérieure.

### 5.2.1 Orientation intérieure

En raison de premiers essais infructueux et de délais restreints au cours de l'année 2016, l'orientation intérieure des caméras présentes à Saint-Jean-sur-Richelieu n'a pas pu être effectuée avant l'installation par les équipes techniques de la ville.

Ainsi, les résultats présentés concernent les caméras « test » de l'INRS et utilisées pour les essais réalisés à trois sites : 1) au laboratoire de métrologie de l'Université Laval, 2) depuis la terrasse de l'INRS et 3) à la traverse Québec-Lévis.

Pour chaque caméra, une vidéo d'un damier de calibration (Figure 5.14) avec différentes prises de vue a été réalisée. De ces vidéos, onze photos ont été extraites permettant de couvrir au mieux la surface photographiée.



Figure 5.14 : Exemples de clichés acquis d'un damier de calibration pour l'orientation intérieure

Pour les deux caméras, la couverture du capteur par le damier est respectivement de 87% et 88%. Une fois le calcul réalisé (Bouguet, 2002), les fichiers de résultats présentés au Tableau 5.4 et au Tableau 5.5 ont été obtenus pour les deux caméras.

**Tableau 5.4 : Résultats obtenus pour l'orientation intérieure de la caméra 1**

```
Focales : 2792.36,2793.62
Point principal : 1947.76,1042.37
Distorsion : Modèle normal (k1,k2,p1,p2,k3) : -0.363172,0.17749,-
0.000958029,-4.69145e-05,-0.0528236
Rms : 0.788292 pix
Rms par image :
#0 : 0.920462 pix
#1 : 0.617043 pix
#2 : 0.451846 pix
#3 : 0.45147 pix
#4 : 0.711301 pix
#5 : 0.72717 pix
#6 : 0.710031 pix
#7 : 0.993477 pix
#8 : 0.873478 pix
#9 : 0.982527 pix
#10 : 0.972226 pix
```

**Tableau 5.5 : Résultats obtenus pour l'orientation intérieure de la caméra 2**

```
Focales : 2752.36,2753.42
Point principal : 1932.33,1006.73
Distorsion : Modèle normal (k1,k2,p1,p2,k3) : -0.360831,0.17619,-0.00133259,-
0.000771022,-0.0526333
Rms : 0.837186 pix
Rms par image :
#0 : 0.907269 pix
#1 : 0.640876 pix
#2 : 0.511487 pix
#3 : 0.57999 pix
#4 : 0.611582 pix
#5 : 0.684327 pix
#6 : 1.15473 pix
#7 : 0.972904 pix
#8 : 0.975246 pix
#9 : 0.898769 pix
#10 : 0.998325 pix
```

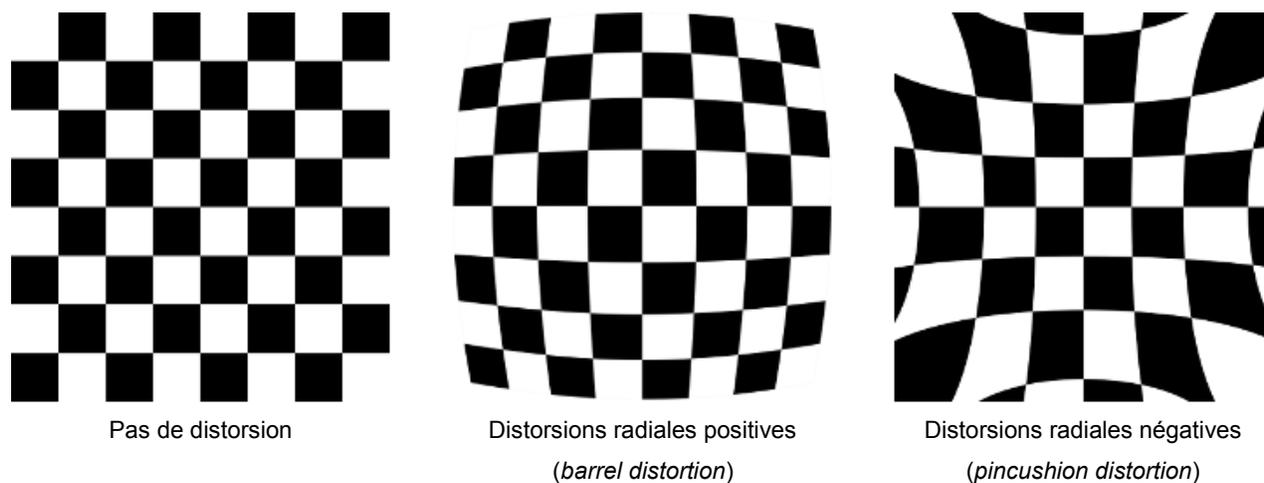
Ces valeurs ont été obtenues après une dizaine d'essais avec différents jeux comprenant entre 8 et 12 photos. Les valeurs de focales<sup>14</sup> sont données en pixels et connaissant la taille d'un pixel, on peut déduire les valeurs moyennes en millimètres :

$$\begin{cases} f_{Camera1} = 4.47 \text{ mm} \\ f_{Camera2} = 4.40 \text{ mm} \end{cases}$$

Sachant que les données du constructeur indiquent une focale minimale de l'ordre de 4.3mm, on peut dire que les valeurs trouvées sont convenables.

Pour le point principal, on veut vérifier que ce dernier se situe à proximité du centre du capteur. Sachant que la résolution est de 3840 x 2160 pixels, les valeurs calculées semblent aussi adéquates.

Concernant les distorsions, on peut vérifier que les valeurs des distorsions tangentielles ( $p1, p2$ ) sont négligeables par rapport aux distorsions radiales ( $k1, k2, k3$ ). Cependant, le signe de  $k1$  est négatif, ce qui est étrange car les distorsions apparentes (visibles sur la première image de la Figure 5.14) semblent être de type *barrel* (Figure 5.15).



**Figure 5.15 : Différents types de distorsion géométrique (adapté de OpenCV (2015))**

Dans les fichiers résultats des Tableau 5.1 et Tableau 5.2, *Rms* signifie *Root mean square* et réfère à la racine carrée de l'erreur moyenne quadratique entre les valeurs vraies des nœuds (*corners*) de la mire et les valeurs reprojétées. Un *Rms* global inférieur au pixel a été obtenu

---

<sup>14</sup> Deux composantes suivant x et y. Pour la suite des traitements, étant donné la différence négligeable des composantes, nous avons considéré la valeur moyenne pour définir  $f$ .

pour chaque caméra et les *Rms* ont été analysés sur chaque image afin d'obtenir le meilleur fichier de calibration possible.

Bien qu'il reste encore des problèmes sur quelques paramètres, les fichiers d'orientation intérieure obtenus semblent bien représenter les systèmes imageurs, nous les avons conservés pour effectuer la suite des calculs, c'est-à-dire la correction des distorsions géométriques des images et l'utilisation en tant que données d'entrée au calcul d'orientation relative.

## 5.2.2 Orientation extérieure

Les premiers tests ont montré que cette technique est très dépendante de la base stéréoscopique reliant les deux caméras mais aussi de la distance avec l'objet à modéliser. Ainsi, afin de définir au mieux les limites de notre système, des tests ont été réalisés dans des environnements plus ou moins contrôlés. Les descriptions de ces endroits sont disponibles au paragraphe 3.4. Les résultats sont ici présentés de manière indépendante pour chaque site.

### 5.2.2.1 Laboratoire de métrologie :

Les 19 premiers couples stéréoscopiques ont été acquis de manière à avoir des visées orthogonales à la partie droite du mur de calibration. Le dernier couple est un cas convergent dont les visées couvrent les deux murs, il a pour but de mettre en place le cas le plus complexe dans ce genre d'environnement et de tester la performance de l'algorithme.

La première étape de l'orientation extérieure concerne l'orientation relative. Le Tableau 5.6 résume les valeurs des paramètres d'orientation obtenus pour les 20 couples stéréoscopiques testés. Dans la colonne « Nombre de points », les valeurs en bleu signifient que l'appariement des points a été fait manuellement, soit en raison d'un nombre trop faible de points détectés par *SIFT*, soit par l'obtention de meilleurs résultats après l'ensemble des calculs effectués. Les valeurs en rouge mettent en évidence les *RMSE* (colonnes  $m_{q\varphi_1}, m_{q\kappa_1}, m_{q\omega_2}, m_{q\varphi_2}, m_{q\kappa_2}$ ) et les valeurs d'angles élevées<sup>15</sup>. Ainsi, la détermination des paramètres est de moins en moins fiable avec l'augmentation de la base et la diminution du rapport  $B/D$ .

---

<sup>15</sup> Uniquement comparables pour les 19 premiers couples car les visées sont parallèles.

**Tableau 5.6 : Valeurs des paramètres d'orientation relative avec les *RMSE* associées pour les 20 couples stéréoscopiques testés**

N°	Base (m)	Distance (m)	Rapport B/D	Nombre de points	$\phi 1$ (°)	$m_{q\phi 1}$ (°)	$\kappa 1$ (°)	$m_{q\kappa 1}$ (°)	$\omega 2$ (°)	$m_{q\omega 2}$ (°)	$\phi 2$ (°)	$m_{q\phi 2}$ (°)	$\kappa 2$ (°)	$m_{q\kappa 2}$ (°)
1	1	1	1,00	6	-2,525	0,285	0,431	0,326	1,979	0,309	-2,074	0,343	0,044	0,328
2	1	2	0,50	6	-1,830	0,027	0,434	0,151	2,136	0,064	-0,762	0,029	0,141	0,150
3	1	3	0,33	987	-1,594	0,011	0,469	0,046	1,803	0,016	-2,173	0,011	0,010	0,047
4	1	5	0,20	1690	-3,672	0,013	0,522	0,079	1,676	0,014	-2,834	0,014	-0,009	0,080
5	1	10	0,10	777	-6,378	0,085	0,634	0,300	2,078	0,029	-5,731	0,069	0,426	0,306
6	1	15	0,07	197	-4,984	0,276	1,533	0,375	1,928	0,036	-5,949	0,633	1,623	0,403
7	2	2	1,00	6	-6,747	0,016	0,226	0,033	2,062	0,031	-6,173	0,024	0,289	0,036
8	2	3	0,67	102	-0,365	0,202	0,896	0,157	1,817	0,111	-2,418	0,093	0,320	0,158
9	2	5	0,40	958	-3,385	0,010	0,554	0,050	1,554	0,020	-3,121	0,013	0,126	0,051
10	2	10	0,20	880	-4,392	0,039	-0,263	0,180	2,078	0,039	-4,885	0,038	-0,763	0,184
11	2	15	0,13	529	-3,135	0,095	0,163	0,241	1,589	0,036	-4,159	0,089	0,187	0,244
12	2	20	0,10	431	-4,465	0,195	0,221	1,141	2,267	0,114	-4,481	0,269	-0,159	1,153
13	2	30	0,07	12	-78,955	0,051	-105,103	0,721	155,098	0,165	-101,605	0,098	47,102	0,591
14	3	3	1,00	6	-0,164	0,015	0,683	0,023	1,366	0,021	-1,772	0,016	0,339	0,023
15	3	5	0,60	619	-2,702	0,014	0,721	0,044	1,959	0,025	-1,609	0,013	-0,050	0,046
16	3	10	0,30	771	-3,232	0,034	0,131	0,150	2,724	0,042	-1,925	0,029	-0,183	0,154
17	3	15	0,20	250	-1,146	0,451	-2,055	1,160	1,224	0,238	-1,430	0,180	-2,565	1,200
18	3	20	0,15	74	-4,876	0,927	1,317	0,349	2,417	0,068	-0,153	1,213	0,719	0,568
19	3	30	0,10	50	1,616	1,170	-23,909	0,058	0,304	0,002	3,377	0,345	-24,161	0,038
20	CONVERGENT			6	5,684	0,134	0,821	0,175	-0,904	0,033	-23,076	0,109	0,388	0,197

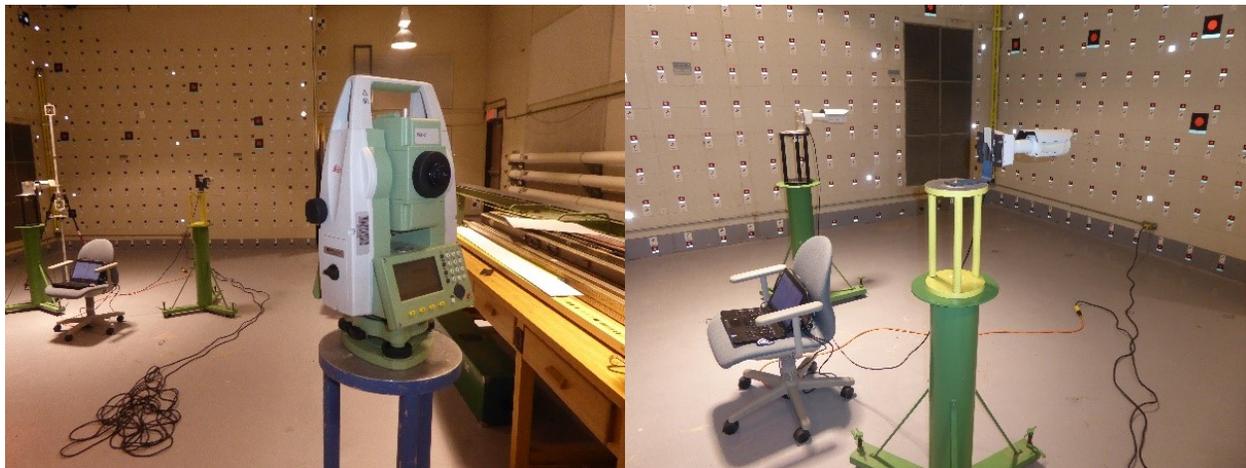
Aussi, nous avons à notre disposition une station totale<sup>16</sup> (Figure 5.16). Cette station a permis de pouvoir calculer le plus précisément possible la base stéréoscopique et la distance par rapport au mur de calibration. Les valeurs du rapport *B/D* obtenues avec la station totale ont été comparées à celles calculées par photogrammétrie (paragraphe 4.3.3). Le Tableau 5.7 expose les résultats obtenus. Ce tableau confirme la tendance précédente, les incertitudes relatives<sup>17</sup> de plus de 10% sont visibles pour des rapports inférieurs à 0.15, une exception est observée pour un rapport égal à 0.5. Le rapport n'a pas été déterminé dans le cas convergent avec la station totale car l'objet d'intérêt n'était pas situé à une distance fixe de la base : observation des deux parties du mur.

<sup>16</sup> *Leica TS 06*, spécifications disponibles en annexe VIII.

<sup>17</sup> 
$$\text{Incertitude relative} = \left| \frac{\text{Valeur}_{\text{station totale}} - \text{Valeur}_{\text{photos}}}{\text{Valeur}_{\text{station totale}}} \right|$$

**Tableau 5.7 : Comparaison des valeurs B/D obtenues par photogrammétrie et avec une station totale**

N°	Base (m)	Distance (m)	Rapport B/D théorique	Rapport B/D Photos	Rapport B/D Station totale	Incertitude relative (%)
1	1	1	1,00	0,995	1,067	6,7
2	1	2	0,50	0,417	0,475	12,2
3	1	3	0,33	0,307	0,339	9,5
4	1	5	0,20	0,184	0,202	8,8
5	1	10	0,10	0,102	0,102	0,5
6	1	15	0,07	0,074	0,067	11,2
7	2	2	1,00	0,942	1,017	7,4
8	2	3	0,67	0,635	0,672	5,5
9	2	5	0,40	0,380	0,405	6,3
10	2	10	0,20	0,197	0,202	2,5
11	2	15	0,13	0,130	0,134	2,6
12	2	20	0,10	0,098	0,099	1,7
13	2	30	0,07	0,017	0,065	73,7
14	3	3	1,00	0,940	1,010	6,9
15	3	5	0,60	0,577	0,608	5,2
16	3	10	0,30	0,291	0,303	3,9
17	3	15	0,20	0,191	0,200	4,8
18	3	20	0,15	0,208	0,150	38,3
19	3	30	0,10	0,147	0,100	47,5
20	CONVERGENT			0,573	NaN	NaN



**Figure 5.16 : Tests réalisés au laboratoire de métrologie de l'Université Laval**

Pour l'orientation absolue, le Tableau 5.8 résume les paramètres déterminés pour chaque couple en tenant compte seulement de 3 points d'appui pour le calcul (configuration minimale) répartis au mieux sur les photos. La convergence du calcul n'a pas pu être atteinte pour les couples 1 et 13 : on peut remarquer que les deux couples ont des valeurs d'orientation relative peu fiables, on peut en déduire que les coordonnées « modèle » déterminées ne sont pas assez cohérentes pour pouvoir subir l'orientation absolue. Les valeurs élevées pour les *RMSE* (colonnes  $m q_m, m q_\omega, m q_\phi, m q_\kappa, m q_{T_x}, m q_{T_y}, m q_{T_z}$ ) du couple 3 peuvent s'expliquer par une erreur de pointé, celles du couple 20 peuvent provenir du caractère convergent du couple (paragraphe 5.3.3). La valeur aberrante pour  $\omega$  avec le couple 19 peut s'expliquer par la propagation d'erreurs issues de l'orientation relative (valeurs de  $\kappa_1$  et  $\kappa_2$  très faibles).

**Tableau 5.8 : Résultats de l'orientation absolue pour les 20 couples stéréoscopiques testés**

N°	Base (m)	Distance (m)	Rapport B/D	m	$m q_m$	$\omega$ (°)	$m q_\omega$ (°)	$\phi$ (°)	$m q_\phi$ (°)	$\kappa$ (°)	$m q_\kappa$ (°)	$T_x$ (m)	$m q_{T_x}$ (m)	$T_y$ (m)	$m q_{T_y}$ (m)	$T_z$ (m)	$m q_{T_z}$ (m)
1	1	1	1,00	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
2	1	2	0,50	0,989	0	0,193	0,004	86,449	0	12,315	0,000	1,868	0,001	-2,107	0,001	1,398	0,001
3	1	3	0,33	0,996	0,002	-0,440	0,029	86,734	0,005	-	0,001	1,870	0,006	-2,968	0,012	1,396	0,006
4	1	5	0,20	0,995	0,000	-0,113	0,002	87,317	0,001	1,716	0,000	1,943	0,001	-4,967	0,001	1,409	0,001
5	1	10	0,10	1,055	0,000	-3,054	0,005	85,623	0,001	-	0,000	2,157	0,002	-9,993	0,003	1,524	0,002
6	1	15	0,07	1,093	0,000	-4,199	0,003	86,507	0,001	-6,743	0,000	2,235	0,001	-	0,001	1,562	0,001
7	2	2	1,00	2,012	0,001	-3,289	0,011	86,223	0,003	0,959	0,000	1,867	0,002	-2,107	0,003	1,414	0,002
8	2	3	0,67	1,984	0,001	-0,506	0,008	87,008	0,002	8,598	0,000	1,849	0,002	-2,994	0,002	1,393	0,002
9	2	5	0,40	1,993	0,000	-0,415	0,002	87,221	0,001	4,245	0,000	1,944	0,001	-4,967	0,001	1,395	0,001
10	2	10	0,20	2,010	0,000	-0,703	0,001	87,330	0,000	-0,964	0,000	2,131	0,000	-9,960	0,000	1,322	0,000
11	2	15	0,13	1,966	0,000	-1,024	0,002	87,330	0,000	-	0,000	2,276	0,001	-	0,001	1,234	0,001
12	2	20	0,10	1,957	0,000	-0,840	0,002	87,049	0,000	-	0,000	2,454	0,001	-	0,001	1,118	0,001
13	2	30	0,07	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
14	3	3	1,00	2,986	0,001	1,395	0,010	86,999	0,002	-9,507	0,000	1,837	0,002	-2,991	0,004	1,390	0,002
15	3	5	0,60	2,972	0,000	-0,388	0,001	87,523	0,000	-7,459	0,000	1,957	0,000	-4,980	0,001	1,396	0,000
16	3	10	0,30	2,991	0,000	-0,958	0,001	87,098	0,000	0,492	0,000	2,127	0,000	-9,975	0,000	1,359	0,000
17	3	15	0,20	2,879	0,000	4,167	0,003	87,442	0,001	7,845	0,000	2,213	0,001	-	0,001	1,268	0,001
18	3	20	0,15	4,104	0,000	-1,491	0,003	84,597	0,001	-	0,000	1,340	0,001	-	0,002	1,997	0,001
19	3	30	0,10	3,898	0,000	40,203	0,001	82,244	0,000	36,450	0,000	1,753	0,000	-	0,000	0,511	0,000
20	CONVERGENT			2,602	0,001	197,131	0,015	-161,242	0,006	-	0,006	-	0,002	-	0,002	-	0,002

Une autre vérification consiste à comparer la base calculée avec la station totale et celle calculée par photogrammétrie, le Tableau 5.9 affiche cette comparaison. Comme précédemment, on remarque que les incertitudes les plus importantes interviennent pour des rapports inférieurs à 0.15.

**Tableau 5.9 : Comparaison des valeurs de base B obtenues par photogrammétrie et avec une station totale**

N°	Base théorique (m)	Distance (m)	Rapport B/D théorique	Base Photos (m)	Base Station totale (m)	Incertitude relative (%)
1	1	1	1,00	NaN	NaN	NaN
2	1	2	0,50	0,989	0,991	0,2
3	1	3	0,33	0,996	1,009	1,2
4	1	5	0,20	0,995	1,001	0,5
5	1	10	0,10	1,055	1,014	4,0
6	1	15	0,07	1,093	0,999	9,4
7	2	2	1,00	2,012	2,059	2,3
8	2	3	0,67	1,984	1,997	0,6
9	2	5	0,40	1,993	2,003	0,5
10	2	10	0,20	2,010	2,009	0,1
11	2	15	0,13	1,966	2,003	1,8
12	2	20	0,10	1,957	1,981	1,5
13	2	30	0,07	NaN	NaN	NaN
14	3	3	1,00	2,986	3,005	0,6
15	3	5	0,60	2,972	3,001	1,0
16	3	10	0,30	2,991	3,013	0,7
17	3	15	0,20	2,879	2,999	4,0
18	3	20	0,15	4,104	2,997	36,9
19	3	30	0,10	3,898	2,996	30,1
20	CONVERGENT			2,602	2,683	3,0

Avec les couples dont l'orientation extérieure a réussi, nous avons utilisé un ensemble de points de contrôle et avons calculé les résidus entre les valeurs calculées et les valeurs réelles. Aussi, sachant que ces points sont situés à une distance semblable de la base, les *RMSE* et les biais suivant les trois axes du repère local (paragraphe 3.4.2) ont été définis avec les équations suivantes :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n}} \quad (36)$$

$$BIAIS = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n} \quad (37)$$

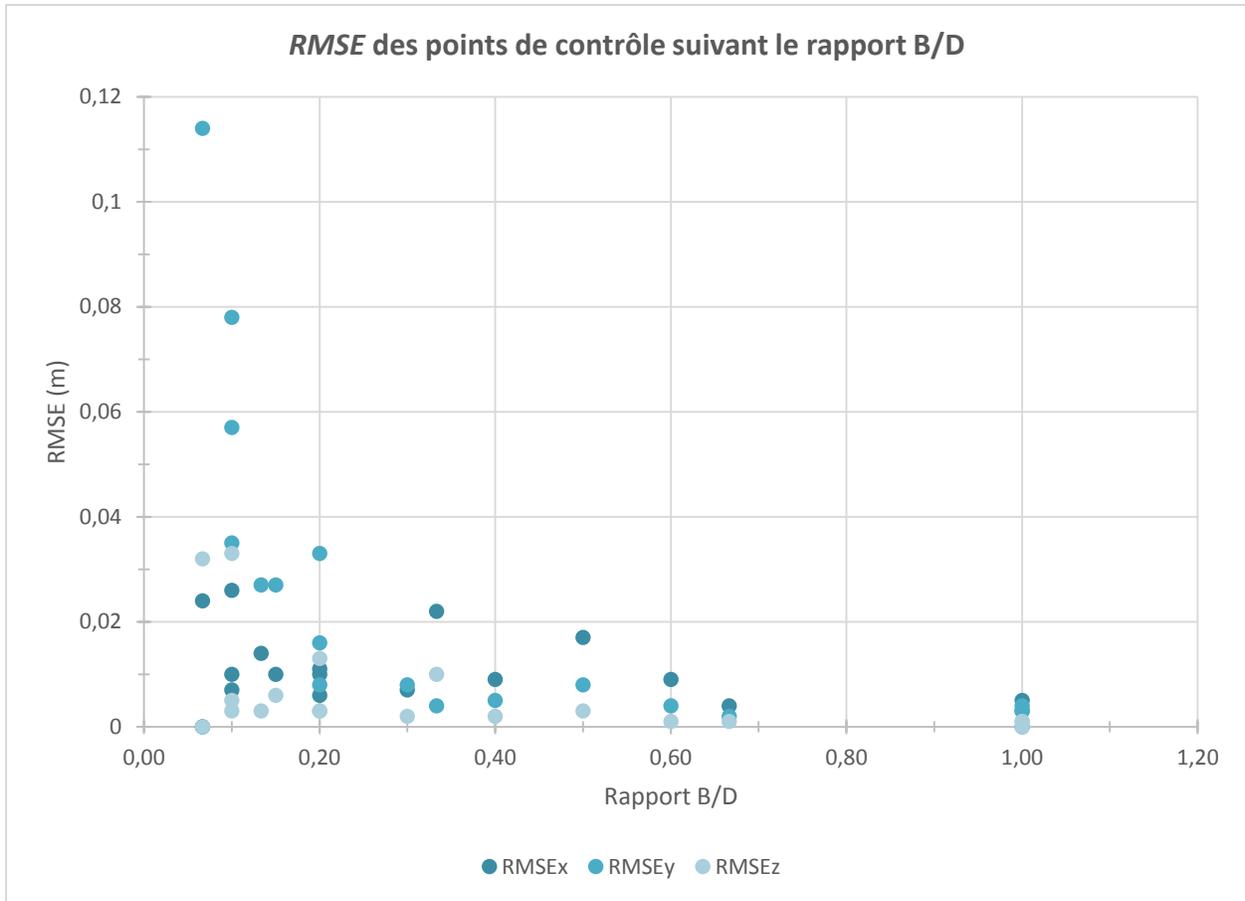
Avec :

- $v$ , les résidus selon la composante étudiée.
- $n$ , le nombre de points.

Le Tableau 5.10 montre que les valeurs obtenues pour le cas convergent sont très élevées, ceci peut s'expliquer par la définition des contraintes de l'équation (16) : les valeurs approchées définies pour la première itération du calcul d'orientation relative sont fausses car les visées ne sont pas parallèles. Des pistes de résolution sont données au paragraphe 5.3.3. La Figure 5.17 et la Figure 5.18 permettent de mieux visualiser les résultats (sauf ceux des couples 1, 13 et 20 non indiqués) du Tableau 5.10.

**Tableau 5.10 : Valeurs des RMSE et biais avec les données de contrôle.**

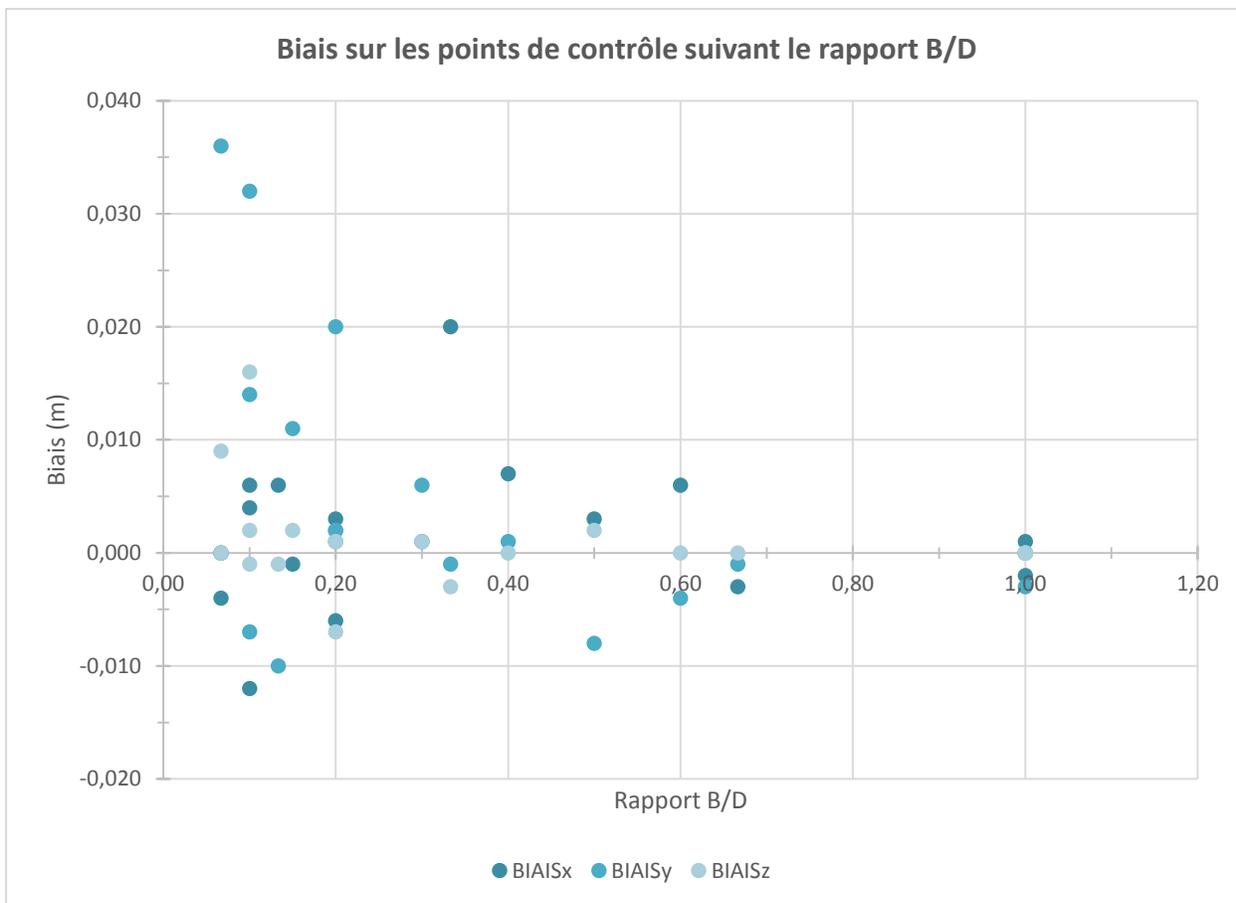
N°	Base (m)	Distance (m)	Rapport B/D	Nombre de points	RMSE <sub>x</sub> (m)	RMSE <sub>y</sub> (m)	RMSE <sub>z</sub> (m)	BIAIS <sub>x</sub> (m)	BIAIS <sub>y</sub> (m)	BIAIS <sub>z</sub> (m)
1	1	1	1,00	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
2	1	2	0,50	10	0,017	0,008	0,003	0,003	-0,008	0,002
3	1	3	0,33	10	0,022	0,004	0,010	0,020	-0,001	-0,003
4	1	5	0,20	10	0,011	0,008	0,003	0,003	0,002	0,001
5	1	10	0,10	10	0,026	0,078	0,033	-0,012	0,032	0,016
6	1	15	0,07	10	0,024	0,114	0,032	-0,004	0,036	0,009
7	2	2	1,00	10	0,003	0,003	0,001	0,001	0,000	0,000
8	2	3	0,67	10	0,004	0,002	0,001	-0,003	-0,001	0,000
9	2	5	0,40	10	0,009	0,005	0,002	0,007	0,001	0,000
10	2	10	0,20	10	0,01	0,033	0,013	-0,006	0,020	-0,007
11	2	15	0,13	10	0,014	0,027	0,003	0,006	-0,010	-0,001
12	2	20	0,10	10	0,007	0,035	0,003	0,004	0,014	-0,001
13	2	30	0,07	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
14	3	3	1,00	10	0,005	0,004	0,001	-0,002	-0,003	0,000
15	3	5	0,60	10	0,009	0,004	0,001	0,006	-0,004	0,000
16	3	10	0,30	10	0,007	0,008	0,002	0,001	0,006	0,001
17	3	15	0,20	10	0,006	0,016	0,003	0,001	0,002	0,001
18	3	20	0,15	10	0,01	0,027	0,006	-0,001	0,011	0,002
19	3	30	0,10	10	0,01	0,057	0,005	0,006	-0,007	0,002
20	CONVERGENT			10	1,247	0,761	1,031	-0,539	0,326	-0,417



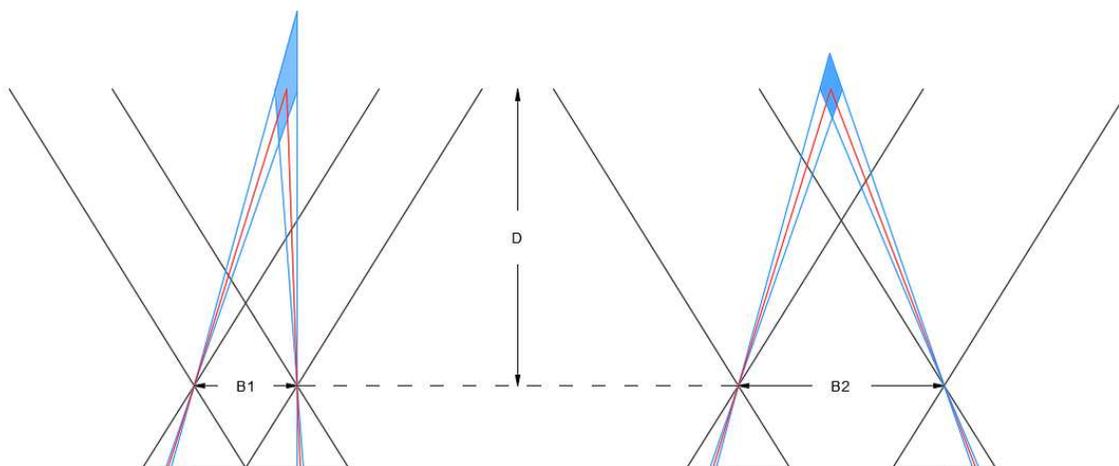
**Figure 5.17 : *RMSE* des points de contrôle suivant le rapport *B/D***

La Figure 5.17 montre que les valeurs de *RMSE* sont les plus faibles lorsque le rapport *B/D* tend vers 1. Les *RMSE* les plus importantes sont estimées suivant l'axe Y, soit l'axe de la profondeur d'acquisition (Figure 5.19) : sachant que les visées d'intersection arrivent perpendiculairement sur le plan défini par les composantes X et Z mais que l'angle d'approche est plus faible selon Y (les visées devenant rasantes pour un rapport *B/D* faible), les résultats obtenus sont cohérents.

Aussi, quelle que soit la configuration utilisée, les *RMSE* sont inférieures à 12 cm. Les observations par imagerie radar satellitaire de Tanguy (2016) s'appuient sur un modèle numérique de terrain de 1 m de résolution planimétrique et de 15 cm de précision altimétrique pour l'estimation du niveau d'eau. Ainsi, en milieu contrôlé, la photogrammétrie permet d'obtenir des erreurs sur le niveau d'eau et son étendue inférieures à celles obtenues par imagerie satellitaires.



**Figure 5.18 : Biais sur les points de contrôle suivant le rapport B/D**



**Figure 5.19 : Incertitude (symbolisée en bleu) sur la profondeur suivant le rapport B/D ( $B1/D < B2/D$ )**

La Figure 5.18 illustre le biais sur les points de contrôle tel que défini avec l'équation (37). Le biais est faible lorsque le rapport  $B/D$  tend vers 1 et les valeurs n'excèdent pas 4 cm. Ce dernier n'étant pas nul, le calcul n'est pas entièrement dépourvu d'erreurs systématiques<sup>18</sup>.

Concernant l'orientation absolue, nous avons effectué le calcul en déterminant les sept paramètres tels que présentés précédemment, mais aussi en fixant la valeur du facteur d'échelle grâce aux mesures effectuées avec la station totale<sup>19</sup>. Les *RMSE* obtenues lors de la reprojection des coordonnées étant systématiquement supérieures lors du calcul d'orientation absolue à six paramètres, nous en avons conclu qu'il valait mieux effectuer la compensation des paramètres avec la manière dite « classique ».

### 5.2.2.2 Terrasse de l'INRS :

Concernant la terrasse de l'INRS, nous avons acquis des couples stéréoscopiques sur toute la largeur possible, avec des bases de 1 m, 2 m, 3 m, 4 m, 5 m, et 6.5 m.

Les résultats de l'orientation relative de chacun des couples sont exposés au Tableau 5.11.

**Tableau 5.11 : Résultats de l'orientation relative pour les couples stéréoscopiques acquis depuis la terrasse de l'INRS**

N°	Base (m)	Nombre de points	$\phi 1$ (°)	$m_{q\phi 1}$ (°)	$\kappa 1$ (°)	$m_{q\kappa 1}$ (°)	$\omega 2$ (°)	$m_{q\omega 2}$ (°)	$\phi 2$ (°)	$m_{q\phi 2}$ (°)	$\kappa 2$ (°)	$m_{q\kappa 2}$ (°)
1	1	2895	-2,339	0,333	-1,764	0,110	0,107	0,003	-3,264	0,326	-1,643	0,109
2	2	615	0,580	0,621	-2,479	0,250	0,143	0,005	0,844	0,595	-1,874	0,249
3	3	399	-8,894	1,665	-3,001	0,183	-0,501	0,007	-7,185	1,674	-2,478	0,152
4	4	173	-2,619	1,469	2,387	0,761	0,058	0,024	-2,381	1,704	1,960	0,814
5	5	10	-5,917	0,726	0,899	0,166	0,368	0,013	-5,901	0,612	1,438	0,162
6	6,5	90	-1,362	0,172	0,543	1,597	-0,027	0,020	-0,817	0,160	-1,016	1,214

On peut constater que les *RMSE* (colonnes  $m_{q\phi 1}$ ,  $m_{q\kappa 1}$ ,  $m_{q\omega 2}$ ,  $m_{q\phi 2}$ ,  $m_{q\kappa 2}$ ) pour les couples 3 à 6 sont assez élevées. Ceci peut provenir de plusieurs facteurs :

- le nombre de points homologues est plus important pour les deux premiers couples (dû à la base réduite et donc au fort recouvrement entre les deux clichés), cela entraîne des

<sup>18</sup> En général,  $RMSE = \sqrt{BIAIS^2 + \sigma^2}$  avec  $\sigma$  l'écart-type. En l'absence de systématisme,  $RMSE = \sigma$ .

<sup>19</sup> Avec les contraintes de l'équation (16), le facteur d'échelle est égal à la base stéréoscopique  $B$ .

observations supplémentaires dans le calcul de compensation et permet de le rendre plus robuste (Figure 5.20).

- La position des points homologues sur les photos : en comparant la répartition spatiale des points, on peut s'apercevoir que l'algorithme *SIFT* a généré des résultats plus localisés avec les bases les plus grandes, ceci fragilise donc le calcul (Figure 5.20).
- Pour le couple 5, le pointé manuel des points homologues peut expliquer le phénomène observé.



**Figure 5.20 : Points homologues détectés pour une base de 1m (haut) et une base de 4m (bas).**

De ces six couples, le calcul de l'orientation absolue a pu être effectué pour seulement quatre, le calcul d'orientation relative n'étant pas assez robuste pour les deux restants. Les résultats obtenus sont fournis au Tableau 5.12.

**Tableau 5.12: Résultats de l'orientation absolue**

N°	Base (m)	Nombre de points	m	mq <sub>m</sub>	ω (°)	mq <sub>ω</sub> (°)	φ (°)	mq <sub>φ</sub> (°)	κ (°)	mq <sub>κ</sub> (°)	T <sub>x</sub> (m)	mq <sub>T<sub>x</sub></sub> (m)	T <sub>y</sub> (m)	mq <sub>T<sub>y</sub></sub> (m)	T <sub>z</sub> (m)	mq <sub>T<sub>z</sub></sub> (m)
1	1	3	1,117	0,000	42,994	0,000	6,302	0,000	-135,631	0,000	330264,476	1261,765	5186735,016	1133,182	20,147	4458,857
2	2	3	1,903	0,000	46,387	0,000	10,341	0,000	-128,937	0,000	330263,956	2215,829	5186733,576	1985,254	19,722	8366,639
3	3	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
4	4	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
5	5	10	5,153	0,000	-51,205	0,000	-69,179	0,000	-62,976	0,000	330234,550	2682,905	5186706,423	2580,892	12,481	7600,990
6	6,5	3	6,557	0,000	-347,803	0,000	-381,539	0,000	-41,646	0,000	330268,059	208,066	5186729,844	148,549	19,572	224,855

Les *RMSE* liés aux paramètres de rotation sont nuls alors que les *RMSE* liés aux paramètres de translation sont importants. Ceci peut s'expliquer par le fait que la transformation des coordonnées fait intervenir des vecteurs translations très importants, de l'ordre de 300000 m en X et 5000000 m en Y.

Lors de l'acquisition des clichés, nous n'avions à notre disposition qu'un ruban métrique pour déterminer la grandeur de la base, le Tableau 5.13 met en évidence que l'incertitude relative entre les deux types de mesure est inférieure à 10%.

**Tableau 5.13 : Comparaison de la base calculée par photogrammétrie et déterminée au ruban métrique**

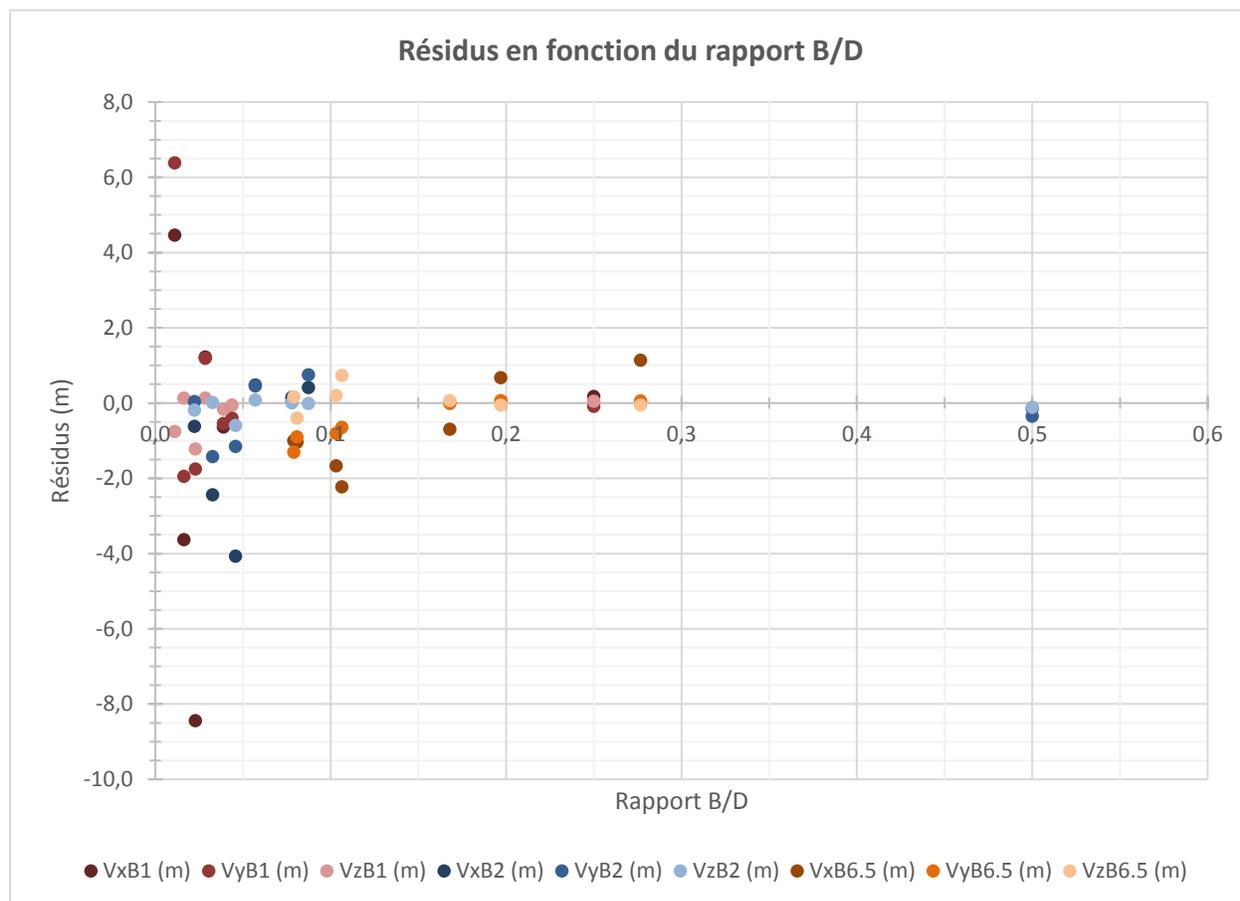
N°	Base théorique (m)	Base Photos (m)	Base Ruban métrique (m)	Incertitude relative
1	1	1,117	1,048	0,07
2	2	1,903	2,022	0,06
3	3	NaN	2,919	NaN
4	4	NaN	4,020	NaN
5	5	5,153	5,036	0,02
6	6,5	6,557	6,045	0,08

Enfin, des points d'appui de contrôle ont été utilisés pour déterminer les résidus à l'issue du calcul d'orientation. Cependant, les points reprojetés sont situés à des distances différentes les uns des autres par rapport au couple stéréoscopique considéré. Ainsi, le calcul des *RMSE* et des biais n'a pas été effectué, l'analyse s'est limitée aux résidus  $v$  présentés au Tableau 5.14. Les valeurs en rouge indiquent les résidus dont la norme est supérieure à 1 m. La majorité des résidus pour une base égale à 5 m sont supérieurs à 1 m. L'utilisation des mêmes points sélectionnés manuellement pour les deux étapes de l'orientation extérieure peut expliquer cette tendance. En analysant les résidus sur les autres couples stéréoscopiques, une augmentation générale dans toutes les composantes avec la distance est constatée. Cette observation est cohérente car plus la distance augmente, plus la taille des pixels augmente et il est d'autant plus difficile d'effectuer des pointés précis pour les points d'appui à partir de chaque image du couple stéréoscopique. Il en résulte des erreurs en profondeur importantes pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres compte tenu de l'installation qui sont concordantes avec les erreurs à priori calculées au paragraphe 3.2.3.

**Tableau 5.14 : Résidus obtenus sur les données de contrôle pour les tests effectués sur la terrasse de l'INRS**

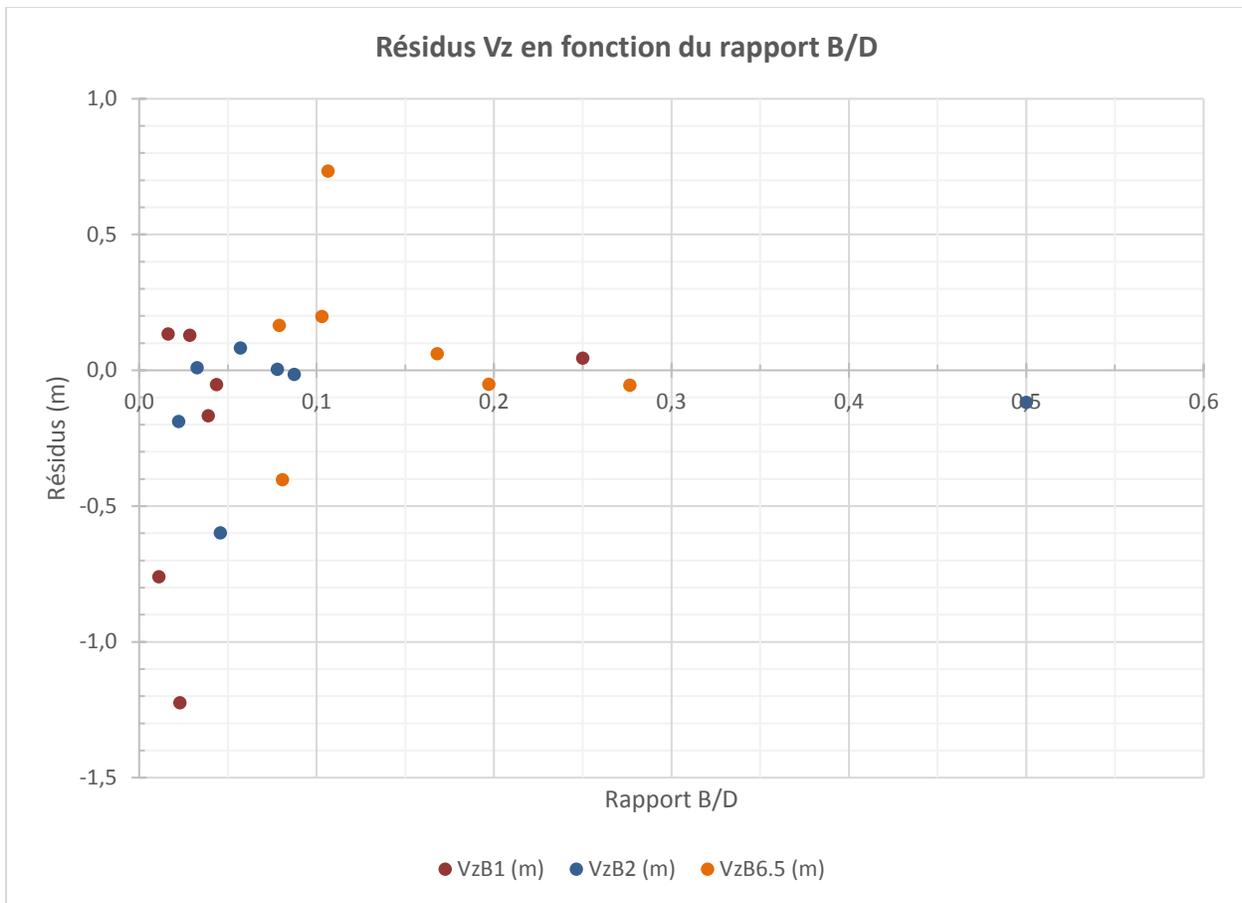
Points	Base (m)	Distance (m)	Rapport B/D	Vx (m)	Vy (m)	Vz (m)
A035	1	4,0	0,250	0,173	-0,088	0,044
A020	1	22,9	0,044	-0,059	-0,402	-0,053
A022	1	25,7	0,039	-0,642	-0,547	-0,167
S002	1	35,1	0,028	1,219	1,186	0,129
S010	1	43,7	0,023	-8,447	-1,751	-1,224
A019	1	61,1	0,016	-3,633	-1,953	0,134
A003	1	89,8	0,011	4,458	6,383	-0,760
A015	1	102,6	0,010	3,286	3,476	-0,112
A028	1	128,6	0,008	-26,325	-10,404	-0,539
A025	1	230,6	0,004	-81,891	-29,135	0,078
A035	2	4,0	0,500	-0,149	-0,355	-0,118
A020	2	22,9	0,087	0,411	0,749	-0,015
A022	2	25,7	0,078	0,149	0,028	0,004
S002	2	35,1	0,057	0,476	0,454	0,082
S010	2	43,7	0,046	-4,073	-1,157	-0,599
A019	2	61,1	0,033	-2,437	-1,426	0,009
A003	2	89,8	0,022	-0,618	0,040	-0,188
A015	2	102,6	0,019	-2,024	-1,802	-0,082
A028	2	128,6	0,016	-21,806	-8,938	-0,252
A025	2	230,6	0,009	-180,374	-65,736	0,460
A035	5	4,0	1,250	-28,000	-30,903	-2,842
A020	5	22,9	0,218	-39,237	-11,065	0,691
A022	5	25,7	0,195	-32,538	-22,502	7,220
S010	5	43,7	0,114	-17,880	-51,051	16,920
A019	5	61,1	0,082	-33,606	-25,565	0,152
A002	5	78,2	0,064	-68,713	37,886	-9,539
A003	5	89,8	0,056	-69,047	35,437	-19,379
A015	5	102,6	0,049	-60,227	22,724	-0,252
A028	5	128,6	0,039	-26,802	-52,257	20,812
A025	5	230,6	0,022	-30,968	-97,034	36,185
A021	6,5	23,5	0,277	1,138	0,053	-0,055
S003	6,5	33,0	0,197	0,673	0,061	-0,051
S007	6,5	38,7	0,168	-0,697	-0,015	0,061
A019	6,5	61,1	0,106	-2,227	-0,650	0,734
S005	6,5	63,1	0,103	-1,669	-0,808	0,198
A012	6,5	80,5	0,081	-1,046	-0,898	-0,403
A001	6,5	82,4	0,079	-0,998	-1,310	0,165
A015	6,5	102,6	0,063	-4,081	-2,602	0,535
A028	6,5	128,6	0,051	-17,445	-4,083	1,771
A030	6,5	155,7	0,042	-42,612	-5,511	3,557

Aussi, afin de comparer au mieux les résultats, les résidus ont été regroupés sous la forme d'un graphe (Figure 5.21) en fonction du rapport  $B/D$  et en prenant soin d'exclure les observations situées au-delà de 100 m, car elles ne peuvent pas atteindre la précision souhaitée avec un pointé manuel.



**Figure 5.21 : Résidus en fonction du rapport B/D**

Ainsi, comme pour les observations au Laboratoire de métrologie de l'Université Laval, plus le rapport  $B/D$  augmente, plus les résidus sont faibles. Il est à noter que les résidus selon l'axe Z, celui relatif au niveau d'eau, sont largement inférieurs à ceux obtenus selon les axes X et Y. De plus, les résultats présentés à la Figure 5.21 confirment qu'une valeur  $B/D$  supérieure à 0.1 permettrait l'obtention de résidus raisonnables dans le cadre du projet GARI, c'est-à-dire des résidus inférieurs à 1 m pour les composantes planimétriques et inférieurs à 10 cm pour la composante altimétrique (Figure 5.22).



**Figure 5.22 : Résidus Vz en fonction du rapport B/D**

Enfin, les valeurs aberrantes persistantes dans la Figure 5.21 et la Figure 5.22 sont le résultat des erreurs d'acquisition des points d'appui à la station totale (utilisation du rayon laser, visées rasantes, objets cylindriques...).

### 5.2.2.3 Traverse Québec-Lévis :

Des tentatives d'orientation extérieure ont été réalisées avec le couple stéréoscopique installé à la traverse, mais aucune d'elles n'a permis d'obtenir une solution convergente pour le calcul d'orientation absolue. Ceci s'explique principalement par le fait que tous les points d'appuis sont situés à une distance minimale de 60 m de l'infrastructure d'accroche et que la base est égale à 1 m, soit un rapport  $B/D$  maximal de l'ordre de 0.017, insuffisant pour effectuer des mesures précises.

## **5.3 Suggestions d'améliorations**

### **5.3.1 Extraction de la ligne d'eau**

Afin de créer automatiquement des sites d'entraînement plus adaptés à la taille finale des classes, une fonction d'ajustement automatique de la taille de la zone tampon pourrait être créée suivant différentes variables : intervalle d'acquisition entre deux séquences, distance moyenne avec la ligne d'eau...

Lors de l'étape de classification, un seuil assez rudimentaire pour créer les classes finales a été choisi, à savoir qu'un pixel ayant été affecté plus de cinq fois à la classe « Eau » lors des simulations est attribué en définitive à cette classe. En modifiant ce seuil par la création de deux seuils spécifiques à chaque classe, une troisième classe de pixels non affectés à l'eau ou au reste de l'image pourrait être créée puis étudiée plus spécifiquement afin d'améliorer l'extraction de la ligne d'eau.

Concernant les données acquises durant la nuit, les caméras que nous avons à disposition sont limitées, tant au niveau de l'information spectrale qu'au niveau des distorsions géométriques et chromatiques. Lors de la recherche de caméras au début de la maîtrise, nous n'avons pas trouvé de caméras pouvant répondre simultanément à l'ensemble des exigences du projet. Il serait donc préférable d'investir davantage de ressources monétaires pour acquérir des modèles plus performants ayant une gamme spectrale plus large tout en conservant les principales caractéristiques géométriques permettant d'avoir des *GSD* faibles (cf. paragraphe 3.2.3). Aussi, comme mentionné au paragraphe 5.1, les toiles d'araignées peuvent occasionner des changements importants sur l'enregistrement, il convient donc d'inspecter régulièrement la qualité des images afin d'entretenir plus efficacement les capteurs.

### **5.3.2 Recherche de la ligne d'eau sur une autre image**

L'algorithme mis en place actuellement manque de rapidité car l'espace de recherche des pixels par corrélation est constitué par l'entièreté de l'image. L'utilisation de la géométrie épipolaire et des droites qui en découlent pourrait être un axe de développement permettant la recherche plus efficace des points homologues (Zhang *et al.*, 1995).

### 5.3.3 Géoréférencement de la ligne d'eau

- Orientation intérieure

Pour améliorer les résultats de l'orientation intérieure, une acquisition de données sans que l'opérateur n'ait un contact direct avec le damier ou la caméra est envisageable. Cela permettrait de s'assurer de l'immobilisme des éléments afin de ne pas faire de clichés flous.

- Orientation extérieure

Lors de l'orientation relative, c'est le descripteur *SIFT* qui a été retenu afin de détecter automatiquement les points homologues, mais il existe d'autres descripteurs (Schaeffer, 2013) qui pourraient être utilisés à la place ou en parallèle de celui-ci. Aussi, le calcul d'orientation relative n'est pas efficace lorsque les prises de vues sont convergentes en raison des contraintes imposées par l'équation (16). Généralement dans le cas convergent, les valeurs des paramètres issues du calcul sont utilisées comme données approchées pour la réalisation d'un calcul en bloc (cf. paragraphe 2.3.3). Une autre solution consiste à estimer les paramètres d'orientation relative à l'aide d'un relèvement spatial (Luhmann *et al.*, 2013).

Concernant l'orientation absolue, un script permettant de calculer automatiquement des valeurs approchées des paramètres avant calcul (Dewitt, 1996) pourrait être créé. Cette automatisation pourrait notamment éviter l'estimation d'incertitudes importantes pour les paramètres de translation. Aussi, la majorité des calculs a été effectuée en configuration minimale avec trois points d'appui seulement, l'ajout de points d'appui supplémentaires permettrait d'obtenir un nuage de points plus robuste. Un poids aux observations inversement proportionnel à la distance lors du calcul de compensation pourrait aussi être ajouté afin de tenir en compte de la précision du pointé sur chaque image.

### 5.3.4 Tâches à effectuer pour la mise en place complète d'un système de surveillance opérationnel à Saint-Jean-sur-Richelieu

#### ➤ Travaux à réaliser sur le territoire de la ville

Comme indiqué précédemment, le site au sud est inexploitable compte tenu des visées actuelles des caméras. Ces dernières pourraient être modifiées en baissant l'inclinaison (tout en gardant le parallélisme des vues) afin de centrer les capteurs sur la ligne d'eau. La précision sur le niveau d'eau serait satisfaisante mais le champ de vision serait limité (une ou deux dizaines de mètres carrés au maximum), ce qui aurait un impact pour la détection de la ligne d'eau en période de crue. De plus, l'accès aux données étant restreint, nous conseillons l'arrêt de l'exploitation de ce site.

Pour le site central, le rapport  $B/D$  entre la base stéréoscopique et la distance approchée avec la ligne d'eau est de l'ordre de 0.02. Au paragraphe 5.2.2, nous avons pu mettre en évidence que ce rapport doit être supérieur à 0.1 afin d'obtenir des résultats satisfaisants. Ainsi, nous recommandons d'agrandir la base, à une distance de 5 m afin de remplir cette exigence. De plus les caméras sont actuellement fixées sur deux murs perpendiculaires de la bâtisse, nous suggérons de les accrocher sur une même structure immobile, elle-même maintenue au toit de l'édifice afin de pouvoir assurer le parallélisme des vues et de permettre un entretien facile et régulier.

Pour le site au nord, le rapport  $B/D$  est de l'ordre de 0.04, nous recommandons de redimensionner la base pour une longueur de 2.5 m en s'assurant que cette dernière et que le poteau d'accroche demeureront fixes malgré des conditions météorologiques extrêmes (impact du vent). De la même manière que pour les autres sites, il faut centrer les capteurs sur la ligne d'eau en maintenant le parallélisme des vues. Enfin, un moyen permettant d'augmenter la bande passante doit être trouvé.

Pour tous les sites d'exploitation (ceux en place et les futurs), un levé topographique de tous les détails (détectables simultanément sur les deux images des caméras) de la zone photographiée doit être effectué dans les systèmes de référence planimétrique et altimétrique identiques aux autres données de base du logiciel GARI actuellement mis en place. Le relevé des positions approchées des caméras doit aussi être effectué à des fins de validation.

### ➤ **Recommandations pour l'installation des nouveaux sites d'observation**

- Choisir des sites où la berge (artificielle ou naturelle) est bien visible (exemples de berge visible en vert et non visible en rouge sur la Figure 4.3).
- S'assurer que les sites choisis comportent une vingtaine de points de détails pouvant être géoréférencés à l'aide d'une station totale et détectables simultanément sur les deux images du couple de caméras à installer.
- Préférer une installation où la base stéréoscopique est approximativement parallèle avec la ligne d'eau.
- Effectuer l'installation en s'assurant d'un rapport  $B/D$  supérieur à 0.1.
- Pour l'orientation des caméras, centrer les capteurs sur la ligne d'eau avec des visées parallèles. Si les visées possèdent un angle d'environ 45 degrés sous l'horizon, les erreurs de géoréférencement de la ligne d'eau seront réparties au mieux entre les composantes planimétriques et altimétriques du système de référence considéré (équation (2), si  $i = 45^\circ$  alors  $H = D$  et  $GSD1 = GSD2$ ).
- Préférer les endroits éclairés de nuit afin d'obtenir un maximum d'information lors de l'acquisition des images nocturnes.
- S'assurer d'une bande passante élevée pour la transmission des données.

### ➤ **Travaux à réaliser sur le programme informatique**

Afin de rendre le système entièrement autonome après le traitement de la première séquence d'images, il faudrait :

- Perfectionner l'algorithme de mise en correspondance des deux images avec les suggestions évoquées au paragraphe 5.3.2.
- Traduire les algorithmes créés en Matlab dans le langage de programmation Python pour une plus grande accessibilité.
- Écrire un ou plusieurs scripts pour assurer l'interopérabilité entre les fonctions créées et le logiciel GARI, ainsi qu'à des fins d'exécution automatique du processus dès que l'enregistrement des données à une époque est réalisé.

La traduction des algorithmes dans le langage Python est fortement conseillée car Matlab R2017a ©, bien que très performant, est un logiciel payant. Il serait donc plus opportun de traduire ces scripts en Python qui possède des bibliothèques de fonctions de vision numérique étendues et qui a été utilisé comme principale plateforme pour le projet GARI.

## 5.4 De l'extraction du niveau d'eau au système GARI

Les données acquises par les caméras sont utiles car elles permettent d'estimer la montée des eaux visuellement et de déterminer le niveau d'eau (incertitude maximale de 10 cm) avec le processus développé dans le cadre de ce mémoire. Cette section explique comment le niveau d'eau permet d'obtenir des informations en temps réel sur une inondation.

Comme mentionné en introduction, GARI est composé d'un mode préparatoire et d'un mode opérationnel. Le mode préparatoire permet de calculer certaines caractéristiques indispensables au traitement opérationnel : il est notamment important d'établir au préalable la relation entre le niveau d'eau et le débit pour l'ensemble du territoire.

La fonction choisie pour représenter la courbe de tarage est de la forme (Poulin *et al.*, 2012) :

$$H = \alpha Q^\beta \quad (38)$$

Avec :

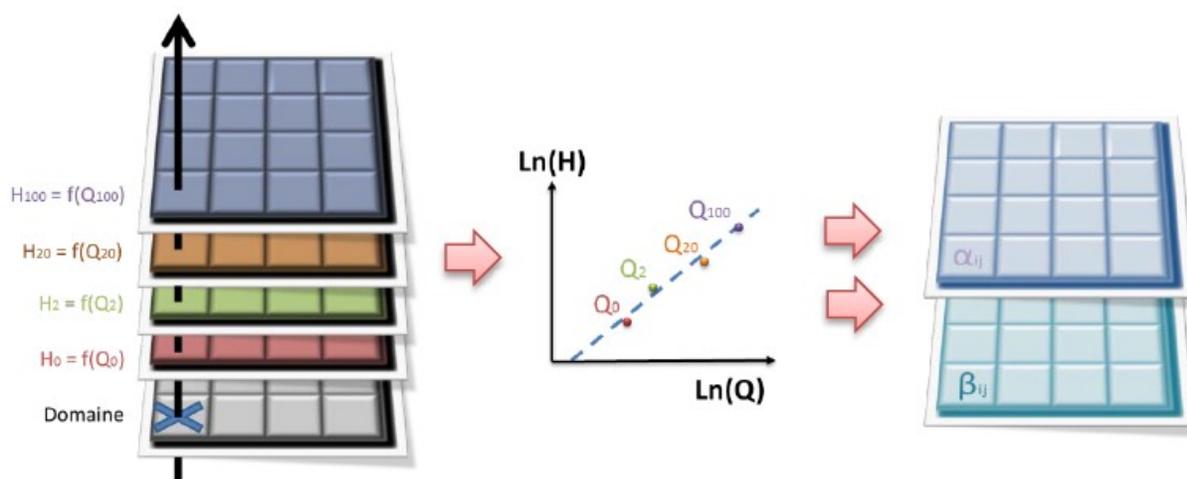
- $H$ , le niveau d'eau
- $Q$ , le débit associé au niveau d'eau
- $\alpha, \beta$ , les paramètres de régression non linéaires spécifiques au territoire d'élévation (niveau d'eau)  $H$  sur lequel  $Q$  est mesuré.

On souhaite donc déterminer les valeurs de  $\alpha$  et  $\beta$ .

Pour cela, la méthode s'appuie sur un modèle numérique de terrain, sur les limites de plaines inondables (de différentes périodes de récurrence) et sur les débits associés à chaque plaine. Ces données permettent l'établissement de surfaces d'eau sous forme de raster (cf. Poulin *et al.* (2012)) et la résolution spatiale du raster est directement dépendante du nombre de courbes de tarages à calculer : le nombre de pixels du raster étant égal au nombre de relations niveau-débit à établir.

Pour chaque pixel du raster considéré, on va obtenir plusieurs couples  $(H, Q)$  qui vont permettre de calculer les paramètres de régression  $\alpha$  et  $\beta$  (Figure 5.23). Ainsi, pour l'ensemble du territoire où les surfaces d'eau sont créées, il est désormais possible d'estimer le niveau d'eau à partir d'un débit donné et inversement.

D'autres données caractéristiques de la ville peuvent être extraites en mode préparatoire, elles sont détaillées dans les thèses de Tanguy (2016) et Oubennaceur (2017).

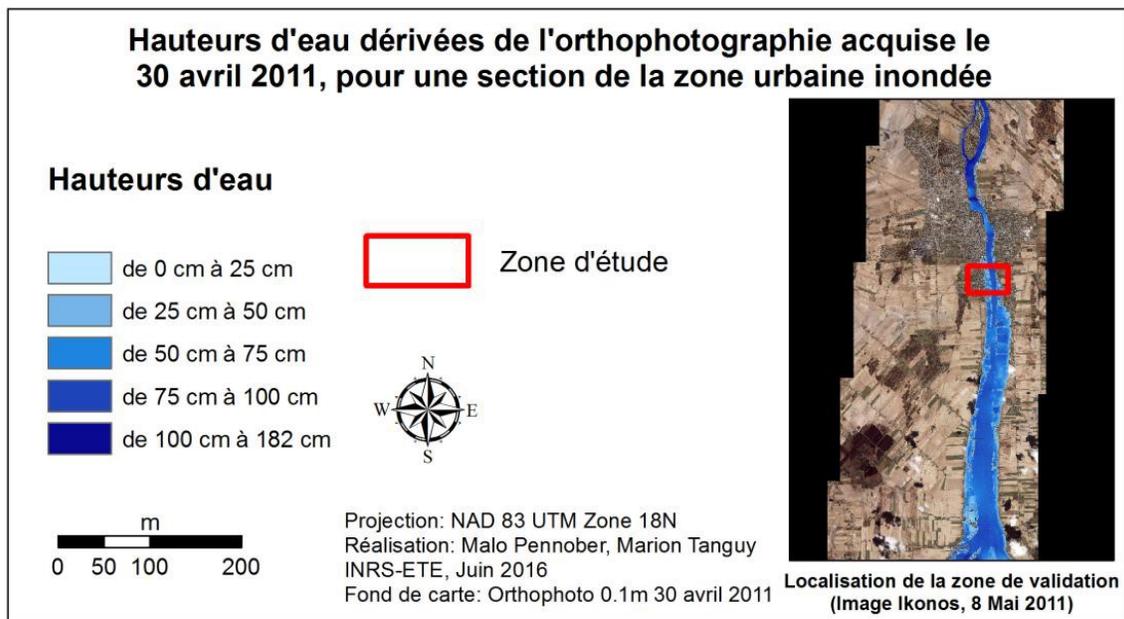
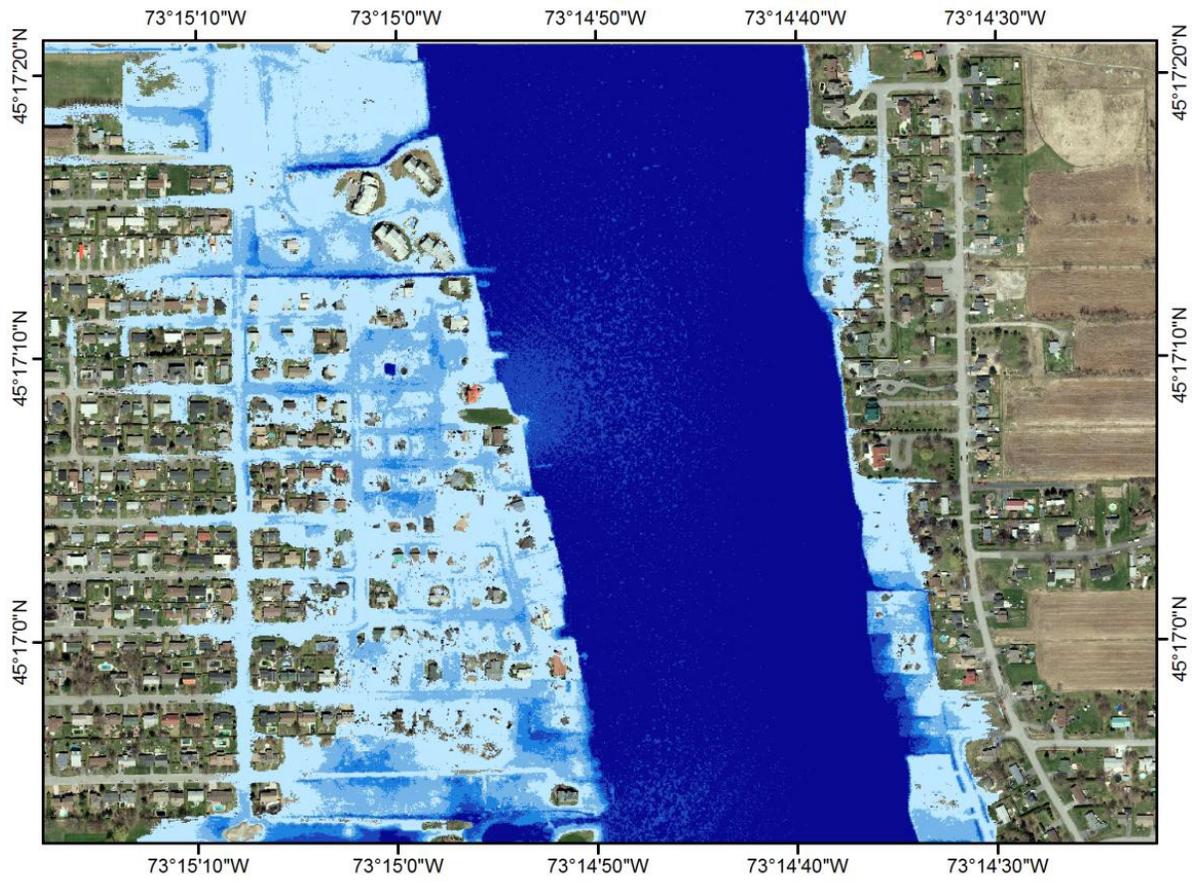


**Figure 5.23 : Établissement des paramètres de régression fonctionnelle  $\alpha$  et  $\beta$  (extraite de Poulin et al. (2012))**

Par conséquent, avec l'extraction de la ligne d'eau géoréférencée à partir des caméras, on peut déduire le débit par inversion de l'équation (38). Actuellement, la méthodologie qui a été mise en place consiste à estimer le niveau d'eau moyen pour chaque site en tenant compte de la position géographique moyenne observée. On obtient autant de valeurs de débits qu'il y a de sites et c'est le débit moyen qui est retenu afin d'estimer le niveau d'eau pour tous les pixels du territoire avec l'équation (38). Une autre solution pourrait être d'évaluer ce débit moyen en considérant toutes les observations et en effectuant un calcul de compensation par moindres carrés : l'avantage ici serait d'obtenir un écart-type relié à l'obtention du débit.

Une fois le niveau d'eau calculé sur le territoire, on déduit la hauteur d'eau<sup>20</sup> et des cartes de submersion peuvent être générées par soustraction du modèle numérique de terrain, un exemple extrait de Tanguy (2016) est donné avec la Figure 5.24. Par la suite, à l'aide des données de submersion générées et de données socio-économiques, on peut établir différentes cartes thématiques telles que développées par Tanguy (2016) permettant de caractériser au mieux l'inondation. La Figure 5.25 illustre la sévérité du risque humain causé par une inondation et la Figure 5.26 montre une carte de l'état des routes (inondées ou non).

<sup>20</sup> différence de dénivelée entre le niveau d'eau et la topographie dite aussi hauteur de submersion.



**Figure 5.24 : Exemple de carte de hauteurs d'eau, obtenue à l'aide d'une orthophoto acquise en 2011 à Saint-Jean-sur Richelieu (extraite de Tanguy (2016))**

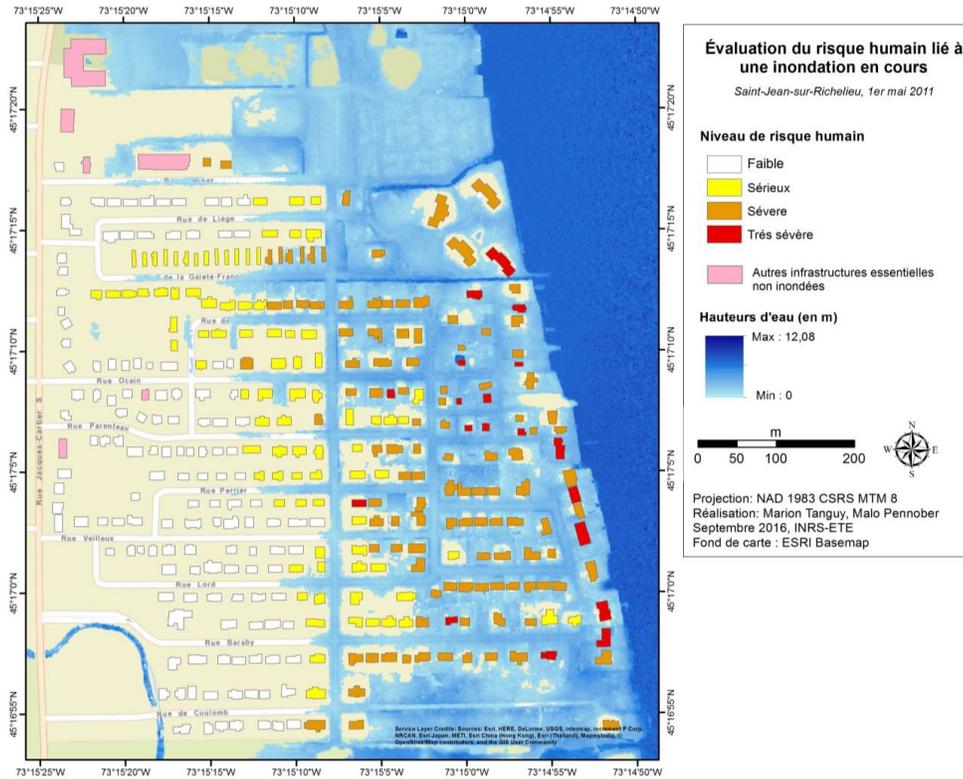


Figure 5.25 : Carte thématique du risque humain lié à une inondation (extraite de Tanguy (2016))

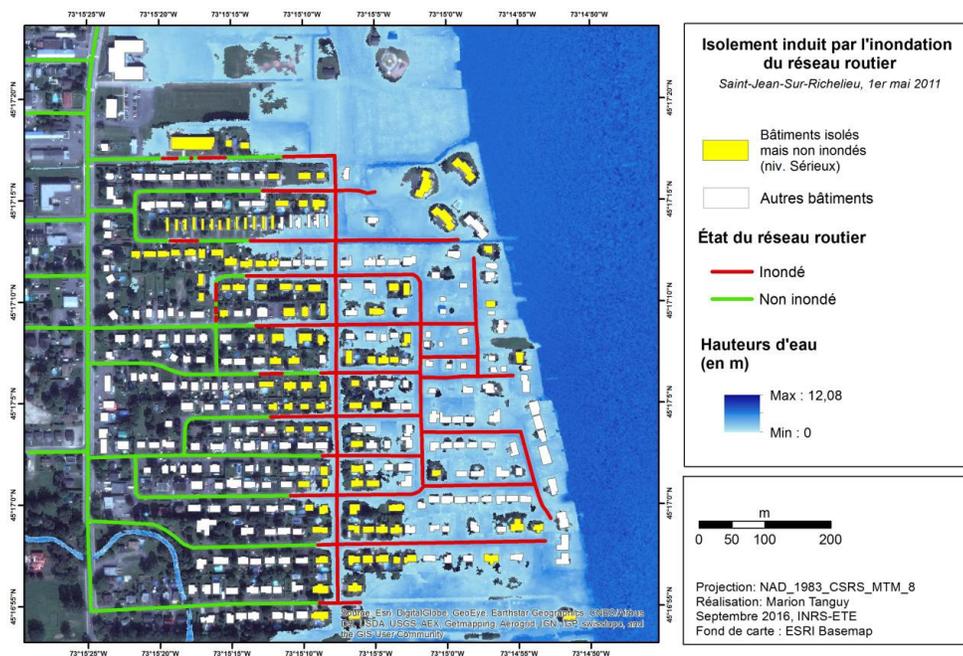


Figure 5.26 : État du réseau routier lié à une inondation (extraite de Tanguy (2016))

## 6 CONCLUSION

L'objectif de ce projet était de mettre en place un système de surveillance en temps réel par caméras de la rivière Richelieu à Saint-Jean-sur-Richelieu afin de déterminer le niveau d'eau et son étendue. Plus spécifiquement, le système devait répondre aux questions suivantes : Comment peut-on extraire automatiquement la ligne d'eau à partir de photographies (ou de vidéographies) indépendamment des conditions spécifiques à l'époque d'acquisition ? Alors que les observations sont effectuées dans un référentiel pixellique, comment peut-on transformer ces données dans un espace métrique géoréférencé ?

Pour le premier objectif, à savoir l'extraction de la ligne d'eau à partir de caméras, une approche de classification orientée objet a été mise en place. L'originalité du processus réside dans la réalisation de plusieurs simulations issues de différentes segmentations pour effectuer la classification à une époque particulière. L'analyse combinée des simulations permet de rendre la classification des parties inondées plus robuste vis-à-vis des conditions d'éclairément. L'intervention d'un opérateur est nécessaire au début de la méthode afin de définir la région d'intérêt et les sites d'entraînement pour la première séquence d'acquisition, le reste du calcul sur les séquences subséquentes est réalisé de manière autonome par le logiciel. Concernant la performance, nous avons pu constater que la ligne d'eau est généralement identifiée correctement de jour avec des taux d'extraction de l'ordre de 90 % mais il subsiste encore des cas particuliers où le rendement peut chuter à 30%. Cette faible performance s'explique dans notre cas par les propriétés du matériau de construction du quai observé et par la présence d'ombrages sur l'eau. Pour les séquences de nuit, les caméras achetées dans le contexte du projet GARI et utilisées dans le cadre de ce travail ne produisent pas d'information satisfaisante, elles n'ont pas été considérées dans ce mémoire.

Pour le second objectif, à savoir le géoréférencement de la ligne d'eau, la méthode mise en place consiste à modéliser le système imageur en étape préliminaire au calcul des paramètres permettant la conversion dans un système tridimensionnel. Pour cela, le processus nécessite l'utilisation simultanée de deux caméras observant la même scène avec des visées parallèles. La mise en correspondance des caméras entre elles (orientation relative) utilise la condition de coplanarité tandis qu'une transformation par similitude spatiale (orientation absolue) permet de mettre à l'échelle le système stéréoscopique et de le positionner dans un référentiel particulier. Compte tenu des caractéristiques du projet GARI et des tests effectués, nous recommandons que le rapport entre la longueur de la base stéréoscopique et la distance avec l'objet à

modéliser soit supérieur à 0.1. De ce fait, des valeurs de niveau d'eau avec des incertitudes inférieures à 10 cm seraient obtenues et la position planimétrique serait assurée avec une incertitude maximale de 1 m.

Compte tenu des différentes recommandations énoncées au paragraphe 5.3.4, du travail reste à effectuer pour rendre le système installé à Saint-Jean-sur-Richelieu totalement opérationnel.

Au site central, la distance entre les deux caméras devrait passer à 5 m afin d'obtenir un rapport  $B/D$  entre la base stéréoscopique et la distance approchée avec la ligne d'eau supérieur à 0.1. Les caméras devraient être accrochées sur une même structure immobile, elle-même maintenue au toit de l'édifice afin de pouvoir assurer le parallélisme des vues et de permettre un entretien facile. Pour le site au nord, la base stéréoscopique devrait être de 2.5 m en s'assurant que cette dernière et que le poteau d'accroche demeureront fixes malgré des conditions météorologiques extrêmes. Il faudrait centrer les capteurs des caméras sur la ligne d'eau en maintenant le parallélisme des vues. Pour le site au sud de la ville, nous conseillons l'arrêt de son exploitation. Pour tous les sites d'exploitation, un levé topographique de tous les détails détectables simultanément sur les deux images des caméras devrait être effectué dans les systèmes de référence planimétrique et altimétrique identiques aux autres données de l'outil GARI. Le relevé des positions approchées des caméras devrait aussi être effectué à des fins de validation. Quant au traitement des images, il faudrait perfectionner l'algorithme de mise en correspondance des deux images avec les suggestions évoquées au paragraphe 5.3.2 et s'assurer de l'interopérabilité entre les fonctions créées et le logiciel GARI.

Mis à part les photos acquises de nuit pour lesquelles l'information est très réduite avec les caméras actuelles, un système de surveillance par caméras semble être une solution adéquate afin d'obtenir de l'information qualitative et quantitative relative à l'évolution d'un épisode de crue. Ainsi, basées sur les résultats de notre étude, des recommandations précises pour l'installation physique de caméras dans de nouveaux sites sur la rivière Richelieu ou sur d'autres bassins versants ont été faites. Il faut toutefois s'assurer d'une bande passante élevée pour la transmission en temps réel d'images de haute qualité.

Enfin, l'avènement de l'intelligence artificielle dans le domaine de la vision par ordinateur pourrait permettre d'améliorer encore la reconnaissance de ligne d'eau et la mise en correspondance de points homologues tout en diminuant encore le temps de calcul nécessaire à l'extraction de la ligne d'eau. En ce qui a trait au volet photogrammétrique du projet, le géoréférencement par calcul en bloc serait une alternative à envisager afin de pouvoir rendre cette application plus universelle, avec l'utilisation possible de plus de deux caméras ayant des

visées parallèles ou convergentes. Outre les différentes améliorations qui peuvent être apportées au système existant, des pistes de réflexions concernant l'extraction d'autres informations à partir des caméras existent. L'utilisation de ces dernières pour l'extraction des vitesses de surface par *Large Scale Particle Image Velocimetry* pourrait permettre de comprendre les dynamiques de circulation d'eau locales sur la zone photographiée et d'anticiper l'arrivée d'évènements de crue. Aussi, peut-être qu'une analyse plus détaillée des vidéos pourrait permettre l'estimation de la vitesse et de l'orientation du vent, ces éléments ayant été déterminants lors des inondations d'avril 2011 de la rivière Richelieu.



## 7 REFERENCES

- Achanta R, Shaji A, Smith K, Lucchi A, Fua P & Süsstrunk S (2012) SLIC superpixels compared to state-of-the-art superpixel methods. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence* 34(11):2274-2282.
- Bouquet J-Y (2002) *Camera calibration tool-box for matlab*.  
[http://www.vision.caltech.edu/bouquetj/calib\\_doc/](http://www.vision.caltech.edu/bouquetj/calib_doc/) (Consulté le 28 juin 2018).
- Boulianne M (2015) *Photogrammétrie fondamentale GMT - 4000*. (Université Laval, département des sciences géomatiques).
- CIPA (2018) *3x3 rules*.  
[http://cipa.icomos.org/wp-content/uploads/2017/02/CIPA\\_3x3\\_rules\\_20131018.pdf](http://cipa.icomos.org/wp-content/uploads/2017/02/CIPA_3x3_rules_20131018.pdf)  
(Consulté le 22 mai 2018).
- Comaniciu D & Meer P (2002) Mean shift: A robust approach toward feature space analysis. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence* 24(5):603-619.
- Commissariat à l'Énergie Atomique (2016) *Calibrage de cameras, monoculaire et stereo*.  
[http://www.kalisteo.fr/fr/calibration\\_3d.htm](http://www.kalisteo.fr/fr/calibration_3d.htm) (Consulté le 28 juin 2018).
- Corripio JG (2004) Snow surface albedo estimation using terrestrial photography. *International Journal of Remote Sensing* 25(24):5705-5729.
- Daigle A, Berube F, Bergeron N & Matte P (2013) A methodology based on Particle image velocimetry for river ice velocity measurement. *Cold Regions Science and Technology* 89:36-47.
- Dewitt BA (1996) Initial approximations for the three-dimensional conformal coordinate transformation. *Photogrammetric engineering and remote sensing* 62(1):79-84.
- Direction de l'expertise hydrique du MDDELCC (2018) *Niveau d'eau et débit*.  
<https://www.cehq.gouv.qc.ca/hydrometrie/index.htm> (Consulté le 22 mai 2018).
- Environnement Canada (2018) *Données climatiques historiques*.  
<http://climat.meteo.gc.ca/> (Consulté le 22 mai 2018).
- EPFL (2018) *La mesure hydrologique*.  
<http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre7/chapitre7.html> (Consulté le 7 juin 2018).
- European Spatial Agency (2018) *Sentinel-1*.  
<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1> (Consulté le 12 juillet 2018).
- Fourquet G (2005) *Développement d'un système hydrométrique par analyses d'images numériques: évaluation d'une année de fonctionnement continu sur l'Isère à Saint Martin d'Hères*. (Grenoble, INPG).
- Fraden J (2004) *Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications*. Springer Science & Business Media.
- Gilmore TE, Birgand F & Chapman KW (2013) Source and magnitude of error in an inexpensive image-based water level measurement system. *Journal of hydrology* 496:178-186.
- Goldenberg G (2010) *Vidéosurveillance sans fil*. Forum Atena.

- Grussenmeyer P (2013) *Cours de photogrammétrie G4*. (INSA Strasbourg).
- Gupta R & Banerji S (1985) Monitoring of reservoir volume using LANDSAT data. *Journal of hydrology* 77(1-4):159-170.
- Hoonhout BM, Radermacher M, Baart F & van der Maaten LJP (2015) An automated method for semantic classification of regions in coastal images. *Coastal Engineering* 105:1-12.
- Hullo J-F (2010) Acquisition de nuages de points denses par photogrammétrie terrestre. Application à la mission d'archéologie de Kilwa, Arabie Saoudite. *Revue XYZ• N* 122(1er).
- Institut National de la Santé Publique du Québec (2018) *Les inondations*. <http://www.monclimatmasante.gc.ca/public/inondations.aspx> (Consulté le 22 mai 2018).
- Iwahashi M, Udomsiri S, Imai Y & Fukuma S (2006) Water level detection for river surveillance utilizing jp2k wavelet transform. *Circuits and Systems, 2006. APCCAS 2006. IEEE Asia Pacific Conference on*. IEEE, p 1741-1744.
- Jha AK, Bloch R & Lamond J (2012) *Cities and flooding: a guide to integrated urban flood risk management for the 21st century*. World Bank Publications.
- Koschitzki R, Schwalbe E & Maas HG (2014) An autonomous image based approach for detecting glacial lake outburst floods. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XL-5:337-342.
- Kröhnert M (2016) Automatic waterline extraction from smartphone images. *23rd International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences Congress, ISPRS 2016*. Remondino F, Rieke-Zapp D, Pavelka K, Hodac J, Shortis M, Halounova L, Rinaudo F, Boehm J, Safar V & Scaioni M (Édit.) International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, p 857-863.
- Ku HH (1966) Notes on the use of propagation of error formulas. *Journal of Research of the National Bureau of Standards* 70(4).
- Latapie R (2015) *Développement d'une approche automatisée pour rectifier verticalement des photos obliques et pour déterminer la présence de glace sur l'océan à proximité d'infrastructures maritimes*. (INSA de Strasbourg).
- Li Y, Sun J, Tang C-K & Shum H-Y (2004) Lazy snapping. *ACM Transactions on Graphics (ToG)*. ACM, p 303-308.
- Lowe DG (2004) Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International journal of computer vision* 60(2):91-110.
- Luhmann T, Robson S, Kyle S & Boehm J (2013) *Close-range photogrammetry and 3D imaging*. Walter de Gruyter.
- Maillard P & Calmant S (2013) Spatial processing techniques for satellite altimetry applications in continental hydrology. *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XV*. International Society for Optics and Photonics, p 88870W.
- MathWorks (2018) *normxcorr2*. <https://www.mathworks.com/help/images/ref/normxcorr2.html> (Consulté le 12 juillet 2018).
- McKenna SJ, Jabri S, Duric Z, Rosenfeld A & Wechsler H (2000) Tracking groups of people. *Computer vision and image understanding* 80(1):42-56.
- OpenCV (2015) *Camera Calibration*.

- [https://docs.opencv.org/3.1.0/dc/dbb/tutorial\\_py\\_calibration.html](https://docs.opencv.org/3.1.0/dc/dbb/tutorial_py_calibration.html) (Consulté le 28 juin 2018).
- Oubennaceur K (2017) *Analyse de l'incertitude dans la modélisation du risque d'inondation: étude de cas rivière Richelieu*. (Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique).
- Pattern Recognition and Image Processing Group (2015), [https://www.prip.tuwien.ac.at/research/image\\_pyramids.php](https://www.prip.tuwien.ac.at/research/image_pyramids.php) (Consulté le 28 juin 2018).
- Pongsiriyaporn B, Jariyavajee C, Laoharawee N, Narkthong N, Pitichat T & Goldin SE (2014) Flood Finder: Mobile-based automated water level estimation and mapping during floods. *8th International Symposium of the Digital Earth (Isde8)* 18:012128.
- Poulin J, Chokmani K, Tanguy M & Bernier M (2012) *Cartographie dynamique du risque d'inondations en milieu urbain*. INRS, Centre Eau, Terre et Environnement.
- Poux F, Hallot P, Jonlet B, Carré C & Billen R (2014) Segmentation semi-automatique pour le traitement de données 3D denses: application au patrimoine architectural. *XYZ: la Revue de l'Association Française de Topographie* 141(36):69-75.
- Publications Québec (2018) *Code Civil du Québec*. <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/ShowDoc/cs/CCQ-1991> (Consulté le 22 mai 2018).
- Sécurité Publique Québec (2017) *Inondations du Printemps 2017, Bilan + Perspectives*).
- Shi G, Xu X & Dai Y (2013) SIFT feature point matching based on improved RANSAC algorithm. *Intelligent human-machine systems and cybernetics (IHMSC), 2013 5th international conference on*. IEEE, p 474-477.
- Skulmoski GJ, Hartman FT & Krahn J (2007) The Delphi method for graduate research. *Journal of Information Technology Education: Research* 6:1-21.
- Tanguy M (2016) *Développement d'une méthode de caractérisation et d'évaluation du risque humain lié aux inondations en milieu urbain*. (Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique).
- TENEVIA S.A.S. (2012) Description de la solution d'hydrométrie par vidéo « TENEVIA RiverBoard® ». [www.tenevia.com](http://www.tenevia.com).
- The United Nations for Disaster Risk Reduction (2015) *The Human Cost of Weather Related Disasters*).
- Trimble eCognition © (2018), <http://www.ecognition.com/> (Consulté le 20 août 2018).
- Westoby MJ, Brasington J, Glasser NF, Hambrey MJ & Reynolds JM (2012) 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179:300-314.
- Wu Z, Xue Y, Li Y, Zhao L & Zhang L (2009) Analyse on Image Distortion Caused by Camera Tilting Angle in Mosaic Camera. in *ISPRS Archives* (Beijing, China), p 352-355.
- Zhang G, Xie H, Duan S, Tian M & Yi D (2011) Water level variation of Lake Qinghai from satellite and in situ measurements under climate change. *Journal of Applied Remote Sensing* 5(1):053532.
- Zhang Z, Deriche R, Faugeras O & Luong Q-T (1995) A robust technique for matching two uncalibrated images through the recovery of the unknown epipolar geometry. *Artificial intelligence* 78(1-2):87-119.



## **8 ANNEXES**

Les pages suivantes correspondent aux annexes I à VIII décrites dans le document.



**ANNEXE I :**  
**MODÈLES DE CAMÉRAS PRÉSÉLECTIONNÉS**

Constructeur	Avigilon	Avigilon	Avigilon	Avigilon	Avigilon	Avigilon	Avigilon	Axis	
Modèle	HD H3 5M	HD H4 5M	HD H4 4K	HD PRO 4K	HD PRO 5K	HD PRO 6K	HD PRO 7K	Q6128-E	
Type	Fixe	Fixe	Fixe	Fixe	Fixe	Fixe	Fixe	PTZ	
Focale minimale (mm)	3	4,3	4,3	16	16	24	24	3,9	
Angles de vision (°)	28 - 84	46 - 86	44 - 81	37 - 73	37 - 73	74	74	6 - 71	
Résolution (pixels)	2592 x 1944	2592 x 1944	3840 x 2160	3840 x 2160	4944 x 3280	6016 x 4008	6720 x 4488	3840 x 2160	
Zoom optique	3x	1,8x	1,8x	2,2x	2,2x	1x	1x	12x	
Taille capteur (mm)	4,6 x 3,4	6,2 x 4,7	6,0 x 3,4	23,6 x 13,4	23,6 x 13,4	35,9 x 23,9	35,9 x 22,0	6,2 x 4,6	
Température (°C)	- 40 à + 50	- 40 à + 55	- 40 à + 55	- 10 à + 50	- 10 à + 50	- 10 à + 50	- 10 à + 50	- 40 à + 70	
Capteur de nuit	Type	DEL	DEL	DEL	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Filtre
	Portée (m)	30	50	30	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	I min. (lux)	0	0	0	0,005	0,005	0,005	0,005	0,03
Poids (kg)	1,2	1,7	1,7	0,4	0,4	0,4	0,4	3,0	
Alimentation	DC (V)	12	12	12	12	12	12	12	n.d.
	AC (V)	24	24	24	24	24	24	24	n.d.
	Power over Ethernet	IEEE 802.3af, Classe 3	IEEE 802.3af, Classe 3	IEEE 802.3af, Classe 3	IEEE 802.3af, Classe 3	IEEE 802.3af, Classe 3	IEEE 802.3af, Classe 3	IEEE 802.3af, Classe 3	IEEE 802.3at Type 2 Classe 4
Consommation (W)	13 max.	13 max.	13 max.	13 max.	13 max.	13 max.	13 max.	25 max.	
Taille d'une image brute (Mo)	14	14	24	24	46	69	86	24	
Prix	≈ 640 \$	≈ 1200 \$	≈ 1500 \$	≈ 5300 \$	≈ 11000 \$	≈ 13000 \$	≈ 14000 \$	≈ 4000 \$	
Aperçu									

Constructeur		Axis	Axis	Axis	Bolin	Bosch	Hikvision
Modèle		Q3617-VE	P1428-E	P1427-LE	EX1022B4K	FLEXIDOME IP outdoor	DS2CD4A65FIZH
Type		PTRZ	Fixe	Fixe	PTZ	Fixe	Fixe
Focale minimale (mm)		4,1	3,3	2,8	6,5	3	2,8
Angles de vision (°)		46 - 101	35 - 109	27 - 92	3 - 58	27 - 87	30 - 95
Résolution (pixels)		3072 x 2048	3840 x 2160	2592 x 1944	3840 x 2160	2592 x 1944	3072 x 2048
Zoom optique		2,2x	3x	3,5x	22x	3,3x	4,3x
Taille capteur (mm)		7,2 x 5,3	5,8 x 4,4	< 5,8 x 4,4	7,6 x 5,7	< 5,8 x 4,4	7,2 x 5,3
Température (°C)		- 40 à + 60	- 30 à + 50	- 30 à + 50	- 40 à + 60	- 30 à + 50	- 40 à + 60
Capteur de nuit	Type	Filtre	Aucun	DEL	Laser	DEL	Filtre
	Portée (m)	n.d.	n.d.	15	500	15	50
	I min. (lux)	0,03	0,3	0	0,01	0	0
Poids (kg)		2,3	0,9	0,9	11,5	1,1	2,0
Alimentation	DC (V)	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	12	12
	AC (V)	n.d.	n.d.	n.d.	24	n.d.	n.d.
	Power over Ethernet	IEEE 802.3af/802.3at Type 1 Classe 3	IEEE 802.3af/802.3at Type 1 Classe 3	IEEE 802.3af/802.3at Type 1 Classe 3	n.d.	IEEE 802.3af/802.3at Type 1 Classe 2	IEEE 802.3at
Consommation (W)		12 max.	13 max.	13 max.	30 max.	7 max.	12 max.
Taille d'une image brute (Mo)		18	24	14	24	14	18
Prix		≈ 2500 \$	≈ 1500 \$	≈ 1000 \$	≈ 6500 \$	≈ 800 \$	≈ 1000 \$
Aperçu							

Constructeur	Hikvision	Hikvision	Hikvision	Panasonic	Panasonic	Samsung
Modèle	DS2CD4A85FIZH	DS2CD4565FIZH	DS2CD4585FIZH	WV-SPV781L	WV-SFV781L	SNV-8081R
Type	Fixe	Fixe	Fixe	Fixe	Fixe	Fixe
Focale minimale (mm)	2,8	2,8	2,8	4,2	4,2	3,6
Angles de vision (°)	35 - 107	30 - 95	35 - 107	18 - 101	17 - 100	39 - 104
Résolution (pixels)	3840 x 2160	3072 x 2048	3840 x 2160	4000 x 3000	4000 x 3000	2592 x 1944
Zoom optique	4,3x	4,3x	4,3x	6x	6x	2,6x
Taille capteur (mm)	7,6 x 5,7	7,2 x 5,3	7,6 x 5,7	7,6 x 5,7	7,6 x 5,7	7,2 x 5,3
Température (°C)	- 40 à + 60	- 40 à + 60	- 30 à + 60	- 45 à + 50	- 45 à + 50	- 40 à + 55
Capteur de nuit	Type	Filtre	Filtre	Filtre	DEL	DEL
	Portée (m)	50	50	40	30	30
	I min. (lux)	0	0	0	0	0
Poids (kg)	2,0	2,1	2,1	3,1	3,7	1,0
Alimentation	DC (V)	12	12	12	12	12
	AC (V)	n.d.	24	24	n.d.	n.d.
	Power over Ethernet	IEEE 802.3af	IEEE 802.3at	IEEE 802.3af/802.3at	IEEE 802.3af /48 DC	IEEE 802.3af /48 DC
Consommation (W)	15,5 max.	17,5 max.	17,5 max.	13 max.	13 max.	14 max.
Taille d'une image brute (Mo)	24	18	24	34	34	14
Prix	≈ 1300 \$	≈ 1000 \$	≈ 1300 \$	≈ 4000 \$	≈ 4000 \$	≈ 1400 \$
Aperçu						

Constructeur		Samsung	Storm	Storm
Modèle		SNO-8081R	INSBO4KIRF	INSDO4KIRF
Type		Fixe	Fixe	Fixe
Focale minimale (mm)		3,9	4	4
Angles de vision (°)		39 - 94	80	80
Résolution (pixels)		2592 x 1944	3840 x 2160	3840 x 2160
Zoom optique		2,4x	1x	1x
Taille capteur (mm)		7,2 x 5,3	6,2 x 4,7	6,2 x 4,7
Température (°C)		- 40 à + 55	- 30 à + 60	- 30 à + 60
Capteur de nuit	Type	DEL	DEL	DEL
	Portée (m)	30	30	20
	I min. (lux)	0	0	0
Poids (kg)		1,4	0,5	0,4
Alimentation	DC (V)	12	12	12
	AC (V)	24	n.d.	n.d.
	Power over Ethernet	IEEE 802.3af, Classe 3	IEEE 802.3af	IEEE 802.3af
Consommation (W)		14 max.	7,5 max.	7 max.
Taille d'une image brute (Mo)		14	24	24
Prix		≈ 1500 \$	≈ 1000 \$	≈ 1000 \$
Aperçu				



**ANNEXE II :**  
**CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DE LA CAMÉRA AVIGILON**  
**HDH4**

# Caméra Bullet HD H4 avec analyse vidéo par auto-apprentissage

AVIGILON

Avigilon propose la gamme de caméras haute définition la plus étendue du secteur (de 1 MP à 5 MP et de 4K à 7K en fonction de la résolution horizontale) ; celles-ci sont disponibles dans différents formats, notamment les caméras dôme, panoramiques et fixes. Qu'il s'agisse d'une vitrine ne nécessitant que quelques caméras ou d'un complexe gigantesque où de nombreuses zones sont à couvrir, vous pouvez être sûr de bénéficier de la solution la plus adaptée à vos besoins en termes de sécurité.

Notre caméra HD H4 innovante compte parmi les moyens dont Avigilon dispose pour offrir une surveillance et une protection efficaces.



La caméra Bullet HD H4 d'Avigilon est idéale pour repérer objets et activité dans le noir complet. Dotées de fonctions d'analyses vidéo par auto-apprentissage, les caméras HD H4 s'intègrent sans aucun problème au logiciel Avigilon Control Center (ACC)<sup>™</sup>, ce qui permet au personnel de sécurité de réagir de manière proactive et de prévenir tout incident afin d'éviter les dégâts. Grâce à la technologie infrarouge (IR) unique et adaptative, cette caméra fournit un éclairage large ou ciblé qui reste homogène dans le noir complet, et maximise la qualité d'image quelles que soient les conditions ambiantes. Les caméras Bullet d'Avigilon sont équipées d'une fonction U-WDR (gamme dynamique ultra étendue) triple exposition et de la technologie LightCatcher<sup>™</sup>, qui garantissent des images aux détails exceptionnels. Les capacités de stockage embarquées vous permettent de gérer directement le stockage sur la caméra au moyen d'une carte mémoire SD standard. La caméra Bullet est efficace pour la surveillance d'environnements variés requérant une couverture nocturne discrète, tels que les parkings, les campus et les sites industriels.

ASSISTANCE 1.888.281.5182 | sales@avigilon.com | avigilon.com

## PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES

1 à 5 mégapixels et résolution 4K Ultra HD (8 MP)

Technologies brevetées de détection vidéo avancée de formes et d'apprentissage par l'exemple

Analyse vidéo par auto-apprentissage

Technologie High Definition Stream Management (HDSM)<sup>™</sup> brevetée

Disponible avec des objectifs P-Iris 3-9 mm F1.3, 4,3-8 mm F1.8 ou 9-22 mm F1.6, avec zoom et mise au point à distance

Prise en charge de la configuration de caméra Wi-Fi

La technologie LightCatcher offre une qualité d'image exceptionnelle dans des environnements à faible éclairage.

Gamme dynamique ultra étendue triple exposition (modèles 1 à 3 mégapixels)

Des DEL infrarouge (IR) intégrées offrent un éclairage uniforme dans le noir, même à 0 lux, et ce jusqu'à une distance maximale de 70 m.

Les technologies adaptatives de zoom et de contenu confèrent un éclairage efficace à tous les niveaux d'agrandissement tout en préservant un éclairage optimal de la scène.

Modes de prédéfinition d'images préconfigurées en usine pour des performances d'image maximales dans diverses conditions d'éclairage.

Le mode de scène inactive réduit l'utilisation de bande passante et de l'espace de stockage si aucun mouvement n'est détecté dans la scène.

Assemblage résistant au vandalisme et conformité IP66

Conformité ONVIF avec la version 2.2.0 de la spécification d'analyse vidéo

Modes de fonctionnement des caméras Full Feature (Fonctionnalité complète) ou High Framerate (Fréquence d'images élevée) (modèle Ultra HD 4K)

# Spécifications

CAMÉRAS HD H4

		1,0 MP	2,0 MP	3,0 MP	5,0 MP	4K ULTRA HD (8 MP)	
<b>QUALITÉ D'IMAGE</b>	Capteur d'images	CMOS à analyse progressive 1/2,8 po			CMOS à analyse progressive 1/1,8 po	CMOS à analyse progressive 1/2,3 po	
	Format d'image	16:9			4:3	16:9	
	Pixels actifs (H x V)	1280 x 720	1920 x 1080	2048 x 1536	2592 x 1944	3 840 x 2 160	
	Zone d'imagerie (H x V)	4,8 mm x 2,7 mm (0,189 x 0,106 po)			5,12 mm x 3,84 mm (0,202 x 0,151 po)	6,22 mm x 4,66 mm (0,245 x 0,183 po)	
	Éclairage IR (DEL haute puissance 850 nm)	Objectif 3-9 mm :	Distance max. 50 m (164 pieds) à 0 lux ; 30 m (98 pieds) à -25 °C (-13 °F) ou moins			S.O.	S.O.
		Objectif 4,3-8 mm :	S.O.			Distance maximale de 50 m (164 pieds) à 0 lux ; 25 m (82 pieds) à -25 °C (-13 °F) ou moins	Distance maximale de 30 m (98 pieds) à 0 lux ; 15 m (49 pieds) à -25 °C (-13 °F) ou moins
		Objectif 9-22 mm :	Distance max. 70 m (230 pieds) à 0 lux ; 50 m (164 pieds) à -25 °C (-13 °F) ou moins			S.O.	S.O.
	Éclairage minimal	Objectif 3-9 mm :	0,04 lux (F1.3) en mode couleur ; 0 lux (F1.3) en mode monochrome avec IR			S.O.	S.O.
		Objectif 4,3-8 mm :	S.O.			0,033 lux (F1.8) en mode couleur ; 0 lux (F1.8) en mode monochrome avec IR	0,29 lux (F1.8) en mode couleur ; 0 lux (F1.8) en mode monochrome avec IR
		Objectif 9-22 mm :	0,08 lux (F1.6) en mode couleur ; 0 lux (F1.6) en mode monochrome avec IR			0,026 lux (F1.6) en mode couleur ; 0 lux (F1.6) en mode monochrome avec IR	S.O.
	Débit d'images (pleine résolution)	30 ips			30 ips (20 ips avec fonction WDR activée)	30 ips	20 ips (30 ips en mode Fréquence d'images élevée)
	Plage dynamique	67 dB			83 dB	91 dB	
	Gamme dynamique (fonction WDR activée)	120 dB triple exposition (20 ips ou moins) ; 100 dB double exposition (30 ips)			S.O.	S.O.	
Résolution	À partir de 768 x 432 pixels			À partir de 1792 x 1344 pixels		À partir de 3072 x 1728 pixels	
Mode de fonctionnement de la caméra	S.O.			Mode Full Feature (Fonctionnalité complète) ou High Framerate (Fréquence d'images élevée) (fonctions HDSM 2.0 et analyse désactivées en mode High Framerate)			
<b>OBJECTIF</b>	Objectif	Objectif 3-9 mm :	Zoom et mise au point à distance P-Iris, F1.3				
		Objectif 4,3-8 mm :	Zoom et mise au point à distance P-Iris, F1.8				
		Objectif 9-22 mm :	Zoom et mise au point à distance P-Iris, F1.6				
	Angle de vision	Objectif 3-9 mm :	30° – 91°		32° – 98°	S.O.	
Objectif 4,3-8 mm :		S.O.		S.O.	46° – 86°		
Objectif 9-22 mm :		14° – 29°		15° – 31°	18° – 41°		
<b>CONTRÔLE DE L'IMAGE</b>	Méthode de compression d'images	H.264 (MPEG-4 Partie 10/AVC), Motion JPEG					
	Flux	H.264 en flux multiples et compression Motion JPEG					
	Gestion de la bande passante	(1 à 3 MP) HDSM ; (5 MP et 4K Ultra HD) HDSM 2.0 ; (TOUT) Idle Scene Mode (Mode de scène inactive)					
	Détection de mouvements	Pixels et objets classifiés					
	Détection d'altération de la caméra	Oui					
	Commande d'obturateur électronique	Automatique, manuelle (1/6 à 1/8 000 secondes)					
	Commande de l'iris	Automatique, manuelle					
	Commande jour/nuit	Automatique, manuelle					
	Anti-scintillement	50 Hz, 60 Hz					
	Balance des blancs	Automatique, manuelle					
	Correction du contre-jour	Réglable					
	Zones privées	Jusqu'à 64 zones					
	Méthode de compression audio	G.711 PCM 8 kHz					
	Entrée/sortie audio	Entrée et sortie de niveau ligne					
	Bornes E/S externes	Entrée alarme, sortie alarme					
	Port USB	USB 2.0					
	<b>RÉSEAU</b>	Réseau	100Base-TX				
Type de câblage		CAT5					
Connecteur		RJ-45					
ONVIF		Conformité ONVIF avec les versions 1.02, 2.00, Profil S et 2.2.0 de la spécification d'analyse vidéo (les cadres et descriptions de scène ne sont pas disponibles avec des VMS tiers)					
Sécurité		Protection par mot de passe, cryptage HTTPS, authentification Digest, authentification WS, journal d'accès des utilisateurs, authentification basée sur le port 802.1x					
Protocole		IPv4, HTTP, HTTPS, SOAP, DNS, NTP, RTSP, RTCP, RTP, TCP, UDP, IGMP, ICMP, DHCP, Zeroconf, ARP					
Protocoles de diffusion en flux continu		RTP/UDP, RTP/UDP multidiffusion, RTP/RTSP/TCP, RTP/RTSP/HTTP/TCP, RTP/RTSP/HTTPS/TCP, HTTP					
Protocoles de gestion des appareils		SNMP v2c, SNMP v3					
<b>PHYSIQUE</b>		Dimensions (L x l x H)	126 mm x 280 mm x 91 mm ; 4,97 po x 11,04 po x 3,58 po (avec support de fixation)				
		Poids	Caméra :	1,71 kg (3,77 lbs)			
	Support de fixation :		0,21 kg (46 lbs)				
	Corps	Aluminium					
	Boîtier	Montage sur surface antivandalisme					
	Finition	Revêtement par pulvérisation, RAL 9003					
	Plage de réglage	±175° panoramique, ±90° inclinaison, ±175° azimut					
	Stockage embarqué	Logement SD/SDHC/SDXC – Classe 4 minimum ; classe 6 ou supérieure recommandée					
	<b>ÉLECTRICITÉ</b>	Consommation électrique	13 W				
		Source d'alimentation	VCC : 12 V +/- 10 %, 13 W min		VCA : 24 V +/- 10 %, 19 VA min	PoE : conforme à la norme IEEE802.3af, Classe 3	
Batterie de secours RTC		Lithium manganèse 3 V					
<b>ENVIRONNEMENT</b>	Température de fonctionnement	-40 °C à +55 °C (-40 °F à 131 °F) (8 MP uniquement) -35 °C à +50 °C (-31 °F to 122 °F)					
	Comportement de l'éclairageur IR	L'éclairageur IR ne s'allume pas si la température est égale ou supérieure à 45 °C (113 °F).					
	Température de stockage	-10 °C à +70 °C (14 °F à 158 °F)					
	Humidité	0 à 95 % sans condensation					

**CERTIFICATIONS**

Certifications/Directives	UL	cUL	CE	ROHS	DEEE	RCM	KC	EAC	
Sécurité	UL 60950-1		CSA 60950-1		IEC/EN 60950-1		IEC 62471		
Environnement	Classification pour les impacts IK10		UL/CSA/IEC/60950-22		IEC 60529, indice IP66				
Émissions électromagnétiques	FCC, section 15, sous-section B, classe B		IC ICES-003 Classe B		EN 55022 classe B	EN 61000-6-3	EN 61000-3-2	EN 61000-3-3	KN 32
Immunité électromagnétique	EN 55024				EN 61000-6-1	KN 35			

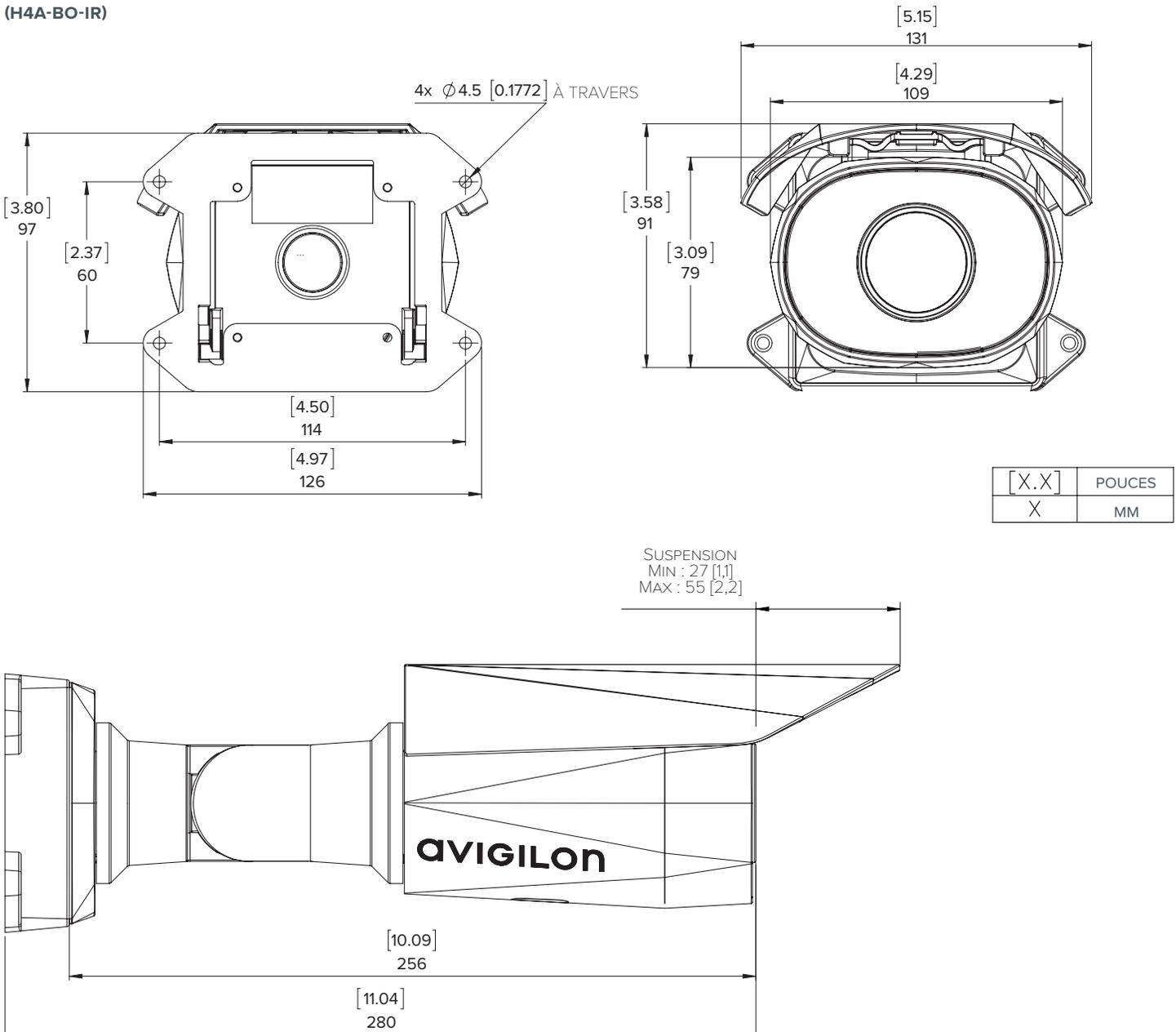
**ÉVÉNEMENTS D'ANALYSE VIDÉO PRIS EN CHARGE**

Présence d'objets dans la zone	Déclenchement d'un événement dès qu'il y a un mouvement du type d'objet sélectionné dans la zone d'intérêt. En cas d'objets en trop grand nombre, aucun nouvel événement n'est déclenché tant que le nombre d'objets est supérieur à la valeur définie.
Objets rôdeurs	Déclenchement d'un événement en cas de présence prolongée du type d'objet sélectionné dans la zone d'intérêt. L'événement est réinitialisé lorsque l'objet sort de la zone d'intérêt.
Objets franchissant un faisceau	Déclenchement d'un événement dès lors que la limite spécifiée a été atteinte concernant : le nombre d'objets ayant traversé le faisceau directionnel configuré au niveau du champ de vision de la caméra. Le faisceau peut être unidirectionnel ou bidirectionnel. En cas d'objets en trop grand nombre, aucun nouvel événement n'est déclenché avant expiration de l'événement actif.
Un objet apparaît ou entre dans la zone	L'événement est déclenché par chacun des objets qui pénètrent dans la zone d'intérêt. Cet événement peut être utilisé pour compter les objets.
Objet non présent dans la zone	L'événement est déclenché quand aucun objet n'est présent dans la zone d'intérêt.
Entrée d'objets dans la zone	Déclenchement d'un événement dès lors que la limite spécifiée a été atteinte concernant : le nombre d'objets pénétrant dans la zone d'intérêt.
Sortie d'objets de la zone	Déclenchement d'un événement dès lors que la limite spécifiée a été atteinte concernant : le nombre d'objets sortant de la zone d'intérêt.
Arrêt de l'objet dans la zone	Déclenchement d'un événement dès lors qu'un objet cesse tout mouvement au sein de la zone d'intérêt, et ce, à partir d'un seuil de durée spécifié.
Violation de direction	Déclenchement d'un événement dès qu'un objet suit une direction interdite.
Détection des effractions	Déclenchement d'un événement en cas de modification inattendue de la scène.

# Cotes hors tout

## Caméra Bullet

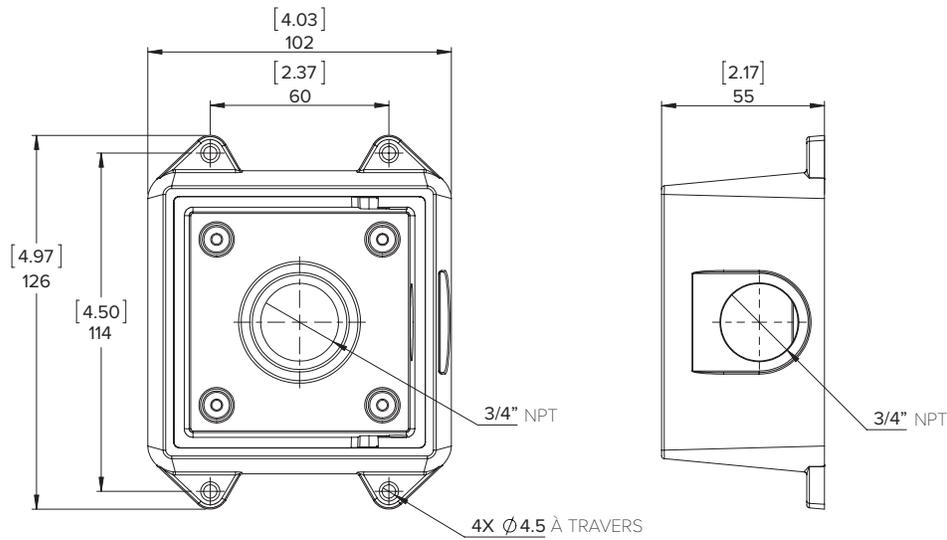
(H4A-BO-IR)



# Boîte de jonction pour caméra Bullet HD

(H4-BO-JBOX1)

CAMÉRAS HD H4



## Informations pour la commande

	MP	WDR (NIVEAU DE GAMME DYNAMIQUE)	LIGHTCATCHER	ANALYSE	OBJECTIF	IR
1.0C-H4A-BO1-IR	1,0	✓	✓	✓	3 - 9 mm	✓
1.0C-H4A-BO2-IR	1,0	✓	✓	✓	9 - 22 mm	✓
2.0C-H4A-BO1-IR	2,0	✓	✓	✓	3 - 9 mm	✓
2.0C-H4A-BO2-IR	2,0	✓	✓	✓	9 - 22 mm	✓
3.0C-H4A-BO1-IR	3,0	✓	✓	✓	3 - 9 mm	✓
3.0C-H4A-BO2-IR	3,0	✓	✓	✓	9 - 22 mm	✓
5.0L-H4A-BO1-IR	5,0		✓	✓	4,3 - 8 mm	✓
5.0L-H4A-BO2-IR	5,0		✓	✓	9 - 22 mm	✓
8.0-H4A-BO1-IR	8,0			✓	4,3 - 8 mm	✓

H4-BO-JBOX1	Boîte de jonction pour les caméras Bullet HD H4 H4A-BO-IR
H4-MT-POLE1	Support de fixation pour montage sur portant, en aluminium, pour caméras dôme H4 HD montées en suspension et caméras Bullet H4 HD
H4-MT-CRNR1	Support de fixation pour montage en angle, en aluminium, pour caméras dôme H4 HD montées en suspension et caméras Bullet H4 HD
H4-AC-WIFI1-NA	USB Wifi Adapter (Carte Wi-Fi USB)



**ANNEXE III :  
CALCUL DE DIMENSIONS SPÉCIFIQUES**

Distance (m)	GSD1premier (m)	GSD2premier (m)	GSD3premier (m)	GSD1 (m)	GSD2 (m)	GSD3 (m)	Surface (m <sup>2</sup> )	$\Delta E_{B1}$ (m)	$\Delta E_{B2}$ (m)	$\Delta E_{B3}$ (m)	$\Delta E_{B4}$ (m)	$\Delta E_{B5}$ (m)	$\Delta E_{B6}$ (m)	$\Delta E_{B7}$ (m)	$\Delta E_{B8}$ (m)	$\Delta E_{B9}$ (m)	$\Delta E_{B10}$ (m)
0	-0,005	0,006	0,004	0,003	Inf	0,003	96	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1	-0,004	0,006	0,004	0,003	0,020	0,003	83	0,003	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	-0,004	0,007	0,003	0,003	0,011	0,003	76	0,006	0,003	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
3	-0,003	0,008	0,003	0,003	0,008	0,003	74	0,009	0,005	0,003	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001
4	-0,003	0,011	0,003	0,003	0,006	0,003	75	0,013	0,006	0,004	0,003	0,003	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001
5	-0,003	0,016	0,003	0,003	0,006	0,003	79	0,017	0,009	0,006	0,004	0,003	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002
6	-0,003	0,029	0,003	0,004	0,005	0,004	85	0,022	0,011	0,007	0,005	0,004	0,004	0,003	0,003	0,002	0,002
7	-0,003	0,120	0,003	0,004	0,005	0,004	93	0,027	0,013	0,009	0,007	0,005	0,004	0,004	0,003	0,003	0,003
8	0,003	0,068	0,003	0,005	0,005	0,004	102	0,033	0,016	0,011	0,008	0,007	0,005	0,005	0,004	0,004	0,003
9	0,003	0,029	0,003	0,006	0,005	0,004	114	0,039	0,020	0,013	0,010	0,008	0,007	0,006	0,005	0,004	0,004
10	0,003	0,019	0,003	0,006	0,005	0,005	127	0,046	0,023	0,015	0,012	0,009	0,008	0,007	0,006	0,005	0,005
11	0,003	0,015	0,003	0,007	0,005	0,005	141	0,054	0,027	0,018	0,013	0,011	0,009	0,008	0,007	0,006	0,005
12	0,003	0,012	0,003	0,008	0,005	0,005	158	0,062	0,031	0,021	0,016	0,012	0,010	0,009	0,008	0,007	0,006
13	0,003	0,011	0,003	0,009	0,006	0,006	175	0,072	0,036	0,024	0,018	0,014	0,012	0,010	0,009	0,008	0,007
14	0,003	0,010	0,003	0,010	0,006	0,006	194	0,081	0,041	0,027	0,020	0,016	0,014	0,012	0,010	0,009	0,008
15	0,003	0,009	0,003	0,011	0,006	0,006	215	0,092	0,046	0,031	0,023	0,018	0,015	0,013	0,011	0,010	0,009
16	0,003	0,009	0,003	0,013	0,006	0,006	237	0,103	0,052	0,034	0,026	0,021	0,017	0,015	0,013	0,011	0,010
17	0,003	0,008	0,003	0,014	0,006	0,007	261	0,115	0,058	0,038	0,029	0,023	0,019	0,016	0,014	0,013	0,012
18	0,003	0,008	0,003	0,015	0,007	0,007	286	0,128	0,064	0,043	0,032	0,026	0,021	0,018	0,016	0,014	0,013
19	0,003	0,008	0,003	0,017	0,007	0,007	312	0,141	0,071	0,047	0,035	0,028	0,024	0,020	0,018	0,016	0,014
20	0,004	0,007	0,003	0,018	0,007	0,008	340	0,155	0,078	0,052	0,039	0,031	0,026	0,022	0,019	0,017	0,016
21	0,004	0,007	0,003	0,020	0,008	0,008	370	0,170	0,085	0,057	0,043	0,034	0,028	0,024	0,021	0,019	0,017
22	0,004	0,007	0,003	0,021	0,008	0,008	400	0,186	0,093	0,062	0,046	0,037	0,031	0,027	0,023	0,021	0,019
23	0,004	0,007	0,003	0,023	0,008	0,009	433	0,202	0,101	0,067	0,050	0,040	0,034	0,029	0,025	0,022	0,020
24	0,004	0,007	0,003	0,025	0,008	0,009	466	0,219	0,109	0,073	0,055	0,044	0,036	0,031	0,027	0,024	0,022
25	0,004	0,007	0,003	0,027	0,009	0,009	502	0,237	0,118	0,079	0,059	0,047	0,039	0,034	0,030	0,026	0,024
26	0,004	0,007	0,003	0,029	0,009	0,010	538	0,255	0,127	0,085	0,064	0,051	0,042	0,036	0,032	0,028	0,025
27	0,004	0,007	0,003	0,031	0,009	0,010	576	0,274	0,137	0,091	0,069	0,055	0,046	0,039	0,034	0,030	0,027
28	0,004	0,006	0,003	0,033	0,009	0,010	616	0,294	0,147	0,098	0,073	0,059	0,049	0,042	0,037	0,033	0,029
29	0,004	0,006	0,003	0,035	0,010	0,011	656	0,315	0,157	0,105	0,079	0,063	0,052	0,045	0,039	0,035	0,031
30	0,004	0,006	0,003	0,038	0,010	0,011	699	0,336	0,168	0,112	0,084	0,067	0,056	0,048	0,042	0,037	0,034
31	0,004	0,006	0,003	0,040	0,010	0,012	742	0,358	0,179	0,119	0,089	0,072	0,060	0,051	0,045	0,040	0,036
32	0,004	0,006	0,003	0,043	0,011	0,012	787	0,381	0,190	0,127	0,095	0,076	0,063	0,054	0,048	0,042	0,038
33	0,004	0,006	0,003	0,045	0,011	0,012	834	0,404	0,202	0,135	0,101	0,081	0,067	0,058	0,050	0,045	0,040
34	0,004	0,006	0,003	0,048	0,011	0,013	882	0,428	0,214	0,143	0,107	0,086	0,071	0,061	0,054	0,048	0,043
35	0,004	0,006	0,004	0,050	0,012	0,013	931	0,453	0,227	0,151	0,113	0,091	0,076	0,065	0,057	0,050	0,045
36	0,004	0,006	0,004	0,053	0,012	0,013	982	0,479	0,239	0,160	0,120	0,096	0,080	0,068	0,060	0,053	0,048
37	0,004	0,006	0,004	0,056	0,012	0,014	1034	0,505	0,252	0,168	0,126	0,101	0,084	0,072	0,063	0,056	0,050
38	0,004	0,006	0,004	0,059	0,012	0,014	1087	0,532	0,266	0,177	0,133	0,106	0,089	0,076	0,066	0,059	0,053
39	0,004	0,006	0,004	0,062	0,013	0,014	1142	0,560	0,280	0,187	0,140	0,112	0,093	0,080	0,070	0,062	0,056
40	0,004	0,006	0,004	0,065	0,013	0,015	1199	0,588	0,294	0,196	0,147	0,118	0,098	0,084	0,074	0,065	0,059
41	0,004	0,006	0,004	0,068	0,013	0,015	1256	0,617	0,309	0,206	0,154	0,123	0,103	0,088	0,077	0,069	0,062
42	0,004	0,006	0,004	0,071	0,014	0,015	1316	0,647	0,324	0,216	0,162	0,129	0,108	0,092	0,081	0,072	0,065
43	0,005	0,006	0,004	0,075	0,014	0,016	1376	0,678	0,339	0,226	0,170	0,136	0,113	0,097	0,085	0,075	0,068
44	0,005	0,006	0,004	0,078	0,014	0,016	1438	0,709	0,355	0,236	0,177	0,142	0,118	0,101	0,089	0,079	0,071
45	0,005	0,006	0,004	0,082	0,015	0,016	1501	0,741	0,371	0,247	0,185	0,148	0,124	0,106	0,093	0,082	0,074
46	0,005	0,006	0,004	0,085	0,015	0,017	1566	0,774	0,387	0,258	0,194	0,155	0,129	0,111	0,097	0,086	0,077
47	0,005	0,006	0,004	0,089	0,015	0,017	1632	0,808	0,404	0,269	0,202	0,162	0,135	0,115	0,101	0,090	0,081
48	0,005	0,006	0,004	0,092	0,015	0,018	1700	0,842	0,421	0,281	0,211	0,168	0,140	0,120	0,105	0,094	0,084
49	0,005	0,006	0,004	0,096	0,016	0,018	1769	0,877	0,439	0,292	0,219	0,175	0,146	0,125	0,110	0,097	0,088
50	0,005	0,006	0,004	0,100	0,016	0,018	1839	0,913	0,456	0,304	0,228	0,183	0,152	0,130	0,114	0,101	0,091
51	0,005	0,006	0,004	0,104	0,016	0,019	1911	0,949	0,475	0,316	0,237	0,190	0,158	0,136	0,119	0,105	0,095
52	0,005	0,006	0,004	0,108	0,017	0,019	1984	0,986	0,493	0,329	0,247	0,197	0,164	0,141	0,123	0,110	0,099
53	0,005	0,006	0,004	0,112	0,017	0,019	2058	1,024	0,512	0,341	0,256	0,205	0,171	0,146	0,128	0,114	0,102
54	0,005	0,006	0,004	0,116	0,017	0,020	2134	1,063	0,531	0,354	0,266	0,213	0,177	0,152	0,133	0,118	0,106
55	0,005	0,006	0,004	0,121	0,018	0,020	2212	1,102	0,551	0,367	0,276	0,220	0,184	0,157	0,138	0,122	0,110
56	0,005	0,006	0,004	0,125	0,018	0,020	2290	1,142	0,571	0,381	0,286	0,228	0,190	0,163	0,143	0,127	0,114
57	0,005	0,006	0,004	0,129	0,018	0,021	2370	1,183	0,591	0,394	0,296	0,237	0,197	0,169	0,148	0,131	0,118
58	0,005	0,006	0,004	0,134	0,018	0,021	2452	1,224	0,612	0,408	0,306	0,245	0,204	0,175	0,153	0,136	0,122
59	0,005	0,006	0,004	0,138	0,019	0,021	2535	1,266	0,633	0,422	0,317	0,253	0,211	0,181	0,158	0,141	0,127
60	0,005	0,006	0,004	0,143	0,019	0,022	2619	1,309	0,655	0,436	0,327	0,262	0,218	0,187	0,164	0,145	0,131
61	0,005	0,006	0,004	0,148	0,019	0,022	2704	1,353	0,676	0,451	0,338	0,271	0,225	0,193	0,169	0,150	0,135
62	0,005	0,006	0,004	0,153	0,020	0,023	2791	1,397	0,699	0,466	0,349	0,279	0,233	0,200	0,175	0,155	0,140
63	0,005	0,006	0,004	0,157	0,020	0,023	2880	1,442	0,721	0,481	0,361	0,288	0,240	0,206	0,180	0,160	0,144
64	0,005	0,006	0,004	0,162	0,020	0,023	2970	1,488	0,744	0,496	0,372	0,298	0,248	0,213	0,186	0,165	0,149

Distance (m)	GSD1premier (m)	GSD2premier (m)	GSD3premier (m)	GSD1 (m)	GSD2 (m)	GSD3 (m)	Surface (m <sup>2</sup> )	ΔE <sub>B1</sub> (m)	ΔE <sub>B2</sub> (m)	ΔE <sub>B3</sub> (m)	ΔE <sub>B4</sub> (m)	ΔE <sub>B5</sub> (m)	ΔE <sub>B6</sub> (m)	ΔE <sub>B7</sub> (m)	ΔE <sub>B8</sub> (m)	ΔE <sub>B9</sub> (m)	ΔE <sub>B10</sub> (m)
65	0,005	0,006	0,004	0,167	0,021	0,024	3061	1,535	0,767	0,512	0,384	0,307	0,256	0,219	0,192	0,171	0,153
66	0,005	0,006	0,004	0,173	0,021	0,024	3154	1,582	0,791	0,527	0,395	0,316	0,264	0,226	0,198	0,176	0,158
67	0,005	0,006	0,004	0,178	0,021	0,024	3247	1,630	0,815	0,543	0,407	0,326	0,272	0,233	0,204	0,181	0,163
68	0,005	0,006	0,004	0,183	0,022	0,025	3343	1,679	0,839	0,560	0,420	0,336	0,280	0,240	0,210	0,187	0,168
69	0,005	0,006	0,004	0,188	0,022	0,025	3440	1,728	0,864	0,576	0,432	0,346	0,288	0,247	0,216	0,192	0,173
70	0,005	0,006	0,004	0,194	0,022	0,025	3538	1,778	0,889	0,593	0,445	0,356	0,296	0,254	0,222	0,198	0,178
71	0,005	0,006	0,004	0,199	0,022	0,026	3637	1,829	0,914	0,610	0,457	0,366	0,305	0,261	0,229	0,203	0,183
72	0,005	0,006	0,004	0,205	0,023	0,026	3738	1,880	0,940	0,627	0,470	0,376	0,313	0,269	0,235	0,209	0,188
73	0,005	0,006	0,004	0,210	0,023	0,026	3841	1,933	0,966	0,644	0,483	0,387	0,322	0,276	0,242	0,215	0,193
74	0,005	0,006	0,004	0,216	0,023	0,027	3944	1,986	0,993	0,662	0,496	0,397	0,331	0,284	0,248	0,221	0,199
75	0,005	0,006	0,004	0,222	0,024	0,027	4049	2,039	1,020	0,680	0,510	0,408	0,340	0,291	0,255	0,227	0,204
76	0,005	0,006	0,004	0,228	0,024	0,028	4156	2,094	1,047	0,698	0,523	0,419	0,349	0,299	0,262	0,233	0,209
77	0,005	0,006	0,004	0,234	0,024	0,028	4264	2,149	1,074	0,716	0,537	0,430	0,358	0,307	0,269	0,239	0,215
78	0,005	0,006	0,004	0,240	0,025	0,028	4373	2,205	1,102	0,735	0,551	0,441	0,367	0,315	0,276	0,245	0,220
79	0,005	0,006	0,004	0,246	0,025	0,029	4484	2,261	1,131	0,754	0,565	0,452	0,377	0,323	0,283	0,251	0,226
80	0,005	0,006	0,004	0,252	0,025	0,029	4596	2,319	1,159	0,773	0,580	0,464	0,386	0,331	0,290	0,258	0,232
81	0,005	0,006	0,004	0,258	0,026	0,029	4709	2,377	1,188	0,792	0,594	0,475	0,396	0,340	0,297	0,264	0,238
82	0,005	0,006	0,004	0,265	0,026	0,030	4824	2,436	1,218	0,812	0,609	0,487	0,406	0,348	0,304	0,271	0,244
83	0,005	0,006	0,004	0,271	0,026	0,030	4940	2,495	1,248	0,832	0,624	0,499	0,416	0,356	0,312	0,277	0,250
84	0,005	0,006	0,004	0,278	0,026	0,030	5058	2,555	1,278	0,852	0,639	0,511	0,426	0,365	0,319	0,284	0,256
85	0,005	0,006	0,004	0,284	0,027	0,031	5177	2,616	1,308	0,872	0,654	0,523	0,436	0,374	0,327	0,291	0,262
86	0,005	0,006	0,004	0,291	0,027	0,031	5297	2,678	1,339	0,893	0,669	0,536	0,446	0,383	0,335	0,298	0,268
87	0,005	0,006	0,004	0,298	0,027	0,031	5419	2,740	1,370	0,913	0,685	0,548	0,457	0,391	0,343	0,304	0,274
88	0,005	0,006	0,004	0,304	0,028	0,032	5542	2,803	1,402	0,934	0,701	0,561	0,467	0,400	0,350	0,311	0,280
89	0,005	0,006	0,004	0,311	0,028	0,032	5666	2,867	1,434	0,956	0,717	0,573	0,478	0,410	0,358	0,319	0,287
90	0,005	0,006	0,004	0,318	0,028	0,033	5792	2,932	1,466	0,977	0,733	0,586	0,489	0,419	0,366	0,326	0,293
91	0,005	0,006	0,004	0,325	0,029	0,033	5920	2,997	1,498	0,999	0,749	0,599	0,499	0,428	0,375	0,333	0,300
92	0,005	0,006	0,004	0,333	0,029	0,033	6048	3,063	1,531	1,021	0,766	0,613	0,510	0,438	0,383	0,340	0,306
93	0,005	0,006	0,004	0,340	0,029	0,034	6178	3,130	1,565	1,043	0,782	0,626	0,522	0,447	0,391	0,348	0,313
94	0,005	0,006	0,004	0,347	0,030	0,034	6310	3,197	1,599	1,066	0,799	0,639	0,533	0,457	0,400	0,355	0,320
95	0,005	0,006	0,004	0,354	0,030	0,034	6443	3,265	1,633	1,088	0,816	0,653	0,544	0,466	0,408	0,363	0,327
96	0,005	0,006	0,004	0,362	0,030	0,035	6577	3,334	1,667	1,111	0,833	0,667	0,556	0,476	0,417	0,370	0,333
97	0,005	0,006	0,004	0,369	0,030	0,035	6713	3,404	1,702	1,135	0,851	0,681	0,567	0,486	0,425	0,378	0,340
98	0,005	0,006	0,004	0,377	0,031	0,035	6850	3,474	1,737	1,158	0,868	0,695	0,579	0,496	0,434	0,386	0,347
99	0,005	0,006	0,004	0,385	0,031	0,036	6988	3,545	1,772	1,182	0,886	0,709	0,591	0,506	0,443	0,394	0,354
100	0,005	0,006	0,004	0,392	0,031	0,036	7128	3,617	1,808	1,206	0,904	0,723	0,603	0,517	0,452	0,402	0,362
101	0,005	0,006	0,004	0,400	0,032	0,037	7269	3,689	1,845	1,230	0,922	0,738	0,615	0,527	0,461	0,410	0,369
102	0,005	0,006	0,004	0,408	0,032	0,037	7412	3,762	1,881	1,254	0,941	0,752	0,627	0,537	0,470	0,418	0,376
103	0,005	0,006	0,004	0,416	0,032	0,037	7555	3,836	1,918	1,279	0,959	0,767	0,639	0,548	0,480	0,426	0,384
104	0,005	0,006	0,004	0,424	0,033	0,038	7701	3,911	1,955	1,304	0,978	0,782	0,652	0,559	0,489	0,435	0,391
105	0,005	0,006	0,004	0,432	0,033	0,038	7848	3,986	1,993	1,329	0,997	0,797	0,664	0,569	0,498	0,443	0,399
106	0,005	0,006	0,004	0,440	0,033	0,038	7996	4,062	2,031	1,354	1,016	0,812	0,677	0,580	0,508	0,451	0,406
107	0,005	0,006	0,004	0,449	0,034	0,039	8145	4,139	2,070	1,380	1,035	0,828	0,690	0,591	0,517	0,460	0,414
108	0,005	0,006	0,004	0,457	0,034	0,039	8296	4,217	2,108	1,406	1,054	0,843	0,703	0,602	0,527	0,469	0,422
109	0,005	0,006	0,004	0,465	0,034	0,039	8448	4,295	2,147	1,432	1,074	0,859	0,716	0,614	0,537	0,477	0,429
110	0,005	0,006	0,004	0,474	0,034	0,040	8602	4,374	2,187	1,458	1,093	0,875	0,729	0,625	0,547	0,486	0,437
111	0,005	0,006	0,004	0,483	0,035	0,040	8757	4,453	2,227	1,484	1,113	0,891	0,742	0,636	0,557	0,495	0,445
112	0,005	0,006	0,004	0,491	0,035	0,040	8913	4,534	2,267	1,511	1,133	0,907	0,756	0,648	0,567	0,504	0,453
113	0,005	0,006	0,004	0,500	0,035	0,041	9071	4,615	2,307	1,538	1,154	0,923	0,769	0,659	0,577	0,513	0,461
114	0,005	0,006	0,004	0,509	0,036	0,041	9230	4,697	2,348	1,566	1,174	0,939	0,783	0,671	0,587	0,522	0,470
115	0,005	0,006	0,004	0,518	0,036	0,042	9391	4,779	2,390	1,593	1,195	0,956	0,797	0,683	0,597	0,531	0,478
116	0,005	0,006	0,004	0,527	0,036	0,042	9553	4,863	2,431	1,621	1,216	0,973	0,810	0,695	0,608	0,540	0,486
117	0,005	0,006	0,004	0,536	0,037	0,042	9716	4,947	2,473	1,649	1,237	0,989	0,824	0,707	0,618	0,550	0,495
118	0,005	0,006	0,004	0,545	0,037	0,043	9881	5,031	2,516	1,677	1,258	1,006	0,839	0,719	0,629	0,559	0,503
119	0,005	0,006	0,004	0,554	0,037	0,043	10047	5,117	2,558	1,706	1,279	1,023	0,853	0,731	0,640	0,569	0,512
120	0,006	0,006	0,004	0,563	0,038	0,043	10215	5,203	2,601	1,734	1,301	1,041	0,867	0,743	0,650	0,578	0,520
121	0,006	0,006	0,004	0,573	0,038	0,044	10383	5,290	2,645	1,763	1,322	1,058	0,882	0,756	0,661	0,588	0,529
122	0,006	0,006	0,004	0,582	0,038	0,044	10554	5,377	2,689	1,792	1,344	1,075	0,896	0,768	0,672	0,597	0,538
123	0,006	0,006	0,004	0,592	0,038	0,044	10725	5,466	2,733	1,822	1,366	1,093	0,911	0,781	0,683	0,607	0,547
124	0,006	0,006	0,004	0,601	0,039	0,045	10898	5,555	2,777	1,852	1,389	1,111	0,926	0,794	0,694	0,617	0,555
125	0,006	0,006	0,004	0,611	0,039	0,045	11073	5,645	2,822	1,882	1,411	1,129	0,941	0,806	0,706	0,627	0,564
126	0,006	0,006	0,004	0,621	0,039	0,046	11249	5,735	2,868	1,912	1,434	1,147	0,956	0,819	0,717	0,637	0,574
127	0,006	0,006	0,004	0,631	0,040	0,046	11426	5,826	2,913	1,942	1,457	1,165	0,971	0,832	0,728	0,647	0,583
128	0,006	0,006	0,004	0,640	0,040	0,046	11604	5,918	2,959	1,973	1,480	1,184	0,986	0,845	0,740	0,658	0,592
129	0,006	0,006	0,004	0,650	0,040	0,047	11784	6,011	3,005	2,004	1,503	1,202	1,002	0,859	0,751	0,668	0,601

Distance (m)	GSD1premier (m)	GSD2premier (m)	GSD3premier (m)	GSD1 (m)	GSD2 (m)	GSD3 (m)	Surface (m <sup>2</sup> )	$\Delta E_{B1}$ (m)	$\Delta E_{B2}$ (m)	$\Delta E_{B3}$ (m)	$\Delta E_{B4}$ (m)	$\Delta E_{B5}$ (m)	$\Delta E_{B6}$ (m)	$\Delta E_{B7}$ (m)	$\Delta E_{B8}$ (m)	$\Delta E_{B9}$ (m)	$\Delta E_{B10}$ (m)
130	0,006	0,006	0,004	0,660	0,041	0,047	11966	6,104	3,052	2,035	1,526	1,221	1,017	0,872	0,763	0,678	0,610
131	0,006	0,006	0,004	0,671	0,041	0,047	12148	6,198	3,099	2,066	1,550	1,240	1,033	0,885	0,775	0,689	0,620
132	0,006	0,006	0,004	0,681	0,041	0,048	12333	6,293	3,147	2,098	1,573	1,259	1,049	0,899	0,787	0,699	0,629
133	0,006	0,006	0,004	0,691	0,042	0,048	12518	6,389	3,194	2,130	1,597	1,278	1,065	0,913	0,799	0,710	0,639
134	0,006	0,006	0,004	0,701	0,042	0,048	12705	6,485	3,242	2,162	1,621	1,297	1,081	0,926	0,811	0,721	0,648
135	0,006	0,006	0,004	0,712	0,042	0,049	12893	6,582	3,291	2,194	1,645	1,316	1,097	0,940	0,823	0,731	0,658
136	0,006	0,006	0,004	0,722	0,042	0,049	13083	6,680	3,340	2,227	1,670	1,336	1,113	0,954	0,835	0,742	0,668
137	0,006	0,006	0,004	0,733	0,043	0,049	13274	6,778	3,389	2,259	1,694	1,356	1,130	0,968	0,847	0,753	0,678
138	0,006	0,006	0,004	0,744	0,043	0,050	13466	6,877	3,439	2,292	1,719	1,375	1,146	0,982	0,860	0,764	0,688
139	0,006	0,006	0,004	0,754	0,043	0,050	13660	6,977	3,488	2,326	1,744	1,395	1,163	0,997	0,872	0,775	0,698
140	0,006	0,006	0,004	0,765	0,044	0,051	13855	7,078	3,539	2,359	1,769	1,416	1,180	1,011	0,885	0,786	0,708
141	0,006	0,006	0,004	0,776	0,044	0,051	14052	7,179	3,589	2,393	1,795	1,436	1,196	1,026	0,897	0,798	0,718
142	0,006	0,006	0,004	0,787	0,044	0,051	14250	7,281	3,640	2,427	1,820	1,456	1,213	1,040	0,910	0,809	0,728
143	0,006	0,006	0,004	0,798	0,045	0,052	14449	7,384	3,692	2,461	1,846	1,477	1,231	1,055	0,923	0,820	0,738
144	0,006	0,006	0,004	0,809	0,045	0,052	14650	7,487	3,744	2,496	1,872	1,497	1,248	1,070	0,936	0,832	0,749
145	0,006	0,006	0,004	0,821	0,045	0,052	14852	7,591	3,796	2,530	1,898	1,518	1,265	1,084	0,949	0,843	0,759
146	0,006	0,006	0,004	0,832	0,046	0,053	15056	7,696	3,848	2,565	1,924	1,539	1,283	1,099	0,962	0,855	0,770
147	0,006	0,006	0,004	0,843	0,046	0,053	15261	7,802	3,901	2,601	1,950	1,560	1,300	1,115	0,975	0,867	0,780
148	0,006	0,006	0,004	0,855	0,046	0,053	15467	7,908	3,954	2,636	1,977	1,582	1,318	1,130	0,989	0,879	0,791
149	0,006	0,006	0,004	0,866	0,047	0,054	15675	8,015	4,008	2,672	2,004	1,603	1,336	1,145	1,002	0,891	0,802
150	0,006	0,006	0,004	0,878	0,047	0,054	15884	8,123	4,062	2,708	2,031	1,625	1,354	1,160	1,015	0,903	0,812
151	0,006	0,006	0,004	0,889	0,047	0,055	16094	8,232	4,116	2,744	2,058	1,646	1,372	1,176	1,029	0,915	0,823
152	0,006	0,006	0,004	0,901	0,047	0,055	16306	8,341	4,170	2,780	2,085	1,668	1,390	1,192	1,043	0,927	0,834
153	0,006	0,006	0,004	0,913	0,048	0,055	16519	8,451	4,225	2,817	2,113	1,690	1,408	1,207	1,056	0,939	0,845
154	0,006	0,006	0,004	0,925	0,048	0,056	16734	8,561	4,281	2,854	2,140	1,712	1,427	1,223	1,070	0,951	0,856
155	0,006	0,006	0,004	0,937	0,048	0,056	16950	8,673	4,336	2,891	2,168	1,735	1,445	1,239	1,084	0,964	0,867
156	0,006	0,006	0,004	0,949	0,049	0,056	17167	8,785	4,392	2,928	2,196	1,757	1,464	1,255	1,098	0,976	0,878
157	0,006	0,006	0,004	0,961	0,049	0,057	17386	8,898	4,449	2,966	2,224	1,780	1,483	1,271	1,112	0,989	0,890
158	0,006	0,006	0,004	0,973	0,049	0,057	17606	9,011	4,506	3,004	2,253	1,802	1,502	1,287	1,126	1,001	0,901
159	0,006	0,006	0,004	0,986	0,050	0,057	17828	9,126	4,563	3,042	2,281	1,825	1,521	1,304	1,141	1,014	0,913
160	0,006	0,006	0,004	0,998	0,050	0,058	18051	9,241	4,620	3,080	2,310	1,848	1,540	1,320	1,155	1,027	0,924
161	0,006	0,006	0,004	1,010	0,050	0,058	18275	9,356	4,678	3,119	2,339	1,871	1,559	1,337	1,170	1,040	0,936
162	0,006	0,006	0,004	1,023	0,051	0,058	18501	9,473	4,736	3,158	2,368	1,895	1,579	1,353	1,184	1,053	0,947
163	0,006	0,006	0,004	1,036	0,051	0,059	18728	9,590	4,795	3,197	2,397	1,918	1,598	1,370	1,199	1,066	0,959
164	0,006	0,006	0,004	1,048	0,051	0,059	18956	9,708	4,854	3,236	2,427	1,942	1,618	1,387	1,213	1,079	0,971
165	0,006	0,006	0,004	1,061	0,051	0,060	19186	9,826	4,913	3,275	2,457	1,965	1,638	1,404	1,228	1,092	0,983
166	0,006	0,006	0,004	1,074	0,052	0,060	19417	9,946	4,973	3,315	2,486	1,989	1,658	1,421	1,243	1,105	0,995
167	0,006	0,006	0,004	1,087	0,052	0,060	19650	10,066	5,033	3,355	2,516	2,013	1,678	1,438	1,258	1,118	1,007
168	0,006	0,006	0,004	1,100	0,052	0,061	19884	10,187	5,093	3,396	2,547	2,037	1,698	1,455	1,273	1,132	1,019
169	0,006	0,006	0,004	1,113	0,053	0,061	20119	10,308	5,154	3,436	2,577	2,062	1,718	1,473	1,289	1,145	1,031
170	0,006	0,006	0,004	1,126	0,053	0,061	20356	10,430	5,215	3,477	2,608	2,086	1,738	1,490	1,304	1,159	1,043
171	0,006	0,006	0,004	1,139	0,053	0,062	20594	10,553	5,277	3,518	2,638	2,111	1,759	1,508	1,319	1,173	1,055
172	0,006	0,006	0,004	1,152	0,054	0,062	20834	10,677	5,338	3,559	2,669	2,135	1,779	1,525	1,335	1,186	1,068
173	0,006	0,006	0,004	1,166	0,054	0,062	21074	10,801	5,401	3,600	2,700	2,160	1,800	1,543	1,350	1,200	1,080
174	0,006	0,006	0,004	1,179	0,054	0,063	21317	10,926	5,463	3,642	2,732	2,185	1,821	1,561	1,366	1,214	1,093
175	0,006	0,006	0,004	1,193	0,055	0,063	21560	11,052	5,526	3,684	2,763	2,210	1,842	1,579	1,382	1,228	1,105
176	0,006	0,006	0,004	1,206	0,055	0,064	21805	11,179	5,589	3,726	2,795	2,236	1,863	1,597	1,397	1,242	1,118
177	0,006	0,006	0,004	1,220	0,055	0,064	22052	11,306	5,653	3,769	2,827	2,261	1,884	1,615	1,413	1,256	1,131
178	0,006	0,006	0,004	1,234	0,055	0,064	22300	11,434	5,717	3,811	2,858	2,287	1,906	1,633	1,429	1,270	1,143
179	0,006	0,006	0,004	1,248	0,056	0,065	22549	11,563	5,781	3,854	2,891	2,313	1,927	1,652	1,445	1,285	1,156
180	0,006	0,006	0,004	1,261	0,056	0,065	22800	11,692	5,846	3,897	2,923	2,338	1,949	1,670	1,462	1,299	1,169
181	0,006	0,006	0,004	1,275	0,056	0,065	23052	11,822	5,911	3,941	2,956	2,364	1,970	1,689	1,478	1,314	1,182
182	0,006	0,006	0,004	1,290	0,057	0,066	23305	11,953	5,977	3,984	2,988	2,391	1,992	1,708	1,494	1,328	1,195
183	0,006	0,006	0,004	1,304	0,057	0,066	23560	12,085	6,042	4,028	3,021	2,417	2,014	1,726	1,511	1,343	1,208
184	0,006	0,006	0,004	1,318	0,057	0,066	23816	12,217	6,109	4,072	3,054	2,443	2,036	1,745	1,527	1,357	1,222
185	0,006	0,006	0,004	1,332	0,058	0,067	24073	12,350	6,175	4,117	3,088	2,470	2,058	1,764	1,544	1,372	1,235
186	0,006	0,006	0,004	1,347	0,058	0,067	24332	12,484	6,242	4,161	3,121	2,497	2,081	1,783	1,560	1,387	1,248
187	0,006	0,006	0,004	1,361	0,058	0,067	24593	12,618	6,309	4,206	3,155	2,524	2,103	1,803	1,577	1,402	1,262
188	0,006	0,006	0,004	1,375	0,059	0,068	24854	12,753	6,377	4,251	3,188	2,551	2,126	1,822	1,594	1,417	1,275
189	0,006	0,006	0,004	1,390	0,059	0,068	25117	12,889	6,445	4,296	3,222	2,578	2,148	1,841	1,611	1,432	1,289
190	0,006	0,006	0,004	1,405	0,059	0,069	25382	13,026	6,513	4,342	3,257	2,605	2,171	1,861	1,628	1,447	1,303
191	0,006	0,006	0,004	1,419	0,059	0,069	25648	13,163	6,582	4,388	3,291	2,633	2,194	1,880	1,645	1,463	1,316
192	0,006	0,006	0,004	1,434	0,060	0,069	25915	13,301	6,651	4,434	3,325	2,660	2,217	1,900	1,663	1,478	1,330
193	0,006	0,006	0,004	1,449	0,060	0,070	26184	13,440	6,720	4,480	3,360	2,688	2,240	1,920	1,680	1,493	1,344
194	0,006	0,006	0,004	1,464	0,060	0,070	26454	13,580	6,790	4,527	3,395	2,716	2,263	1,940	1,697	1,509	1,358

Distance (m)	GSD1premier (m)	GSD2premier (m)	GSD3premier (m)	GSD1 (m)	GSD2 (m)	GSD3 (m)	Surface (m <sup>2</sup> )	$\Delta E_{B1}$ (m)	$\Delta E_{B2}$ (m)	$\Delta E_{B3}$ (m)	$\Delta E_{B4}$ (m)	$\Delta E_{B5}$ (m)	$\Delta E_{B6}$ (m)	$\Delta E_{B7}$ (m)	$\Delta E_{B8}$ (m)	$\Delta E_{B9}$ (m)	$\Delta E_{B10}$ (m)
195	0,006	0,006	0,004	1,479	0,061	0,070	26725	13,720	6,860	4,573	3,430	2,744	2,287	1,960	1,715	1,524	1,372
196	0,006	0,006	0,004	1,494	0,061	0,071	26998	13,861	6,930	4,620	3,465	2,772	2,310	1,980	1,733	1,540	1,386
197	0,006	0,006	0,004	1,510	0,061	0,071	27272	14,003	7,001	4,668	3,501	2,801	2,334	2,000	1,750	1,556	1,400
198	0,006	0,006	0,004	1,525	0,062	0,071	27547	14,145	7,073	4,715	3,536	2,829	2,358	2,021	1,768	1,572	1,415
199	0,006	0,006	0,004	1,540	0,062	0,072	27824	14,288	7,144	4,763	3,572	2,858	2,381	2,041	1,786	1,588	1,429
200	0,006	0,006	0,004	1,556	0,062	0,072	28103	14,432	7,216	4,811	3,608	2,886	2,405	2,062	1,804	1,604	1,443



**ANNEXE IV :**  
**EMPLACEMENT DES SITES À SAINT-JEAN-SUR-RICHELIEU**

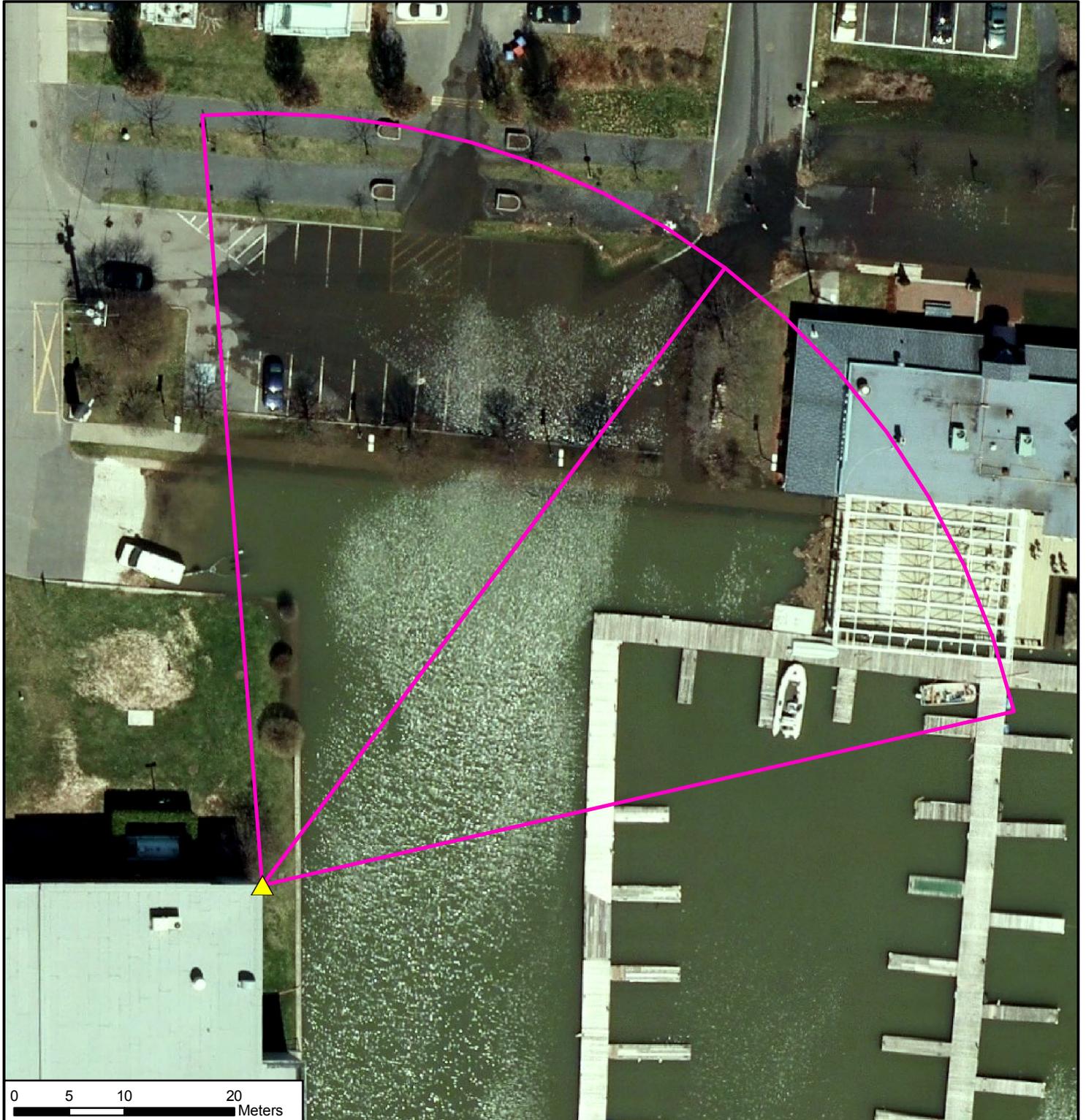


**▲ Emplacement**      **□ Champ de vision**

Le segment central du champ de vision représente l'axe de visée parallèle aux deux axes de visées des caméras.  
Gisement du segment central (angle par rapport au Nord) : 77 degrés.



**Romain LATAPIE**  
Equipe du projet GARI  
INRS (centre ETE)  
12/12/2016

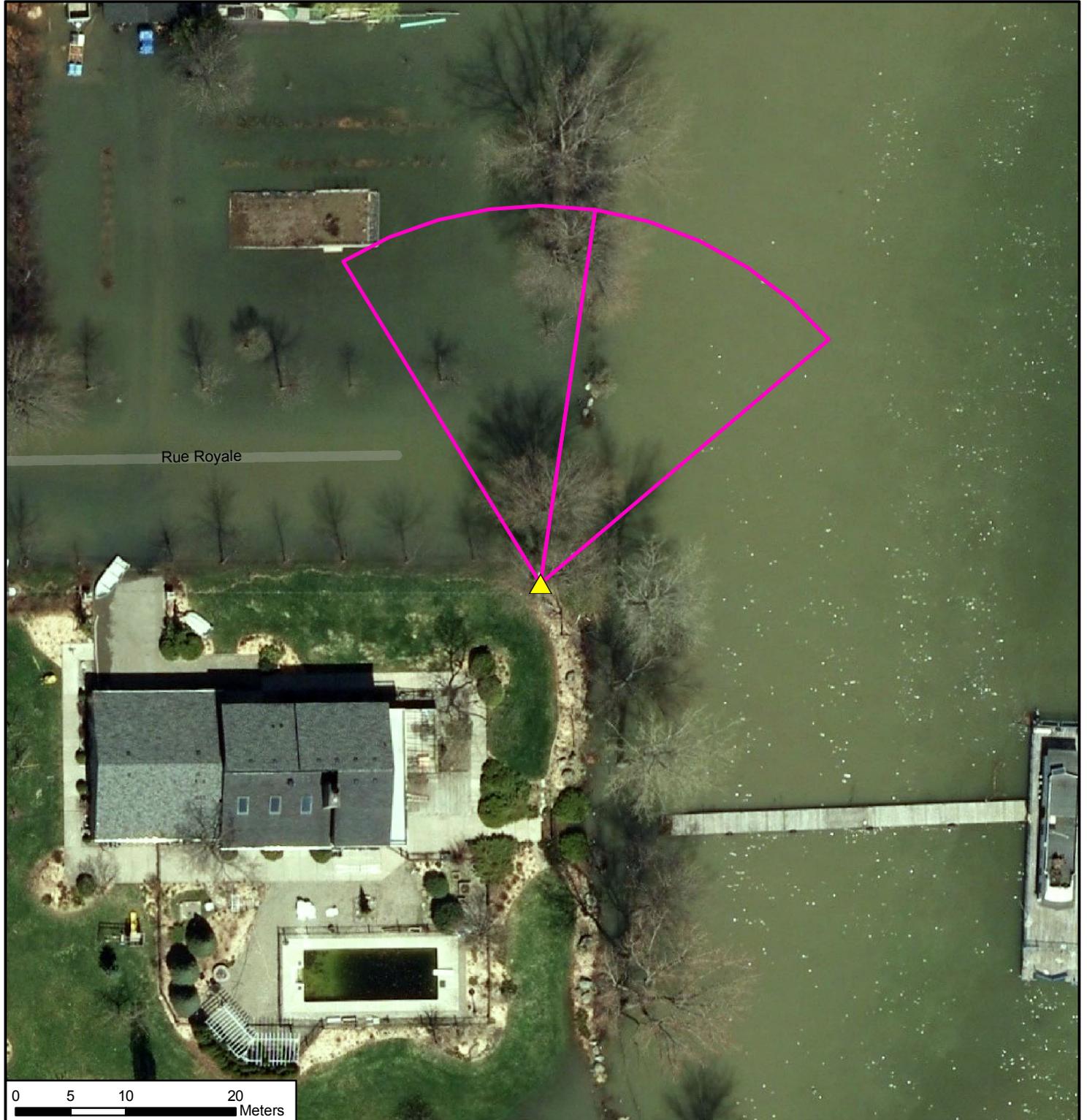


**▲ Emplacement**      **□ Champ de vision**

Le segment central du champ de vision représente l'axe de visée parallèle aux deux axes de visées des caméras.  
Gisement du segment central (angle par rapport au Nord) : 37 degrés.



**Romain LATAPIE**  
Equipe du projet GARI  
INRS (centre ETE)  
12/12/2016



**▲ Emplacement**      **◻ Champ de vision**

Le segment central du champ de vision représente l'axe de visée parallèle aux deux axes de visées des caméras.  
Gisement du segment central (angle par rapport au Nord) : 8 degrés.



**Romain LATAPIE**  
Equipe du projet GARI  
INRS (centre ETE)  
12/12/2016

**ANNEXE V :**  
**CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DE LA STATION TOTALE**  
**LEICA TS 16**

# Leica Viva TS16

## Fiche technique



Viva



### Un logiciel attrayant

La station totale Leica Viva TS16 s'accompagne du logiciel révolutionnaire Captivate, qui transforme les données complexes en modèles 3D les plus réalistes et les plus faciles à travailler. Avec des applications simples d'utilisation et une technologie tactile familière, vous pouvez visualiser toutes les formes de données mesurées ou de conception dans toutes les dimensions. Leica Captivate couvre les secteurs d'activité les plus variés, aussi simplement que depuis votre smartphone, que vous travailliez avec le GNSS, les stations totales ou les deux.



### Un pont infini entre le terrain et le bureau

Pendant que Leica Captivate capture et modélise les données sur le terrain, Leica Infinity traite les informations au bureau. La fluidité du transfert de données garantit que le projet progresse comme prévu. Leica Captivate et Leica Infinity travaillent conjointement pour rassembler les données des levés précédents et pour modifier les projets plus rapidement et plus efficacement.

### ACC»

### Service client accessible en un clic

Avec le programme Active Customer Care (ACC), vous êtes à un clic d'un réseau mondial de professionnels expérimentés, prêts à vous guider en cas de problème. Éliminez les retards grâce à un service technique supérieur, terminez vos travaux plus rapidement grâce au soutien de nos excellents consultants et évitez les retours coûteux sur les chantiers grâce au service en ligne qui permet d'envoyer et de recevoir les données directement sur le terrain. Contrôlez vos dépenses avec un Contrat Client Personnalisé sur mesure qui vous assure d'être couvert partout, tout le temps.

# Station totale Leica Viva TS16

## MESURE D'ANGLE

Précision <sup>1</sup> Hz et V	Absolue, continue, diamétrale	1" (0,3 mgr), 2" (0,6 mgr), 3" (1 mgr), 5" (1,5 mgr)
--------------------------------	-------------------------------	--

## MESURE DE DISTANCE

Portée <sup>2</sup>	Avec prisme (GPR1, GPH1P) <sup>3</sup> Sans prisme / Toute surface <sup>4</sup>	1,5 m à >3500m R500 : 1,5 m à > 500m R1000 : 1,5 m à >1000m
Précision > Durée de la mesure	Simple (prisme) <sup>2,5</sup> Simple (toute surface) <sup>2,4,5,6</sup>	1 mm + 1,5 ppm / habituellement 2,4 s 2 mm + 2 ppm / habituellement 3 s
Taille du point laser	À 50 m	8mm x 20mm
Technologie de mesure	Analyseur du système	Coaxial, laser rouge visible

## IMAGERIE

Caméra de vue d'ensemble	Capteur Champ de vision Fréquence de trames	Capteur CMOS 5 mégapixels 19,4° Jusqu'à 20 images par seconde
--------------------------	---	---

## VISÉE AUTOMATIQUE : ATRplus

Plage de visée de la cible <sup>2</sup> / Plage de verrouillage de la cible <sup>2</sup>	Prisme circulaire (GPR1, GPH1P) Prisme 360° (GRZ4, GRZ122)	1500 m / 1000 m 100 0m / 1000 m
Précision <sup>1,2</sup> / Durée de la mesure	Précision angulaire ATRplus Hz, V	1" (0,3 mgr), 2" (0,6 mgr), 3" (1 mgr), 5" (1,5 mgr) / habituellement 3 à 4 s

## POWERSEARCH

Portée / Durée de la recherche	Prisme 360° (GRZ4, GRZ122)	300 m / habituellement 5 s
--------------------------------	----------------------------	----------------------------

## AIDE À L'ALIGNEMENT (EGL)

Plage de fonctionnement / Précision		5 à 150 m / habituellement 5 cm à 100 m
-------------------------------------	--	---

## GÉNÉRALITÉS

Logiciel de terrain	Leica Captivate avec applis	
Affichage et clavier	Écran tactile couleur WVGA 5" (pouces), face I standard / face II en option	37 touches, éclairé
Processeur	TI OMAP4430 1 GHz Dual-core ARM® Cortex™ A9 MPCore™	Système d'exploitation : Windows EC7
Gestion de l'alimentation	Batterie Li-Ion interchangeable	Autonomie : 5 à 8 h
Stockage de données	Mémoire interne Carte mémoire	2 Go Carte SD 1 Go ou 8 Go
Interfaces	RS232, USB, Bluetooth®, WLAN	
Poids	Station totale batterie comprise	5,3 à 6 kg
Spécifications environnementales	Plage de température de fonctionnement Poussière / Eau (IEC 60529) / Humidité	-20°C à +50°C IP55 / 95 %, sans condensation

LEICA VIVA	TS16 M	TS16 A	TS16 P	TS16 I
Mesure d'angle	✓	✓	✓	✓
Plage de mesure de distance vers le prisme	✓	✓	✓	✓
Plage de mesure de distance vers toute surface	✓	✓	✓	✓
Visée automatique de la cible : ATRplus	✗	✓	✓	✓
PowerSearch (PS)	✗	✗	✓	✓
Caméra de vue d'ensemble	✗	✗	✗	✓
Aide à l'alignement (EGL)	✓	✓	✓	✓

<sup>1</sup> Écart-type ISO 17123-3

<sup>2</sup> Temps couvert, sans brume, visibilité à environ 40 km, sans tremblement dû à la chaleur

<sup>3</sup> 1,5 m à 2000m pour les prismes 360° (GRZ4, GRZ122)

<sup>4</sup> Objet dans l'ombre, ciel couvert, charte de gris Kodak (90% de réflexion)

<sup>5</sup> Écart-type ISO 17123-4

<sup>6</sup> Distance > 500 m : Précision 4 mm + 2 ppm, Durée de la mesure : habituellement 6 s

✓ = Standard ✗ = Non disponible

Les marques de commerce Bluetooth® sont la propriété de Bluetooth SIG, Inc.  
Rayonnement laser, éviter toute exposition directe de l'œil. Produit laser de classe 3R conformément à la norme IEC 60825-1:2014.

Les illustrations, descriptions et données techniques sont non contractuelles. Tous droits réservés.

Imprimé en Suisse - Copyright Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Suisse, 2015.  
836479fr - 05.15 - INT.



**ANNEXE VI :  
POINTS D'APPUI RELEVÉS SUR LE PARKING DORCHESTER**



A001

A003

A004

A006

A007

A009

A010

A011

A019

A024

A026

A025

A018

A027

A028

A031

A032

A034

A033

A030

A029

A012

A013

A014

A015

A016

A017

A020

A021

S004

S003

S005

S002

S003

S002

S008

S007

S006

S005

S004

S003

S002

S001

S012

S011

S010

S009

S008

S007

S006

S005

S004

S003

S002

S001

A035

A037

A036

A035

A039

**ANNEXE VII :  
MATRICES DE ROTATION**

## Matrices de rotation

Trois matrices de rotation  $R(\omega, \varphi, \kappa)$  ont été utilisées dans ce projet :

- Cas « aérien » : la plus courante, utilisée généralement en photogrammétrie aérienne.

$$\begin{pmatrix} \cos(\varphi) \cos(\kappa) & -\cos(\varphi) \sin(\kappa) & \sin(\varphi) \\ \cos(\omega) \sin(\kappa) + \sin(\omega) \sin(\varphi) \cos(\kappa) & \cos(\omega) \cos(\kappa) - \sin(\omega) \sin(\varphi) \sin(\kappa) & -\sin(\omega) \cos(\varphi) \\ \sin(\omega) \sin(\kappa) - \cos(\omega) \sin(\varphi) \cos(\kappa) & \sin(\omega) \cos(\kappa) + \cos(\omega) \sin(\varphi) \sin(\kappa) & \cos(\omega) \cos(\varphi) \end{pmatrix} \quad (1)$$

- Cas « terrestre » : utilisée parfois en photogrammétrie terrestre pour lever l'indétermination qu'il peut y avoir sur  $\varphi$ .

$$\begin{pmatrix} \cos(\varphi) \cos(\kappa) - \sin(\omega) \sin(\varphi) \sin(\kappa) & -\sin(\varphi) \cos(\omega) & \cos(\varphi) \sin(\kappa) + \sin(\omega) \sin(\varphi) \cos(\kappa) \\ \sin(\varphi) \cos(\kappa) + \sin(\omega) \cos(\varphi) \sin(\kappa) & \cos(\varphi) \cos(\omega) & \sin(\varphi) \sin(\kappa) - \sin(\omega) \cos(\varphi) \cos(\kappa) \\ -\cos(\omega) \sin(\kappa) & \sin(\omega) & \cos(\omega) \cos(\kappa) \end{pmatrix} \quad (2)$$

- Cas « Dr Blais » : utilisée pour l'orientation absolue, elle permet de minimiser les termes de deuxième ordre.

$$\begin{pmatrix} \cos(\varphi) \cos(\kappa) + \sin(\omega) \sin(\varphi) \sin(\kappa) & \cos(\omega) \sin(\kappa) & \sin(\varphi) \cos(\kappa) + \sin(\omega) \cos(\varphi) \sin(\kappa) \\ \cos(\varphi) \sin(\kappa) - \sin(\omega) \sin(\varphi) \cos(\kappa) & \cos(\omega) \cos(\kappa) & -\sin(\varphi) \sin(\kappa) - \sin(\omega) \cos(\varphi) \cos(\kappa) \\ \sin(\varphi) \cos(\omega) & \sin(\omega) & \cos(\varphi) \cos(\omega) \end{pmatrix} \quad (3)$$

Plus d'information sur ces matrices est disponible dans Boulianne (2015) et Luhmann *et al.* (2013).

Pour l'orientation relative dans le cadre du projet, la matrice « aérien » a été le plus souvent utilisée car il n'y avait pas de problème d'indétermination et que la matrice « terrestre » entraîne, dans la majorité des cas, des résidus plus élevés sur les points d'appui.

**ANNEXE VIII :**  
**CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DE LA STATION TOTALE**  
**LEICA TS 06**

# Leica FlexLine TS06plus

Le meilleur de la précision  
pour une efficacité optimale



- when it has to be **right**

**Leica**  
Geosystems

# Le premier Plus : La Qualité Leica Geosystems



Si la "Qualité" est un terme relatif pour beaucoup, elle ne l'est pas pour Leica Geosystems. Pour nous assurer que nos instruments bénéficient des plus hauts standards de précision et de qualité, nous fabriquons nos instruments dans les meilleures conditions combinées au savoir-faire Suisse pour offrir les instruments les plus performants. Quelle que soit la station totale Leica FlexLine plus que vous choisissiez, vous profitez dans vos tâches quotidiennes de la qualité reconnue de Leica Geosystems. La seule chose qui compte vraiment dans votre choix optimal de station totale est votre projet, en d'autres termes, vos besoins personnels. C'est pourquoi la Station Totale Leica FlexLine TS06plus est idéale pour de nombreuses tâches standard de topographie, notamment pour les applications de précision moyenne. Ce n'est pas sans raison que la précédente Leica TS06 est le modèle de la série Leica FlexLine le plus utilisé, le modèle Leica FlexLine TS06plus, intégrant les dernières technologies et de nombreuses nouvelles options, est son digne successeur.

ACTIVE customer care 

**myworld**  
©Leica Geosystems

# Le troisième Plus : Haute Précision, Rapidité, Efficacité

Le qualificatif "facile à utiliser" semble être partout mais ne se vérifie que dans la pratique. Parce que des experts de la mesure professionnelle ont été impliqués dans sa conception, la Station Totale Leica FlexLine TS06plus vous permet de travailler rapidement et efficacement dès le premier jour.

## Distancemètre :

Partout où une grande précision est nécessaire, vous pouvez relever le défi avec la Station Totale TS06plus. Elle fournit le Distancemètre le plus précis.

## Mesure avec Prisme

- Précision + (1.5 mm + 2 ppm)
- Vitesse (1 seconde)

## Mesure sans Prisme

- Précision (2 mm + 2 ppm)
- EDM PinPoint avec pointeur laser et faisceau de mesure coaxial pour une visée et une mesure précise
- Moins de manipulations nécessaires, car les cibles sur lesquelles il n'est pas possible de fixer un réflecteur peuvent être mesurées sans réflecteur jusqu'à 1000m



Grâce à la technologie Bluetooth® intégrée à la Leica Flexline TS06plus, vous pouvez connecter votre station totale à un collecteur de données sans utiliser de câble, tel que les carnets de terrain Leica Viva C10/CS15 équipés du logiciel SmartWorx Viva. La clé USB facilite le transfert de données telles que GSI, DXF, ASCII, LandXML et CSV.

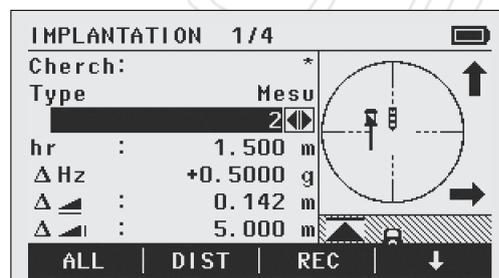
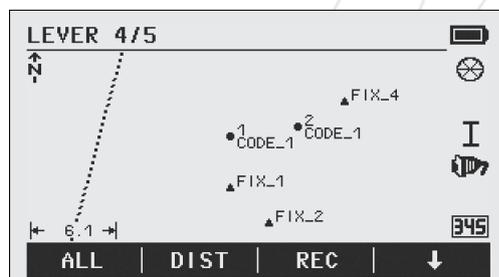
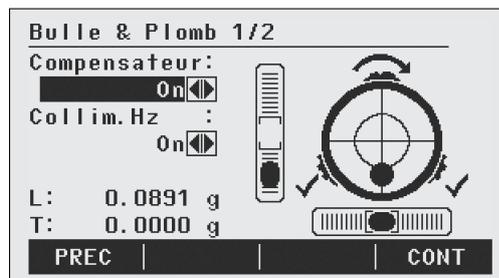


## Une interface conviviale : Le clavier alpha-numérique complet.

Le clavier alpha-numérique intégré à la Leica

TS06plus permet la saisie rapide et facile de nombres, de lettres et de caractères spéciaux, pour de la codification par exemple. Permettant d'augmenter la vitesse de travail tout en réduisant les sources d'erreurs possibles.

**Logiciel embarqué FlexField plus :** Simple d'utilisation grâce à son interface et à une navigation intuitives.



## Leica Geosystems – mySecurity

mySecurity vous permet une tranquillité d'esprit totale. Si votre instrument est volé, un mécanisme de verrouillage est disponible pour assurer que votre appareil ne puisse être utilisé.

# Leica FlexLine plus

## Performances reconnues, Instruments fiables

### Caractéristiques Techniques TS06plus :

Mesures d'angles (Hz, V)			Lunette			
Précision <sup>1)</sup>	1" (0.3 mgon) / 2" (0.6 mgon) 3" (1 mgon) / 5" (1.5 mgon) 7" (2 mgon)	✓	Grossissement	30 x	✓	
Méthode	Absolute, continue, diamétrale : pour tous les modèles	✓	Pouvoir de résolution	3"	✓	
Résolution de l'affichage	0.1" / 0.1 mgon / 0.01 mil	✓	Champ visuel	1°30' (1.66 gon) 2.7 m à 100 m	✓	
Compensateur	Compensateur 4 axes : sur tous les modèles	✓	Plage de mise au point	De 1.7 m à l'infini	✓	
Précision de calage	0.5" / 0.5" / 1" / 1.5" / 2"	✓	Réticule	Rétro éclairé, 10 niveaux de luminosité	✓	
Plage du compensateur	0.07 gon	✓	<b>Clavier et affichage</b>			
Vis sans fin	Mouvements souples sans temps de latence	✓	Clavier et affichage	Clavier alpha-numérique complet avec affichage haute résolution noir & blanc, Ecran graphique 160 x 288 pixels, Affichage rétro éclairé, 5 niveaux de luminosité	✓	
<b>Mesure de Distance avec Réflecteur</b>			Position	Circle I, Circle II	✓	
Portée <sup>2)</sup> Prisme rond (Leica GPR1)	3500 m	✓	<b>Système d'exploitation</b>			
Portée <sup>2)</sup> Cible réfléchissante (60 mm x 60 mm)	>500 m <sup>9)</sup> >1000 m <sup>10)</sup>	✓	Windows CE	5.0	✓	
Portée <sup>2)</sup> Long prisme (Leica GPR1, R500/R1000)	>10000 m	✓	<b>Plomb Laser</b>			
Précision <sup>3)</sup>	Standard : 1.5 mm + 2 ppm Rapide : 2.0 mm + 2 ppm Tracking : 3.0 mm + 2 ppm	✓	Type	Point laser, 5 niveaux de luminosité	✓	
Durée de la Mesure <sup>4)</sup>	1.0 s	✓	Précision de centrage	1.5 mm à 1.5 m	✓	
Temps de mesure en mode "Precise+"	2.4 s	✓	<b>Batterie</b>			
<b>Mesure de Distance sans Réflecteur <sup>8)</sup></b>			Type	Lithium-Ion	✓	
Portée <sup>5)</sup> PinPoint R500 / R1000	> 500 m / > 1000 m	✓	Autonomie en utilisation <sup>7)</sup>	Env. 30 h	✓	
Précision <sup>3)6)</sup>	2 mm + 2 ppm	✓	Temps de charge	2.3 h	✓	
Taille du point laser	A 30 m : Environ 7 x 10 mm A 50 m : Environ 8 x 20 mm	✓	<b>Poids</b>			
<b>Stockage des données / Communication</b>			Station totale avec GEB211 et embase	5.1 kg	✓	
Mémoire interne	Max. : 100 000 points Max. : 60 000 mesures	✓	<b>Environnement</b>			
Interfaces	- Série (Vitesse de transfert allant jusqu'à 115 200) - USB Type A et mini B - Technologie sans fil Bluetooth®, classe 1, 150 m - > 1000 m (avec TCP529)	✓ ✓ ✓ ○	Plage de température (en fonctionnement)	-20° C à +50° C Version Arctique : de -35° C à +50° C	✓ ○	
Format des données	GSI / DXF / LandXML / CSV / Formats ASCII définissables par l'utilisateur	✓	Poussière / Eau (CEI 60529) Humidité	IP55, 95% sans condensation	✓	
<b>Aide à l'alignement (EGL)</b>			<b>Logiciel embarqué Leica FlexField plus</b>			
Plage de travail (conditions atmosphériques moyennes)	5 m - 150 m	○	<b>Programmes d'Applications (inclus) :</b> Lever incluant la visualisation de carte; Implantation; Mise en station incluant : Résection, Résection Locale, Résection Helmert, Orientation (Angles et Coordonnées), Transfert d'Altitude; Calcul de Surface (Plan & Surface); Calcul de Volumes; Distance entre points; Altitude de points inaccessibles; Points Cachés; Contrôle d'orientation; Décalage; Ligne de Référence; Arc de référence; Plan de référence; Road 2D; COGO			✓
Précision de positionnement	5 cm à 100 m	○	<b>Programmes d'Applications Supplémentaires :</b> Road 3D, Traverse			○
			<b>Protection Antivol</b>			
			mySecurity, Code PIN/PUK		✓✓	

### Comparatif des modèles : Configurations et Options des Stations Totales Manuelles

	TS02plus	TS06plus	TS09plus	Viva TS11
Précision angulaire à 1"	-	○	○	○
Précision de mesure améliorée vers un prisme	1.5 mm + 2 ppm	1.5 mm + 2 ppm	1.5 mm + 2 ppm	1.0 mm + 1.5 ppm
Mesure de distance sans réflecteur	500 m en option	500 m en standard / 1000 m en option	500 m en standard / 1000 m en option	500 m en standard / 1000 m en option
Affichage	Noir & Blanc haute résolution	Noir & Blanc haute résolution	Tactile Couleurs Q-VGA	Tactile Couleurs Full-VGA
Clavier Alpha-numérique complet avec touches de fonction	-	✓	✓	✓
Second clavier	○	○	○	○
Clavier Rétro-éclairé	-	-	✓	✓
Aide à l'alignement (EGL)	-	○	✓	✓
USB Type A et mini B	-	✓	✓	✓
Technologie sans fil Bluetooth®	-	✓	✓	✓
Carte SD	-	-	-	✓
Imagerie	-	-	-	○
Smart Station GNSS	-	-	-	○
Logiciel embarqué	FlexField plus (standard)	FlexField plus (avancé)	FlexField plus (complet)	SmartWorx Viva (pro)

#### Légende :

- 1) Ecart-type ISO-17123-3
- 2) Couvert, sans humidité, avec visibilité d'environ 40 km; pas de reflet dû à la chaleur.
- 3) Ecart-type ISO-17123-4
- 4) Prisme en mode rapide et précis
- 5) Dans des conditions optimales sur carte Gris Kodak (90% de réflectivité).

- 6) Portée > 500 m 4 mm + 2 ppm
- 7) Une mesure toutes les 30 secondes à 25° C. L'autonomie de la batterie peut varier si elle n'est pas neuve. Batterie interne GEB222.

- 8) Le temps de mesure sans réflecteur peut varier en fonction des objets mesurés, de l'emplacement d'observation et des conditions environnementales.
- 9) Avec Option R500 avec mesure sans prisme
- 10) Avec option R1000 avec mesure sans prisme

- ✓ Inclus
- Option
- Non disponible

# Le second Plus : Caractéristiques éprouvées pour de Réels Bénéfices



## Clé USB

- Pour un transfert de données simple et rapide

## Communication Sans Fil Bluetooth®

- Pour connecter un carnet sans fil



## Aide à l'alignement électronique (EGL)

- Pour une visée plus rapide



## FlexField plus

- Logiciel embarqué moderne et intuitif pour une meilleure productivité



## Accessoires indispensables

- Une gamme complète d'outils, tels qu'un plomb laser, afin d'augmenter votre productivité



## EDM PinPoint

- Le plus précis (1.5 mm + 2 ppm)
- Ultra rapide (1 seconde)
- > 1000 mètres sans prisme
- Pointeur Laser coaxial et faisceau pour la mesure



## Clavier Alpha-numérique

- Utilisation rapide et sans erreur



## Ecran large Haute Résolution

- Visualisation optimale sur cet écran très haute résolution



## Version Arctique

- Pour une utilisation à -35° C



## mySecurity

- Une protection réseau unique contre le vol





Scannez ici  
pour voir les  
vidéos

Que vous souhaitiez mesurer des parcelles ou des objets sur un chantier, déterminer des points de façade ou d'intérieur, les coordonnées d'un pont ou d'un tunnel, les stations totales de Leica Geosystems sont là pour vous fournir la solution.

Vous obtenez des résultats fiables simplement grâce à des applications conviviales. Nos stations totales sont conçues pour répondre à vos attentes. Vous utiliserez les dernières technologies vous garantissant productivité et rapidité.

- when it has to be right.

 **Swiss Technology**  
by Leica Geosystems



**Total Quality Management –  
Notre engagement pour vous  
satisfaire totalement**

**Distancemètre (RL) :**  
(PinPoint R500 / R1000) :  
Laser classe 3R selon  
CEI 60825-1, EN 60825-1

**Plomb Laser :**  
Laser classe 2 selon  
CEI 60825-1, EN 60825-1

**Distancemètre (IR) :**  
(Mode Prisme)  
Laser classe 1 selon  
CEI 60825-1, EN 60825-1

**Aide à l'alignement (EGL) :**  
LED classe 1 selon  
CEI 60825-1, EN 60825-1

La marque et les logos  
**Bluetooth®** sont la propriété  
de Bluetooth SIG, Inc. et leur  
utilisation par Leica Geosystems  
AG s'effectue sous licence.

Les autres désignations  
commerciales et marques  
mentionnées sont détenues par  
leur propriétaire respectif.

Photo de couverture :  
Horizon de Dubai

Illustrations, descriptions et données techniques non contractuelles. Tous droits réservés. Imprimé en Suisse –  
Copyright Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Suisse, 2013. 789490fr – 06.15 – galledia



Brochure  
**FlexLine  
TS02plus**



Brochure  
**FlexLine  
TS09plus**



Brochure  
**FlexField plus &  
FlexOffice**



Brochure  
**Viva TS11**



Brochure  
**Accessoires  
d'Origine**

Pour plus d'informations et de documentations à propos de  
Leica FlexLine plus, visitez [www.leica-geosystems.fr](http://www.leica-geosystems.fr)