Université du Québec
à Rimouski

DÉTECTION DES DELTA P DANS LA SÉCURISATION DES INTERVENTIONS SUBAQUATIQUES SUR LES BARRAGES CAS DES TECHNOLOGIES À EFFET DOPPLER

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en ingénierie

en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences appliquées (M.Sc.A.)

PAR

© JORIS LECOMTE

Février 2022

Composition du jury :

Jean-François Méthot, président du jury, UQAR

Jean Brousseau, directeur de recherche, UQAR

Daniel Bourgault, codirecteur de recherche, ISMER

Franck Sgard, examinateur externe, IRSST

Dépôt initial le 08/11/2021 Dépôt final le 02/02/2022

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

REMERCIEMENTS

Je remercie en tout premier lieu mon directeur de recherche Jean BROUSSEAU pour son suivi, ses conseils constructifs et sa bienveillance tout au long du projet. Je souhaiterais également remercier Daniel BOURGAULT pour son aide précieuse et sa disponibilité permanente.

Je souhaiterais ensuite remercier l'ensemble du personnel d'Innovation Maritime pour m'avoir accompagné et donné les moyens de réaliser ce projet. J'aimerais chaleureusement remercier l'ensemble de l'équipe d'ingénierie pour m'avoir accompagné et conseillé, de près comme de loin. J'adresse tout particulièrement mes remerciements à Éric PERREAULT pour son encadrement, son professionnalisme et sa pédagogie à mon égard. Ce fut un réel plaisir d'être encadré dans de telles conditions.

Je remercie également Augustin DELCAMBRE et Marie DIXNEUF avec qui j'ai pu partager ces années d'études. Leur soutien direct et indirect a été d'une réelle utilité pour la réalisation de ce mémoire.

Je tiens finalement à remercier mes parents pour leur soutien infaillible depuis le début de mes études et particulièrement pour la réalisation de ce mémoire.

RÉSUMÉ

Les interventions des plongeurs-scaphandriers aux abords des barrages nécessitent la plus grande vigilance afin d'assurer la sécurité des intervenants. Au-delà des difficultés ordinaires rencontrées en plongée sous-marine, les interventions proches de ces structures présentent de réels risques de courants puissants et très localisés communément appelés phénomènes de "delta P" désignant les différentiels de pressions. Ces courants sont alors capables d'emporter les plongeurs puis de les plaquer contre la paroi du barrage. Une fois pris au piège, il leur est quasiment impossible de s'en sortir seul, ce qui en fait la principale cause de décès dans ce secteur.

L'objectif du projet de recherche est d'étudier l'application des technologies à effet Doppler utilisé en océanographie. L'étude explore principalement l'utilisation du Profileur Acoustique à Effet Doppler (ADCP) pour détecter les delta P et ainsi sécuriser les interventions de plongées. Pour ce faire, une présentation des trois principaux instruments utilisés en océanographie permet d'approcher le potentiel théorique de chacun dans la détection des delta P. Ensuite, l'ADCP est spécifiquement étudié et mis en situation expérimentale à travers différentes expériences. Ceci permet d'obtenir des résultats expérimentaux afin d'analyser son comportement et de réaliser un programme informatique permettant de décider de la présence ou non du delta P. Ce programme s'appuie sur le principe des tests d'hypothèse.

L'ADCP permet en règle générale de détecter les variations des vitesses issues du delta P. Cependant, les conditions d'utilisations et le principe même de l'ADCP entrainent des grandes contaminations de mesures de vitesses, notamment dues aux interférences des émissions secondaires, principales limites dans notre cas. Celui-ci entraine des mesures de vitesses fausses et vient parfois écraser les variations de vitesse issues du delta P. Ceci complique de surcroit la détection des delta P. Le programme informatique basé sur le principe des tests d'hypothèse s'avère quant à lui encourageant pour conclure sur la présence d'un delta P.

Mots clés : Plongée sous-marine, delta P, ADCP, effet Doppler, courantomètres, test d'hypothèse, barrages

ABSTRACT

The interventions of scuba divers in the vicinity of dams require the utmost vigilance in order to ensure the safety of those involved. Beyond the usual difficulties encountered in scuba diving, interventions near these structures present real risks of powerful and very localized currents commonly called "delta P", acronym of pressure differentials. These currents are then capable of carrying away the divers and then of pressing them against the wall of the dam. Once trapped, it is almost impossible for them to get out alone, which makes it the main cause of death in this sector.

The objective of the research project is to study the application of Doppler effect technologies commonly used in oceanography. Mainly, the study explores the potential of the Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) for the detection of delta P and for securing dive sites. To do this, the study presents the three main instruments used in oceanography and discusses their theoretical potential for the detection of delta P. Then, the ADCP is specifically studied and tested in different experimental situations. Results show how an ADCP behaves in the proximity of a Delta-P. A computer program processes the data and decides whether there is or not a delta P. This program is based on the principle of hypothesis testing.

In general, the ADCP is able to detect the variations of speed resulting from the delta P. However, the conditions of uses and the working principles of the ADCP involve important contaminations of speed measures due to sidelobe interference, principal limit in our case. This leads to false velocity measurements that can overwrite the velocity variations resulting from the delta P. This further complicates the detection of delta P. The computer program based on statistical hypothesis shows potential to decide whether or not there is a delta-P.

Keywords: Scuba diving, delta P, differential pressure hazards, ADCP, Doppler hydroacoustic current meters, statistical hypothesis test, dams

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS vii

RÉSUMÉ ix

ABSTRACT xi

TABLE DES MATIÈRES xiii

LISTE DES TABLEAUX xix

LISTE DES FIGURES xxi

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES xxv

LISTE DES SYMBOLES xxvii

INTRODUCTION GÉNÉRALE 1

CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE 5

1.1 INTRODUCTION 5

1.2 PLONGÉE COMMERCIALE, SECTEUR À HAUT RISQUE 5

1.2.1 Plongée commerciale : définition 5

1.2.2 Pratique à haut risque 6

1.2.3 Analyse des principales causes d'accidents 7

1.2.4 Tendance d'évolution des accidents de plongées 8

1.3 DELTA P 8

1.3.1 Définition du Delta P 8

1.3.2 Principe de fonctionnement 10

1.3.3 Dangerosité du Delta P 12

1.3.4 Définition d'une distance critique 16
1.3.5 Ajustement selon la configuration du Delta P 16
1.3.6 Cas des barrages 18
1.3.7 Sources de Delta P 18
1.3.8 Méthodes de localisation 19
1.4 EFFET DOPPLER : PRINCIPES ET INSTRUMENTS 21
1.4.1 Introduction 21
1.4.2 Effet Doppler : Principe de fonctionnement 21
1.4.3 Application en océanographie : effet Doppler successif 23
1.4.4 Lien entre la vitesse du fluide et les particules 24
1.4.5 Vitesse radiale 24
1.4.6 Technologie à large bande 26
1.4.7 Vitesses tridimensionnelles et systèmes de coordonnées 28
1.4.8 Technologies à effet Doppler 29
1.5 LIMITES DU PROFILEUR ACOUSTIQUE À EFFET DOPPLER 34
1.5.1 Résumé de l'ADCP 34
1.5.2 Vitesses obtenues à partir des particules flottantes 35
1.5.3 Hypothèse d'homogénéité 35
1.5.4 Interférence des émissions secondaires 37
1.5.5 Utilisation des coordonnées terrestres 39
1.5.6 Limites de phase 39
1.5.7 Période blanche 40
1.5.8 Traitement interne de l'ADCP 41
1.5.9 Incertitudes de mesures 43
1.6 CONCLUSION 44
CHAPITRE 2 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIF 45
2.1 PROBLÉMATIQUE 45

2.2 PRÉCISION DE LA PROBLÉMATIQUE 45
2.3 CHOIX DE L'INSTRUMENT ÉTUDIÉ 46
2.4 OBJECTIF 49
CHAPITRE 3 MATÉRIEL ET MÉTHODE 51
3.1 ADCP 51
3.1.1 Définition du besoin pour la détection des delta P 51
3.1.2 Profileur Acoustique à Effet Doppler Idéal 51
3.1.3 Profileur Acoustique Utilisé 52
3.1.4 Potentiel théorique du Sentinel V50 53
3.2 BASSIN EXPÉRIMENTAL 54
3.2.1 Composition 54
3.2.2 Delta P réalisables 57
3.3 LIMITES DUES À L'UTILISATION DE L'ADCP DANS LE BASSIN 58
3.3.1 Effet des parois du bassin sur les mesures 58
3.3.2 Non utilisation des vitesses tridimensionnelles 59
3.4 PARAMÈTRES DES ESSAIS 60
3.4.1 Utilisation de la vitesse radiale du faisceau verticale 60
3.4.2 Positionnement de l'ADCP dans le bassin 60
3.4.3 Étude effectuée sur 5 cellules 62
3.5 DESCRIPTIFS DES EXPÉRIENCES 62
3.5.1 Expérience I : Comportement de l'ADCP dans des conditions idéales d'utilisation – Test de répétabilité 64
3.5.2 Expérience II : Influence de la position de l'ADCP par rapport au delta P 65
3.5.3 Expérience III : Diminution de la zone de dangerosité sans diminution de la vitesse du fluide 66
3.5.4 Expérience IV : Différentes formes de Delta P 66
3.6 MODÈLE PROBABILISTE DU TEST D'HYPOTHÈSE 67

3.6.1 Introduction aux tests d'hypothèses 68
3.6.2 Construction des tests d'hypothèse 68
3.6.3 Erreurs potentielles 69
3.6.4 Réalisation 70
3.6.5 Tests explorés 74
3.6.6 Test 1 : Test paramétrique sur la moyenne 74
3.6.7 Test 2 : Comparaison de moyennes 75
3.6.8 Test 3 : Comparaison de variances 77

CHAPITRE 4 RÉSULTATS ET ANALYSES 79

4.1 INTRODUCTION 79
4.1.1 Présentation d'une courbe 79
4.1.2 Analyse d'un essai préliminaire 80
4.2 RÉSULTATS DE L'EXPÉRIENCE I – COMPORTEMENT DE L'ADCP DANS DES CONDITIONS OPTIMALES D'UTILISATION – TEST DE RÉPÉTABILITÉ 83
4.2.1 Présentation et analyse des résultats – Cellule 4 83
4.2.2 Présentation et analyse des résultats - Cellule 5 86
4.3 RÉSULTATS DE L'EXPÉRIENCE II – INFLUENCE DE LA POSITION DE L'ADCP 89
4.3.1 Présentation et analyse des résultats – Cellule 4 89
4.3.2 Présentation et analyse des résultats – Cellule 5 92
4.4 RÉSULTATS DE L'EXPÉRIENCE III - DIMINUTION DE LA ZONE DE DANGEROSITÉ 95
4.4.1 Présentation et analyse des résultats – Cellule 4 95
4.4.2 Présentation et analyse des résultats - Cellule 5 98
4.5 RÉSULTATS DE L'EXPÉRIENCE IV.A - DELTA P VERTICAL 101
4.5.1 Présentation et analyse des résultats - Cellule 4 101
4.5.2 Présentation et analyse des résultats - Cellule 5 103
4.6 RÉSULTATS DE L'EXPÉRIENCE IV.B - DELTA P RECTANGULAIRE 104
4.6.1 Présentation et analyse des résultats – Cellule 4 104

4.6.2 Présentation et analyse des résultats - Cellule 5 106
4.7 RÉSULTATS DES TESTS D'HYPOTHÈSE 108
4.7.1 Résultats du test 1 : Test paramétrique sur la moyenne 108
4.7.2 Résultats du test 2 : Comparaison de moyennes 112
4.7.3 Résultats du test 3 : Comparaison de variances 116
4.8 SYNTHÈSE DES ANALYSES 120
CHAPITRE 5 DISCUSSION 123
5.1 INTRODUCTION 123
5.2 PROFIL D'ÉCOULEMENT OBTENU PAR SIMULATION 124
5.2.1 Simulation delta P horizontal 124
5.2.2 Simulation delta P vertical 128
5.2.3 Simulation delta P rectangulaire 130
5.2.4 Comparaison avec les résultats de l'ADCP 132
5.3 PROBLÈME I : INCERTITUDES DES VITESSES RELATIVES DANS LES CELLULES 4 ET 5 133
5.3.1 Précision de mesure du Sentinel V50 134
5.3.2 Mouvements résiduels du fluide 134
5.3.3 Particules flottantes toujours en mouvement 135
5.3.4 Interférence des émissions secondaires 136
5.3.5 Synthèse des paramètres contaminant les vitesses 138
5.4 PROBLÈMES II : FACTEURS FAVORISANT L'INTERFÉRENCE DES ÉMISSIONS SECONDAIRES 139
5.4.1 Influence de la hauteur d'eau sur les mesures 140
5.4.2 Orientation de l'ADCP durant le test 141
5.4.3 Conclusion 143
5.5 RÉSULTATS DES EXPÉRIENCES 143

5.5.1 Expérience I – Comportement de l'ADCP dans des conditions optimales d'utilisation - Test de répétabilité 144
5.5.2 Expérience II – Influence de la position de l'ADCP 145
5.5.3 Expérience III – Diminution de la zone de dangerosité 147
5.5.4 Expérience IV.A – Delta P Vertical 150
5.5.5 Expérience IV.B – Delta P rectangulaire 152
5.5.6 Conclusion des expériences 153
5.6 DÉTECTION DES DELTA P – TESTS D'HYPOTHÈSE 155
5.6.1 Introduction 155
5.6.2 Vérification de la distribution normale des vitesses 156
5.6.3 Comportement du test 1 – Test paramétrique sur la moyenne 158
5.6.4 Comportement du test 2 – Comparaison de moyennes 160
5.6.5 Comportement du test 3 – Comparaison de variances 162
5.6.6 Comparaison des trois tests 163
5.7 CONCLUSION DE LA DISCUSSION 165
CONCLUSION GÉNÉRALE 167
Annexes 171
ANNEXE I : PARAMÈTRES DU SENTINEL V50 DE TELEDYNE RDI 171
ANNEXE II : MISES EN PLAN DE LA STRUCTURE PORTANTE 173
ANNEXE III : MODÉLISATION D'UN DELTA P SUR SOLIDWORKS FLOWSIMULATION 175
ANNEXE IV : COURBES COMPLÉMENTAIRES 178
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 185

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Équations caractérisant un delta P selon la configuration de l'écoulement 17

Tableau 2 : Analyse préliminaire des cinq premières cellules 81

Tableau 3 : Résultats de l'expérience I – conditions optimales - Cellule 4 84

Tableau 4 : Résultats de l'expérience I – conditions optimales - Cellule 5..... 87

Tableau 5 : Résultats de l'expérience II – élévation de l'ADCP - Cellule 4..... 90

Tableau 6 : Résultats de l'expérience II – élévation de l'ADCP - cellule 5 93

Tableau 7 : Résultats de l'expérience III – Augmentation du débit - Cellule 4 96

Tableau 8 : Résultats de l'expérience III - Cellule 5..... 99

Tableau 9 : Résultats de l'expérience IV – Delta P vertical - Cellule 4..... 102

Tableau 10 : Résultats de l'expérience IV – Delta P vertical - Cellule 5..... 103

Tableau 11 : Résultats de l'expérience IV - Delta P fissure - Cellule 4..... 105

Tableau 12 : Résultats de l'expérience IV - Delta P fissure - Cellule 5..... 106

Tableau 13 : Résultats du test d'hypothèse 1 - Cellule 4 109

Tableau 14 : Résultats du test d'hypothèse 1 - Cellule 5 111

Tableau 15 : Résultats du test d'hypothèse 2 - Cellule 4 113

Tableau 16 : Résultats du test d'hypothèse 2 - Cellule 5 115

Tableau 17 : Résultats du test d'hypothèse 3 - Cellule 4 117

Tableau 18 : Résultats du test d'hypothèse 3 - Cellule 5 119

Tableau 19 : Influence de l’ouverture de la vanne – Expérience III - Cellule 4 148

Tableau 20 : Résultats des vitesses au sein des cellules 4 et 5 sur l’essai de 10 heures 178

Tableau 21 : Évolution de la vitesse dans la cellule 4 lors de l'allumage des pompes 180

Tableau 22 : Évolution de la vitesse dans la cellule 5 lors de l'allumage des pompes 182

Tableau 23 : Résultats de l'expérience IV – Delta P vertical - Cellule 3..... 183

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Delta P naturel dû à une différence de hauteur d'eau aux abords d'un barrage 9

Figure 2 : Delta P dû à un différentiel naturel de pression entre l'extérieur et l'intérieur d'un oléoduc 9

Figure 3 : Delta P provoqué mécaniquement dû à la rotation de l'hélice 10

Figure 4 : Illustration de la théorie de la demi-sphère 13

Figure 5 : Évolution de la vitesse du fluide pour une différence de hauteur d'eau de 10m en fonction de la distance au delta P pour tout $R>R_{disque} = 0,1m$ 15

Figure 6 : Illustration de l'Effet Doppler 22

Figure 7 : Illustration de l'effet Doppler successif utilisé par les technologies à effet Doppler 23

Figure 8 : Illustration de l'effet Doppler selon la vitesse radiale d'une particule en mouvement. 25

Figure 9 : Angle entre l'axe de propagation de l'onde et l'axe de déplacement des particules en suspension 26

Figure 10 : Principe de fonctionnement des technologies à large bande 27

Figure 11 : Représentation d'un vélocimètre acoustique à effet Doppler 29

Figure 12 : Profileur Acoustique à Effet Doppler 30

Figure 13 : Illustration du découpage de la colonne d'eau en N cellules le long de l'axe de l'ADCP 31

Figure 14 : Correction effectuée par l'ADCP afin d'aligner les cellules selon la même profondeur 32

Figure 15 : Schéma d’un courantomètre à effet Doppler à une seule cellule 33

Figure 16 : Biais de mesures issus de l’hypothèse d'homogénéité 36

Figure 17 : Illustration de la zone contaminée à cause des ondes secondaires 38

Figure 18 : Illustration de la limite du décalage de phase à 360° 40

Figure 19 : Résumé du traitement interne à l’ADCP 41

Figure 20 : Fonction triangulaire de pondération pour l'approximation des vitesses de chaque cellule 42

Figure 21 : Comparaison entre le courantomètre traditionnel à mesures localisées et l’ADCP 48

Figure 22 : Sentinel V50 de Teledyne RD instruments 52

Figure 23 : Bassin delta P chez Innovation Maritime 54

Figure 24 : Mur de poutrelles séparant l'amont et l'aval du barrage (bassin vide) 55

Figure 25 : Module supérieur et module inférieur du bassin 55

Figure 26 : Vannes papillon du module inférieur permettant d'activer un delta P 56

Figure 27 : Différentiel de hauteur d'eau de 3m 56

Figure 28 : Module inférieur et les trois formes de delta P 57

Figure 29 : Illustration de l'effet des parois du bassin sur les mesures obtenues par l'ADCP 58

Figure 30 : Structure portante utilisée pour positionner l’ADCP 61

Figure 31 : Positionnement à sec de l'ADCP pour l'expérience I 65

Figure 32 : Résumé des risques de première et deuxième espèce 70

Figure 33 : Processus de récupération des intervalles de références et d'échantillon utilisés pour les tests d'hypothèse 73

Figure 34 : Courbe de vitesses de la cellule 2 dans un cas de delta P 80

Figure 35 : Profil de vitesse obtenu par simulation de l'écoulement dû au delta P circulaire horizontal 1,5 s après l'ouverture de la vanne 125

Figure 36 : Évolution théorique de la vitesse radiale sur l'axe d'orientation de l'ADCP dans l'expérience I obtenue par simulation 126

Figure 37 : Évolution théorique de la vitesse maximale en fonction du temps suite à la diminution de la différence de hauteur d'eau 127

Figure 38 : Profil de vitesse obtenu par simulation de l'écoulement dû au delta P circulaire vertical 1,5 s après l'ouverture de la vanne 128

Figure 39 : Évolution théorique de la vitesse radiale sur l'axe d'orientation de l'ADCP dans l'expérience IV.A obtenue par simulation 129

Figure 40 : Profil de vitesse obtenu par simulation de l'écoulement dû au delta P rectangulaire 1,5 s après l'ouverture de la vanne 130

Figure 41 : Isosurface 0,5 m/s du delta P rectangulaire 131

Figure 42 : Évolution théorique de la vitesse radiale sur l'axe d'orientation de l'ADCP dans l'expérience IV.B obtenue par simulation 132

Figure 43 : Vu de haut de la position de l'ADCP dans le bassin et des cellules de mesures correspondantes 137

Figure 44 : Angle de tangage durant l'essai 2 de l'expérience I 142

Figure 45 : Angle de tangage durant l'essai 4 de l'expérience III 142

Figure 46 : Courbes des vitesses théoriques au moment d'ouvrir la vanne selon l'angle d'ouverture de la vanne 147

Figure 47 : Distribution des vitesses en phase de préouverture - Expérience III – Essai 4 157

Figure 48 : Configuration du V50 utilisée pour les expériences 171

Figure 49 : Spécifications techniques du Sentinel V50 172

Figure 50 : Axes de l'ADCP 173

Figure 51 : Structure portante - Assemblage Général 174

Figure 52 : Structure portante – Spécifications 175

Figure 53 : Modélisation de la différence de hauteur d'eau de 2,4 m dans la zone amont du bassin (partie bleue) – la zone aval est vide et considérée remplie d’air ambiante 176

Figure 54 : Illustration du maillage utilisé pour le du delta P horizontal 177

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

UQAR	Université du Québec à Rimouski
ISMER	Institut des Sciences de la Mer de Rimouski
IRSST	Institut de Recherche Robert-Sauvé en Santé et en Sécurité du Travail
IMAR	Innovation Maritime
Delta P	Différentiel de Pression
ADCP	Profileur Acoustique à Effet Doppler [Acoustic Doppler Current Profiler]
DPDZ	Zone de Danger de Différentiel de pression [Differential Pressure Danger Zone]
ROV	Véhicule sous-marin téléguidé [Remotely Operated underwater Vehicle]
XYZ	Système de coordonnées cartésiennes propre à l'ADCP
ENU	Système de coordonnées terrestre (Est, Nord, Haut) [East, North, Up]
ADV	Vélocimètre Acoustique à effet Doppler [Acoustic Doppler Velocimeter]
χ^2	Loi du « khi-deux »
M_AO	Moyenne avant ouverture
ET_AO	Écart-type avant ouverture
M_AE	Moyenne après équilibre

ET_AE Écart-type après équilibre

RSSI Indicateur d'Intensité du Signal Reçu [Received Signal Strength Indication]

LISTE DES SYMBOLES

$\mathbf{V_{fluide}}$	Vitesse du fluide (m/s)
$\mathbf{\Delta P}$	Différence de pression (Pa)
$\mathbf{\rho_{fluide}}$	Masse volumique du fluide (kg/m^3)
$\mathbf{F_x}$	Force de trainée (N)
$\mathbf{S_{plongeur}}$	Section transversale du plongeur (m^2)
$\mathbf{C_x}$	Coefficient de trainée du plongeur dans le fluide
$\mathbf{F_{succion}}$	Force de succion (N)
$\mathbf{S_{ouverture}}$	Surface d'ouverture caractéristique du delta P (m^2)
$\mathbf{D_v}$	Débit volumique (m^3/s)
$\mathbf{S_{disque}}$	Surface du disque (m^2)
$\mathbf{R_{disque}}$	Rayon d'un disque (m)
$\mathbf{D_{v,demi\text{-}sphère}}$	Débit volumique passant à travers une demi-sphère (m^3/s)
$\mathbf{S_{demi\text{-}sphère}}$	Surface d'une demi-sphère (m^2)
R	Rayon d'une demi-sphère (m)
DPDZ	Distance définissant la Zone de Danger de Différentiel de pression (m)
$\mathbf{f_c}$	Coefficient correctionnel du modèle d'écoulement

ΔH	Différence de hauteur d'eau (m)
g	Accélération de la pesanteur (m/s^2)
ΔF	Différence de fréquence (Hz)
V	Vitesse entre une source et un récepteur d'ondes (m/s)
$V_{radiale}$	Composante radiale de la vitesse entre une source et un récepteur d'ondes (m/s)
C	Vitesse du son dans le milieu de propagation de l'onde (m/s)
F_{source}	Fréquence de l'onde émise par la source (Hz)
θ	Angle entre l'axe de propagation de l'onde et l'axe de déplacement des particules (rad)
$\Delta\varphi$	Déphasage (rad)
Δt	Durée entre deux phénomènes (s)
R_{max}	Distance maximale théorique sans contamination des émissions secondaires (m)
D	Distance entre l'ADCP et la structure physique (m)
H_0	Hypothèse nulle « Il n'y a pas de delta P »
H_A	Hypothèse alternative « Il y a présence d'un delta P »
γ	Angle entre les transducteurs et l'axe principal de l'ADCP (rad)
α	Risque de première espèce

β	Risque de deuxième espèce
$I_{éch}$	Intervalle de mesures de vitesses composant l'échantillon
$N_{éch}$	Nombre de valeur de vitesse composant $I_{éch}$
$V_{éch}$	Vitesse moyenne de l'échantillon $I_{éch}$ (cm/s)
$\sigma_{éch}$	Écart-type de l'échantillon $I_{éch}$
$I_{réf}$	Intervalle de mesures de vitesses utilisé comme référence
$N_{réf}$	Nombre de valeur de vitesse composant $I_{réf}$
$V_{réf}$	Vitesse moyenne de l'intervalle $I_{réf}$ (cm/s)
$\sigma_{réf}$	Écart-type de l'intervalle de référence $I_{réf}$
$N_{mesures}$	Nombre de valeur de vitesse radiale mesurée durant un essai par cellule
D_{essai}	Durée de l'essai (s)
T_{mesure}	Période entre deux mesures de vitesses (s)
valeur-p	Critère de décision pour un test d'hypothèse
α_{seuil}	Seuil de risque accepté (%)
$u_{1-\frac{\alpha_{seuil}}{2}}$	Quantile d'ordre $1-\frac{\alpha_{seuil}}{2}$ de la loi normale centrée réduite
T	Variable aléatoire du test de comparaison de moyennes
$t_{1-\frac{\alpha_{seuil}}{2}}(\upsilon)$	Quantile d'ordre $1-\frac{\alpha_{seuil}}{2}$ de la loi de Student à υ degrés de liberté
Y	Variable aléatoire du test de comparaison de variances

$\boldsymbol{\sigma_0}$	Écart-type de référence pour le test de comparaison de variances
$\boldsymbol{\chi^2_{\frac{\alpha_{seuil}}{2}}(N_{éch}-1)}$	Quantile d'ordre $\frac{\alpha_{seuil}}{2}$ de la loi du $\boldsymbol{\chi^2}$ à $N_{éch}$-1 degrés de liberté

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Présentation du contexte

Cette recherche a été réalisée en collaboration avec Innovation Maritime, un organisme missionné de contribuer au développement du secteur maritime par le biais de l'innovation. Innovation Maritime a auparavant effectué différents travaux sur les différentiels de pressions et construit pour leurs études un bassin expérimental permettant de simuler l'environnement de travail des plongeurs proche des barrages. Le présent projet de recherche s'applique dans la continuité de la lutte contre les courants dangereux induits par les différentiels de pressions en plongée sous-marine.

Problématique

Les interventions des plongeurs-scaphandriers aux abords des barrages nécessitent la plus grande vigilance afin d'assurer la sécurité des intervenants. Au-delà des difficultés ordinaires rencontrées en plongée, les interventions proches de ces structures présentent de réels risques de courants puissants et très localisés dus à un différentiel de pression important, communément appelé phénomène de delta P. Ces courants sont alors capables d'emporter les plongeurs puis de les plaquer contre la paroi du barrage. Une fois pris au piège, il leur est quasiment impossible de s'en sortir seul, ce qui en fait la principale cause de décès dans ce secteur (Hermans, 2016). Afin de détecter les delta P, les plongeurs professionnels n'utilisent actuellement pas d'appareils de mesures performants et fiables (Fisher, Gilbert, & Anthony, 2009).

D'après la littérature, les technologies à effet Doppler ont fait leur apparition dans les années 1980 dans le monde océanographique. Celles-ci ont révolutionné les méthodes de

mesures de vitesses des écoulements d'eau et sont depuis en constante évolution. Elles sont par exemple utilisées afin d'obtenir des profils d'écoulement dans l'océan, d'approximer les débits des rivières ou encore afin de mesurer précisément des écoulements turbulents. Ces instruments peuvent également être couplés avec un système inertiel permettant d'obtenir les vitesses du fluide tout en se déplaçant (Mueller, Wagner, Rehmel, Oberg, & Rainville, 2013). Cependant, le principe d'utilisation entraine certaines limites réduisant la fiabilité des mesures de vitesses obtenues (Nortek, 2018, 2019; TeledyneRDI, 2011). Dans ce contexte, nous nous demandons donc si une application des technologies à effet Doppler pourrait être envisagée en plongée sous-marine afin de détecter les courants dangereux provoqués par les delta P et ainsi sécuriser les interventions des scaphandriers.

Objectifs et méthodes

Conformément à la problématique, l'objectif général du présent projet de recherche est d'étudier l'application des appareils issus de la technologie à effet Doppler dans la détection des delta P. Cela afin de sécuriser les interventions de plongée sous-marine aux abords des barrages.

À notre connaissance il n'y a pas eu d'application des instruments à effet Doppler pour la détection des delta P en plongée sous-marine. Pour cette raison, un portrait théorique du potentiel des trois appareils utilisés en océanographie pour mesurer les vitesses du courant sera dressé dans l'étude. Des essais expérimentaux en utilisant le bassin d'Innovation Maritime permettra de tester plus concrètement l'utilisation du Profileur Acoustique à Effet Doppler (ADCP) dans des cas de delta P. Enfin, nous nous proposons également de concevoir une procédure informatisée s'appuyant sur les données des vitesses mesurées par l'ADCP pour déterminer s'il y a présence ou non d'un delta P. Cette procédure sera réalisée sur Matlab.

Plan du mémoire

Le mémoire est divisé en cinq chapitres. Le premier chapitre est conçu de façon à présenter les notions de base sur la plongée sous-marine, le principe des delta P et enfin les technologies émergentes à effet Doppler utilisées en océanographie. Le second chapitre précise la problématique et les objectifs du présent mémoire. Le troisième chapitre permet de définir l'ensemble du matériel utilisé et précise la méthode choisie pour répondre à notre problématique. Le quatrième chapitre permet de présenter l'ensemble des résultats obtenus. Ceux-ci font l'objet d'une discussion composant ainsi le cinquième chapitre. Une conclusion générale permettra enfin de clore l'étude.

CHAPITRE 1
REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 INTRODUCTION

Ce présent chapitre fait état des connaissances actuelles nécessaires à la compréhension du présent mémoire. Dans un premier temps, le sous-chapitre 1.2 présente le milieu de la plongée commerciale et met en lumière le caractère dangereux de ce secteur d'activité. La section 1.3 présente le concept d'un différentiel de pression. Il s'agit ici d'exposer son fonctionnement théorique, ce qui le rend dangereux ainsi que d'énoncer les moyens actuels utilisés pour le détecter. La section 1.4 présente une technologie émergente en océanographie, s'appuyant sur le principe de l'effet Doppler. Cette section résume le principe de fonctionnement nécessaire à la compréhension du présent mémoire. Enfin, la section 1.5 présente les limites actuelles que présentent les profileurs acoustiques à effet Doppler. Il s'agit de l'instrument de mesure qui sera spécifiquement utilisé.

1.2 PLONGÉE COMMERCIALE, SECTEUR À HAUT RISQUE

1.2.1 Plongée commerciale : définition

Les plongeurs-scaphandriers, ou simplement scaphandriers, sont des plongeurs professionnels formés afin d'intervenir professionnellement dans des milieux hyperbares, généralement en milieu subaquatique. La plongée professionnelle, ou plongée commerciale est le terme désignant cette industrie (CCPC, 2021).

Ces professionnels sont formés afin d'assurer un large spectre d'activités qui se font dans le monde industriel. Par exemple, des travaux d'inspection, de réparation, de soudage, de raccordement, de photographie ou encore de relevés scientifiques (Hermans, 2016; HSE, 2010; NIOSH, 2020). Les secteurs d'interventions sont en conséquence également vastes. Nous pouvons citer pour exemples les interventions :

- En mer (dit offshore)
- En terre (dit inland, onland ou inshore)
- Archéologiques
- Policières
- Militaires
- Scientifiques

Le secteur de la plongée commerciale ne doit pas être confondu avec le secteur de la plongée loisir et technique, qui appartiennent tous deux à la pratique de la plongée dite récréative.

1.2.2 Pratique à haut risque

Les interventions hyperbares impliquent naturellement une augmentation du risque et des dangers d'accidents de travail liés à l'environnement. Les conditions d'intervention sont souvent difficiles : manque de visibilité, eaux froides, profondeur et présence de courant. Les plongeurs-scaphandriers sont en conséquence formés afin d'améliorer les connaissances de leur environnement de travail et des risques encourus. (CCPC, 2021; Levée, 2019; NIOSH, 2020)

Malgré toutes ces formations, des accidents graves et mortels ont lieu annuellement partout dans le monde (Hermans, 2016). Les États-Unis représentent la nation comptabilisant

le plus grand nombre de plongeurs commerciaux (environ 3380 plongeurs en 2017). Entre 2011 et 2017, ils comptabilisent 460 accidents du travail non-mortels impliquant des jours d'absences, et 39 accidents mortels. À titre indicatif, le taux de mortalité annuel est 40 fois supérieur au taux de mortalité annuel moyen dans les autres secteurs professionnels (NIOSH, 2020). En France (étude de 2016) ce même facteur de risque est environ 10 fois plus élevé que le facteur de risque dans les autres secteurs (Barré, 2010). En Angleterre (étude de 2010) il est environ 20 fois plus haut (HSE, 2010).

Malgré de nombreuses études sur le nombre d'accidents graves et mortels annuels, peu d'études internationales mettent en évidence leur origine.

1.2.3 Analyse des principales causes d'accidents

Une étude réalisée par Francis Hermans, plongeur retraité, s'appuie sur 577 cas d'accidents mortels ayant eu lieu entre 1975 et 2016 à travers le monde. Ce nombre représente les accidents mortels ayant eu lieu dans quatre secteurs d'activités professionnels à haut risque. Notamment les plus populaires par les scaphandriers : les interventions en mer et en terre.

Il est à noter que l'étude s'appuie sur 577 cas d'accidents mortels survenus dans quatre secteurs d'activités où la nature des travaux était comparable. En plus de ceux-ci, d'autres secteurs de la plongée professionnelle n'ont pas été recensés, mais représentent malgré tout, 457 accidents mortels supplémentaires sur cette même période (Hermans, 2016).

L'étude a permis de révéler que 22% des accidents de plongée commerciale sont la conséquence d'un différentiel de pression, phénomène connu par les plongeurs qu'ils nomment « delta P ». Soit presque le quart des accidents de plongée dans ces secteurs. Ce résultat fait de lui la première cause de mortalité, et ce, de manière assez significative, car la seconde cause d'accidents mortels est celle de noyade, qui représente 12% des cas

d'accidents. Viennent ensuite le phénomène de coincement (11%) puis d'accidents de décompression (8%). Ces quatre causes représentent plus de la moitié des accidents mortels.

1.2.4 Tendance d'évolution des accidents de plongées

En dehors des statistiques, le message fort de l'étude est la tendance d'évolution des accidents de plongée dans le secteur commercial. Bien que l'ensemble des causes tende à être maitrisé et diminue de surcroit le nombre d'accidents, il n'en est pas de même pour celui du phénomène de delta P. En effet, le nombre d'accidents annuel est constant depuis 1975 (Hermans, 2016).

1.3 DELTA P

1.3.1 Définition du Delta P

Un Delta P, appelé aussi ΔP, ou différentiel de pression signifie littéralement « différence de pressions ». Il désigne une différence de pressions entre une partie en amont et une partie en aval d'une structure. En plongée commerciale, on parle de présence d'un delta P lorsque la différence de pressions crée un écoulement potentiellement dangereux de la zone de haute pression vers la zone de plus faible pression. (Fisher et al., 2009; Mitchell et al., 2011)

Un delta P peut être d'origine naturelle ou d'origine mécanique :

- Sur un barrage (Figure 1), l'écoulement est provoqué par la différence de hauteur d'eau entre l'amont et l'aval. Le fluide soumis à son propre poids s'écoule.
- Proche d'un oléoduc (Figure 2), la pression interne de la structure est naturellement différente de la pression externe dans lequel il est immergé. Une ouverture provoquera naturellement un écoulement.

- Enfin, l'écoulement peut être provoqué par le fonctionnement d'une pompe hydraulique ou d'une hélice (Figure 3) par exemple. Dans ces deux cas, le delta P est provoqué mécaniquement.

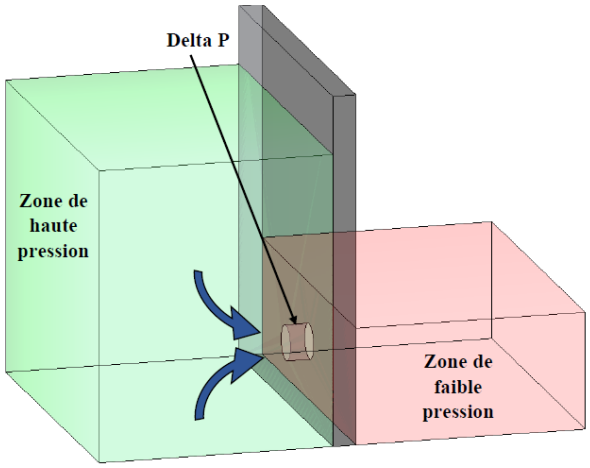


Figure 1 : Delta P naturel dû à une différence de hauteur d'eau aux abords d'un barrage
Source : Adaptée de (Fisher et al., 2009)

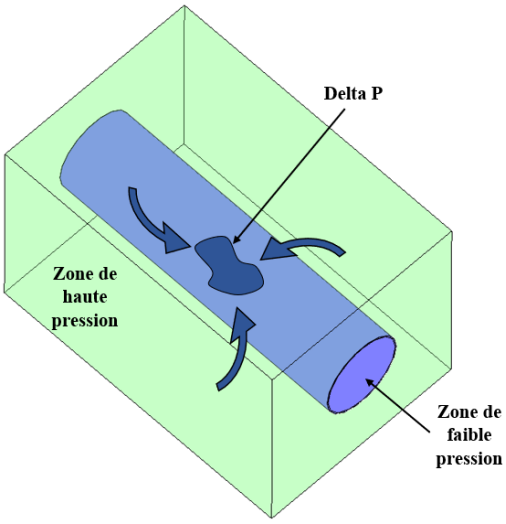


Figure 2 : Delta P dû à un différentiel naturel de pression entre l'extérieur et l'intérieur d'un oléoduc
Source : Adaptée de (Fisher et al., 2009)

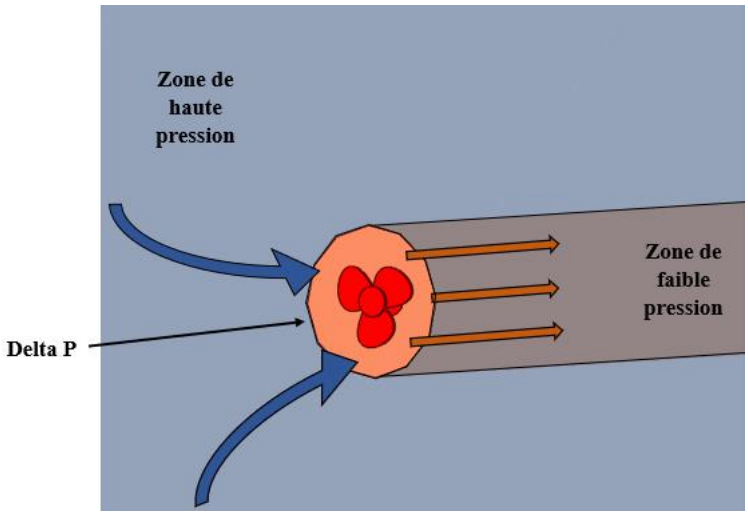


Figure 3 : Delta P provoqué mécaniquement dû à la rotation de l'hélice
Source : Adaptée de (Fisher et al., 2009)

Tant qu'une structure sépare physiquement les deux environnements de pressions différentes, l'écoulement du fluide est impossible et il n'y a pas de danger de delta P.

Le phénomène de delta P ne doit pas être confondu avec les accidents de décompression. Le premier est la conséquence d'un phénomène causé par la différence de pression statique entre deux environnements proches et séparés par une structure physique. Le second désigne la formation de bulles gazeuses dans le corps due à la baisse rapide de la pression environnante du plongeur-scaphandrier (Kleitz, 2008)

1.3.2 Principe de fonctionnement

Lorsque la barrière physique est rompue et qu'une ouverture permet de relier les deux environnements de pressions différentes, le différentiel de pression provoque l'écoulement du fluide à travers celle-ci. La vitesse du courant à proximité de l'ouverture dépend directement de la différence de pression observée à l'ouverture.

En supposant le fluide incompressible et en négligeant sa viscosité, le théorème de Bernoulli nous permet d'obtenir l'égalité :

$$V_{fluide} = \sqrt{\frac{2 * \Delta P}{\rho_{fluide}}} \quad (1)$$

- V_{fluide} est la vitesse du fluide dans l'ouverture (m/s)
- ΔP est la différence de pression entre l'amont et l'aval de l'ouverture (Pa)
- ρ_{fluide} est la masse volumique du fluide (kg/m^3)

La vitesse du courant résultant à proximité de l'ouverture est alors d'autant plus élevée que la différence de pression est importante.

Lorsque le plongeur est immergé dans l'eau en mouvement, il subit naturellement une force due aux frottements du fluide sur lui-même (Fortenbery & Smith, 2014). Cette force est la force de trainé, noté F_x qui est définie par :

$$F_x = \frac{1}{2}\rho_{fluide} V_{fluide}^2 S_{plongeur} C_x \quad (2)$$

- F_x est la force de trainée (N)
- ρ_{fluide} est la masse volumique du fluide (m^3/s)
- V_{fluide} est la vitesse du fluide (m/s)
- $S_{plongeur}$ est la section transversale du plongeur (m^2)
- C_x est le coefficient de trainée du plongeur dans le fluide

Dans un premier temps, le plongeur immergé se fait entrainer par le courant vers l'ouverture du delta P. Très rapidement, le scaphandrier se fait plaquer et le plongeur

obstruera partiellement ou complètement l'ouverture. La force résultante à ce moment est proportionnelle au delta P. Elle est définie par :

$$F_{succion} = S_{ouverture} * \Delta P \quad (3)$$

- $F_{succion}$ est la force de succion résultante (N)
- ΔP est la différence de pression entre l'amont et l'aval de l'ouverture (Pa)
- $S_{ouverture}$ est la surface d'ouverture caractéristique du Delta P (m^2)

En général, la force résultante est si intense qu'un plongeur pris au piège peut rarement s'en sortir seul (Bevan, 2011; Fisher et al., 2009). Plus la taille de l'ouverture sera grande et plus le débit résultant sera élevé. La capacité d'emporter un plongeur-scaphandrier en dépendra.

1.3.3 Dangerosité du Delta P

L'équation (1) nous a permis de faire le lien entre la vitesse du fluide et le delta P. Cependant, la vitesse calculée est celle obtenue entre la partie en aval et la partie en amont d'un delta P, c'est-à-dire dans le cylindre dont la section droite correspond à la surface de l'ouverture. Dans le cas de la Figure 1, cette partie correspond au cylindre séparant la zone aval de la zone amont du barrage. Pour comprendre le deuxième aspect de la dangerosité d'un delta P, intéressons-nous dorénavant à l'évolution de la vitesse à proximité du delta P.

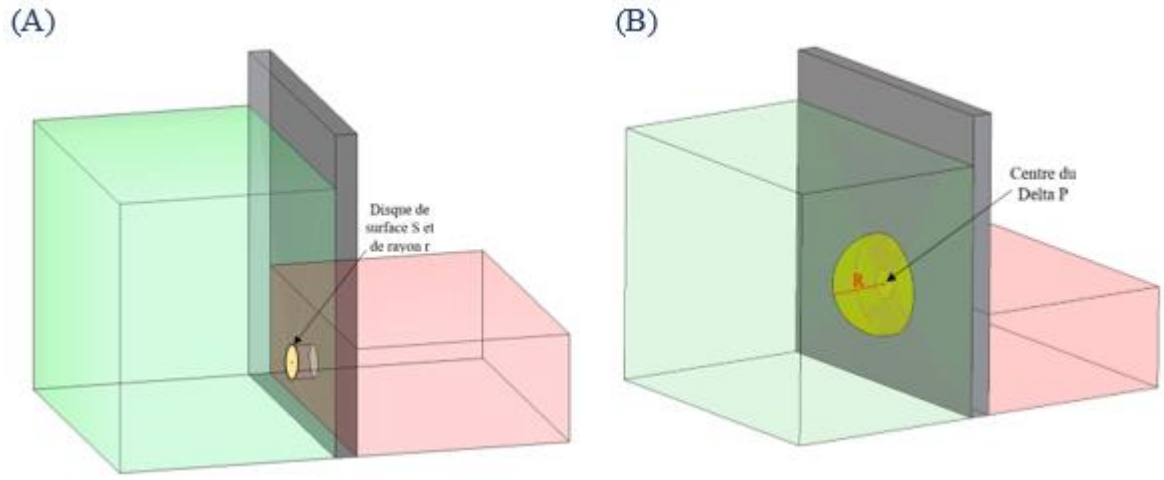
Pour cela, reprenons le cas de la Figure 1 et raisonnons sur le débit. Le débit volumique observé dans l'enceinte même du cylindre est défini à partir de l'équation suivante :

$$D_v = S_{disque} * V_{fluide} \quad (4)$$

- D_v est le débit volumique (m^3/s)

- S_{disque} est la surface du disque (m^2)
- V_{fluide} est la vitesse du fluide (m/s)

Dans le cas d'un delta P sur une paroi, la revue de littérature suggère qu'une bonne approximation de la vitesse peut être faite en considérant que le débit se conserve sur la surface d'une demi-sphère autour du delta P (Fisher et al., 2009; Fortenbery & Smith, 2014; Hermans, 2017; Mitchell et al., 2011). C'est ce que représente la Figure 4.



(A) représentation du disque utilisé (B) surface de la demi-sphère de rayon R

Figure 4 : Illustration de la théorie de la demi-sphère

Pour une pression donnée, le débit passant à travers la surface de la demi-sphère dépend uniquement du rayon R de celle-ci :

$$D_{v,demi-sphère}(R) = S_{demi-sphère}(R) * V_{fluide}(R) \quad (5)$$

Avec :

$$S_{demi-sphère} = 2 * \pi * R^2 \quad (6)$$

- $D_{v,demi-sphère}(R)$ est le débit volumique passant à travers la demi-sphère à la distance R du delta P (m^3/s)
- $S_{demi-sphère}(R)$ est la surface de la demi-sphère à la distance R du delta P (m^2)
- $V_{fluide}(R)$ est la vitesse du fluide à la distance R du delta P (m/s)
- R est le rayon de la demi-sphère (m)

Par conservation du débit, nous pouvons considérer que le débit passant à travers la demi-sphère de rayon R est égal au débit passant à travers le disque de rayon R_{disque}. Cette approximation peut être faite pour tout R supérieur à R_{disque}. On peut alors considérer l'égalité suivante :

$$\forall R > R_{disque} \qquad D_v = D_{v,demi-sphère}(R) \quad (7)$$

Ce qui nous permet d'approximer la vitesse du fluide en fonction de la distance entre le centre du delta P et la surface de la demi-sphère R :

$$V_{fluide}(R) = \frac{D_v}{2\pi R^2} \quad (8)$$

L'équation ci-dessus nous permet alors d'approximer théoriquement l'évolution de la vitesse en fonction de la distance à celui-ci. On remarque d'ores et déjà que la vitesse du fluide est inversement proportionnelle au carré du rayon de la demi-sphère.

Dans le cas d'un différentiel de hauteur d'eau de 10 mètres, avec un diamètre de disque de 20 cm, l'évolution théorique de la vitesse selon l'équation 8 est affichée sur la Figure 5.

Il est à noter que le différentiel de pression est ici exprimé en hauteur d'eau équivalente conformément à l'équation (10) obtenu dans la suite du mémoire.

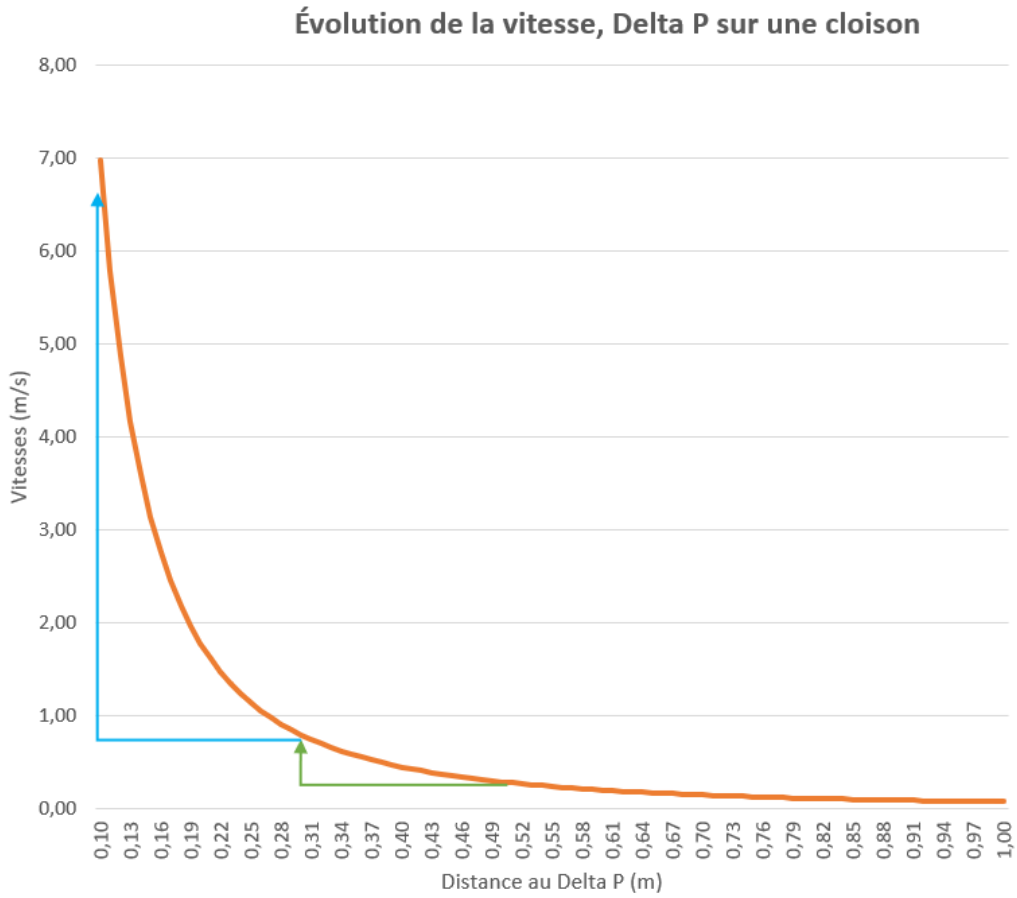


Figure 5 : Évolution de la vitesse du fluide pour une différence de hauteur d'eau de 10m en fonction de la distance au delta P pour tout $R>R_{disque}$ = 0,1m

Nous pouvons observer que la vitesse du courant augmente très lentement jusqu'à une certaine distance critique. La flèche verte sur notre courbe montre l'évolution de la vitesse de 50 cm jusqu'à 30 cm du delta P. Jusqu'à cette distance, le plongeur en intervention ne ressent pas la faible aspiration. Il s'avance progressivement en direction du delta P. La flèche

bleue quant à elle représente l'évolution de la vitesse de 30 cm jusqu'à 10 cm du delta P. On remarque que l'évolution de la vitesse se fait alors très brutalement. Dès lors qu'un plongeur traverse une distance critique, le courant peut le surprend, l'aspirer, puis le coincer. C'est cette capacité à surprendre les plongeurs qui fait la dangerosité du delta P (Fisher et al., 2009; Fortenbery & Smith, 2014; Hermans, 2017; Mitchell et al., 2011)

1.3.4 Définition d'une distance critique

Le milieu de la plongée commerciale suggère que le plongeur n'est pas en danger tant que la vitesse du courant ne dépasse pas 0,5 m/s (Fisher et al., 2009; Fortenbery & Smith, 2014; Hermans, 2017; Mitchell et al., 2011). Cette vitesse critique permet de définir une distance critique appelée Zone de Danger de Différentiel de Pression, noté DPDZ (Differential Pressure Danger Zone). L'équation (8) permet de la définir comme telle :

$$DPDZ = \sqrt{\frac{D_v}{\pi}} \tag{9}$$

- $DPDZ$ est la distance définissant la Zone de Danger de Différentiel de pression (m)
- D_v est le débit volumique du fluide (m/s)

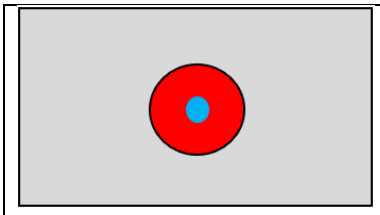
1.3.5 Ajustement selon la configuration du Delta P

Les deux sections précédentes ont permis de mettre en place les équations permettant de caractériser le delta P. Par souci de simplification, nous avons pris le cas où le delta P est situé sur une seule cloison (Figure 4). Dans ce cas, l'écoulement n'est pas entravé par d'autres structures latérales (fond marin, parois solides par exemple) et l'évolution du débit selon la surface d'une demi-sphère est une bonne approximation.

Cependant, si le delta P est à proximité de plusieurs cloisons, il faut en conséquence modifier notre modèle d'écoulement. Pour une seule cloison, une approximation suivant le modèle d'une demi-sphère est fiable. Pour deux cloisons on choisira celui d'un quart de sphère. Pour 3 cloisons, celui d'un huitième de sphère.

Les formules doivent alors être ajustées. Celle du DPDZ notamment pourra être calculée à partir d'un coefficient f_c dépendant uniquement de la configuration de l'environnement entourant le delta P. Le Tableau 1 résume l'ensemble des équations pour les trois cas simples cités précédemment.

Tableau 1 : Équations caractérisant un delta P selon la configuration de l'écoulement

		
Ouverture sur une cloison Demi-sphère	Ouverture sur deux cloisons Quart de sphère	Ouverture sur 3 cloisons Huitième de sphère
$V_{fluide}(R) = \frac{D_v}{2\pi R^2}$	$V_{fluide}(R) = \frac{D_v}{\pi R^2}$	$V_{fluide}(R) = \frac{2D_v}{\pi R^2}$
$fc = 1$	$fc = 1{,}414$	$fc = 2$
$DPDZ = f_c * \sqrt{\frac{Q_v}{\pi}}$		

Adapté de (Hermans, 2017)

1.3.6 Cas des barrages

Dans la suite du mémoire, nous nous intéresserons aux delta P proches des barrages qui représentent l'environnement le plus susceptible d'en développer et dont les statistiques rapportent le plus d'accidents (Fisher et al., 2009; Hermans, 2016).

Dans le cas des barrages, le différentiel de pression est souvent causé par la différence de hauteur d'eau entre l'amont et l'aval du barrage. Le différentiel de pression et la différence de hauteur d'eau peuvent être liés par l'équation :

$$\Delta P = \rho g \Delta H \tag{10}$$

- ΔP est la différence de pression (Pa)
- ΔH est la différence de hauteur d'eau (m)
- g est l'accélération de la pesanteur (m/s^2)

Par conséquent la vitesse développée aux abords du barrage est :

$$V_{fluide} = \sqrt{2g\Delta H} \tag{11}$$

1.3.7 Sources de Delta P

Proches de ceux-ci, les plongeurs-scaphandriers sont confrontés à trois sources de delta P différentes :

1. La première se situe au niveau des vannes et des bas de portes. Celles-ci sont souvent bien contrôlées et sont en position fermées lors des interventions. Cependant, les vannes peuvent présenter des défauts, mal se fermer ou encore être le sujet de l'opération. Auquel cas, la plongée s'effectue vanne entre-ouverte (Fisher et al., 2009; Hermans, 2017;

Mitchell et al., 2011). Par conséquent un delta P plus ou moins important peut être présent à leur proximité. Une intervention par un plongeur est alors très risquée. C'est le cas de l'accident mortel survenu au Québec le 1er juin 2004 lors de travaux de plongée à la mini-centrale chute blanche à Sainte-Jeanne-d'Arc au Lac-Saint-Jean (Savard, 2004).

2. La seconde source concerne les défauts du barrage. Dû à une érosion progressive, le barrage peut présenter certains défauts, comme des fissures, provoquant la rupture de la barrière physique. La hauteur d'eau étant très élevée sur certains barrages, ceci provoque un courant dangereux, et ce, même si la fissure peut sembler petite (Fisher et al., 2009; Hermans, 2017; Mitchell et al., 2011).

3. Enfin nous pouvons citer les phénomènes d'érosions régressives (Desodt & Horsin-Molinaro, 2016). Ce phénomène est le résultat d'une érosion progressive du fluide contournant le barrage par le sol. La hauteur d'eau au niveau des barrages étant très importantes, l'eau du réservoir peut se frayer un chemin en contournant le barrage par le bas. Au fil du temps, l'eau agrandit ce chemin en emportant petit à petit les particules. Au bout d'un certain temps, cette érosion régressive rompt la barrière physique qui existait et créer un delta P. Ce delta P se situe verticalement ou horizontalement, dépendamment de l'érosion. Cette forme de delta P est communément appelée « renard hydraulique » (Hermans, 2017). Ce phénomène est notamment responsable de l'accident mortel survenu sur le barrage d'Hydro-Québec Hull 2 à Hull en 2000 (Gaudet & Lê, 2002).

1.3.8 Méthodes de localisation

En tenant compte du fonctionnement du delta P et notamment du DPDZ, des méthodes permettant de sécuriser une zone d'intervention sont apparues (Fisher et al., 2009; Hermans, 2017; Mitchell et al., 2011). Cependant il est nécessaire de localiser le delta P avant tout, ce qui nécessite des appareils de détections performants.

Premièrement, il est préférable de réaliser une reconnaissance visuelle du site d'intervention. Celle-ci se fait en observant des potentiels défauts et sources de delta P in situ et sur les dessins disponibles. L'équipe en profitera également pour observer du mouvement inhabituel en surface de l'eau, en amont et en aval de la zone d'intervention. Dans de nombreux cas cependant les delta P peuvent ne pas être détecter dû à leur profondeur et aux remous habituels. C'est notamment le cas des barrages hydro-électriques. En cas de doute, des inspections complémentaires peuvent être réalisées. Par exemple :

- Inspection par caméra : Un chiffon et une caméra sont fixés sur une perche qui est immergée progressivement dans l'eau. En cas de delta P, l'écran relié à la caméra permettra de voir que le chiffon se fait aspirer selon la visibilité.

- Inspection par corde lestée : Une corde lestée descend progressivement le long de la paroi. En cas de delta P, le leste sera attiré et produira des vibrations qui se transmettront à la surface.

- Inspection par un véhicule sous-marin téléguidé (ROV) : Un chiffon est positionné au bout d'une perche raccordée à un ROV. Comme pour l'inspection par caméra, le ROV permettra d'observer selon la visibilité le comportement du chiffon et son aspiration potentielle en cas de delta P. Le ROV a cependant l'avantage d'être manipulé à distance et permet d'atteindre des profondeurs plus élevées. En revanche, il peut arriver d'en perdre, car le ROV se fait lui-même aspirer dans le delta P. Les coûts sont alors très élevés.

Lorsqu'aucun indicateur en surface n'indique la présence de delta P, les plongeurs-scaphandriers s'immergent dans l'eau et se rendent progressivement à leur zone de travail. Ils restent attentifs à tous phénomènes visuels et sonores anormaux. Un delta P fait effectivement du bruit et les scaphandriers peuvent être capables de l'entendre. En cas de très faible visibilité, cela peut être leur unique recours.

Les méthodes de détections en plongée sont très similaires à celles vues précédemment. En général, les plongeurs progressent avec un chiffon en bout de perche. Celui-ci se fait aspirer en cas de delta P. Ils peuvent le voir visuellement si la visibilité le permet, mais surtout ressentir l'aspiration au bout de la perche. C'est la méthode la plus communément utilisée d'après la littérature. En cas de mauvaise visibilité, ils peuvent associer une caméra et continuer d'avoir un visuel. Certaines fois, il est préférable de reproduire la méthode de la corde lestée et de descendre progressivement le long de la paroi vers la zone d'intervention.

Toutefois, ces appareils de mesure ne permettent d'obtenir des résultats que localement. Ceux-là ne leur permettent pas d'obtenir la connaissance de l'ensemble de l'écoulement dans la zone de travail. Les plongeurs immergés doivent s'approcher du delta P et ainsi prendre un minimum de risque. À cela s'ajoute que certaines méthodes font appel à des appareils peu précis et parfois à caractère subjectif (chiffon, technique du sac).

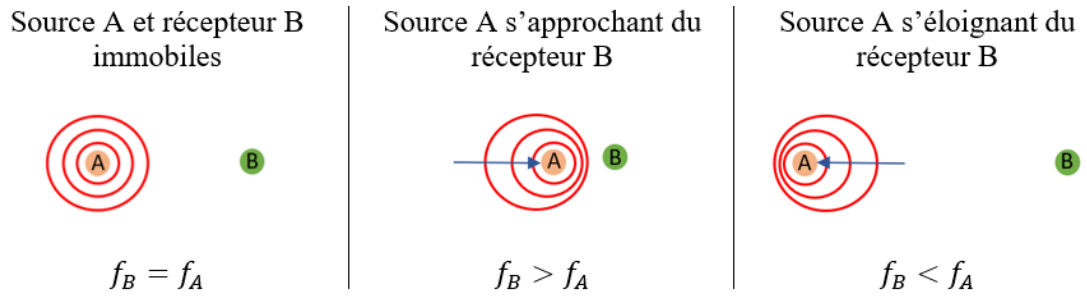
1.4 EFFET DOPPLER : PRINCIPES ET INSTRUMENTS

1.4.1 Introduction

Depuis les années 1980, une nouvelle technologie a fait son apparition en océanographie pour mesurer les vitesses de courant. Cette technologie s'appuie sur le principe de l'effet Doppler (Muste, Kim, & Fulford, 2008).

1.4.2 Effet Doppler : Principe de fonctionnement

Le principe de l'Effet Doppler a été découvert par le physicien Christian Johann Doppler en 1842. L'effet Doppler désigne le décalage de fréquence d'une onde entre une source et un récepteur d'ondes lorsque ceux-ci sont en mouvement relatifs (Figure 6).



Le point A correspond à la source d'onde
Le point B correspond au récepteur d'onde.
La flèche bleue indique le mouvement emprunté par la source

Figure 6 : Illustration de l'Effet Doppler

Lorsque la source et le récepteur d'ondes sont immobiles l'un par rapport à l'autre, il n'y a pas de changement de fréquence (cas de gauche). Cependant, dès lors que la source ou le récepteur sont en mouvement l'un par rapport à l'autre, le récepteur ne reçoit pas l'onde émise par la source à la même fréquence. C'est l'Effet Doppler (Simpson, 2001).

La différence de fréquence reçue entre le récepteur et la source est obtenue à partie de l'équation suivante :

$$\Delta F = \frac{V}{C} * F_{Source} \tag{12}$$

- ΔF est la différence de fréquence observée entre le récepteur et la source d'ondes (Hz)
- V est la vitesse relative entre la source et le récepteur d'ondes (m/s)
- C est la vitesse du son dans le milieu de propagation de l'onde (m/s)
- F_{source} est la fréquence de l'onde émise par la source (Hz)

1.4.3 Application en océanographie : effet Doppler successif

Les technologies à effet Doppler utilisées en océanographie s'appuient sur ce même principe, à la différence qu'elles s'appuient sur la réception de l'écho de l'onde envoyée sur les particules en suspension naturellement présentes dans un fluide (Nortek, 2018; TeledyneRDI, 2011). Ils utilisent un transducteur, qui se charge d'émettre l'onde, puis de la recevoir :

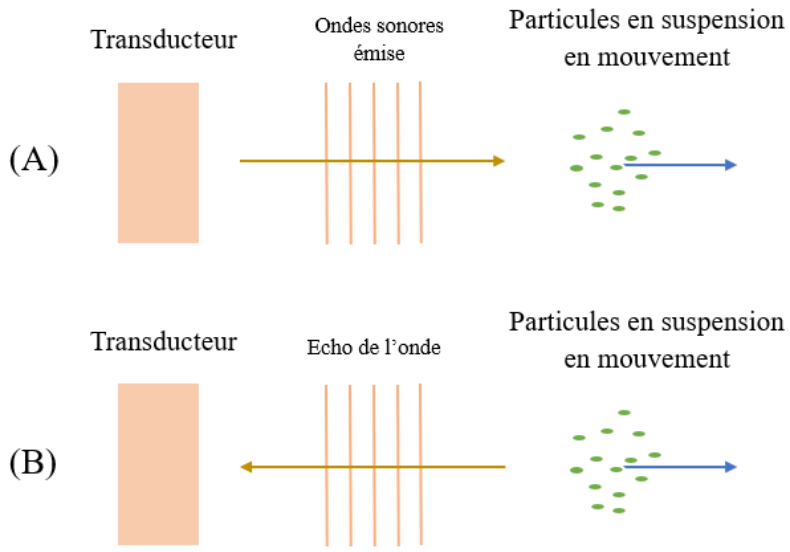


Figure 7 : Illustration de l'effet Doppler successif utilisé par les technologies à effet Doppler
Source : Adaptée de (TeledyneRDI, 2011)

A. Le transducteur envoie une onde ultra-sonore à une fréquence connue dans une direction dans le fluide. Les particules flottantes dans le fluide reçoivent l'onde ultra-sonore. Ici, le transducteur joue le rôle de source, et les particules de récepteurs.

B. L'onde qui rentre en contact avec les particules flottantes renvoie des échos dans toutes les directions, dont une partie sera réfléchie en direction du transducteur. Cette partie sera reçue par le transducteur. Ici, les particules jouent le rôle de source d'onde en réfléchissant l'onde reçue précédemment, et le transducteur joue le rôle de récepteur.

On a donc affaire à deux Effets Doppler successifs. De cette manière, l'équation (12) doit tenir compte du double effet Doppler et devient :

$$\Delta F = 2 * \frac{V}{C} * F_{Source} \quad (13)$$

1.4.4 Lien entre la vitesse du fluide et les particules

Les particules flottantes sont présentes naturellement dans les eaux. Il s'agit de phytoplanctons et de sédiments par exemple. En moyenne, ils se déplacent à la même vitesse que le fluide. C'est une hypothèse fondamentale afin d'approximer les vitesses du fluide grâce au concept expliqué jusqu'ici.

De cette manière, l'équation (13) nous permet de remonter à la vitesse du fluide :

$$V_{fluide} = \frac{\Delta F * C}{2 * F_{source}} \quad (14)$$

1.4.5 Vitesse radiale

En réalité, l'effet Doppler apparait lorsque le déplacement relatif entre la source et le récepteur engendre une modification de la fréquence perçue par le récepteur. Ceci est le cas uniquement lorsqu'il existe une composante radiale dans le mouvement, c'est-à-dire lorsqu'il existe un mouvement relativement à l'axe de propagation de l'onde (Figure 8).

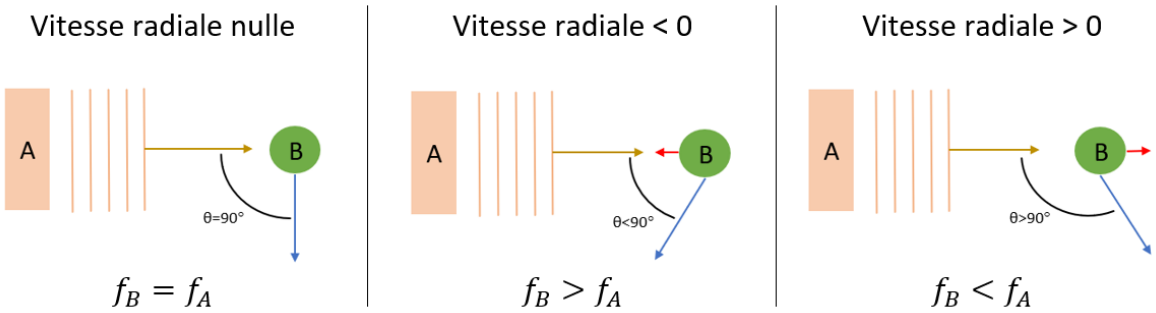


Figure 8 : Illustration de l'effet Doppler selon la vitesse radiale d'une particule en mouvement.
Source : Adaptée de (TeledyneRDI, 2011)

Dans le cas de gauche, le récepteur B se déplace perpendiculairement à l'axe de propagation de l'onde. L'onde reçue par le récepteur B a la même fréquence que l'onde émise par la source. Il n'y a pas de modification de la fréquence, malgré le déplacement du récepteur par rapport à la source. Dans le cas central, la composante radiale se dirige vers la source. Le récepteur perçoit une fréquence d'onde plus élevée que la source. Enfin, dans le cas de droite, la composante radiale s'éloigne de la source. La fréquence perçue par le récepteur est plus faible que la fréquence émise.

Par conséquent, l'effet Doppler n'est sensible qu'à la composante de la vitesse correspondant à l'axe de propagation de l'onde, appelée vitesse radiale. (Mueller et al., 2013; Nortek, 2018; TeledyneRDI, 2011)

Le terme de vitesse décrit dans l'équation (13) est plus précisément la composante radiale de la vitesse du fluide. Nous devrions alors écrire :

$$\Delta F = 2 * \frac{V_{radiale}}{C} * F_{Source} \qquad (15)$$

Soit en fonction de la vitesse du fluide :

$$\Delta F = 2 * \frac{V_{fluide} * \cos(\theta)}{C} * F_{Source} \quad (16)$$

Où θ représente l'angle entre l'axe de propagation de l'onde et l'axe de déplacement de la particule en suspension (Figure 9).

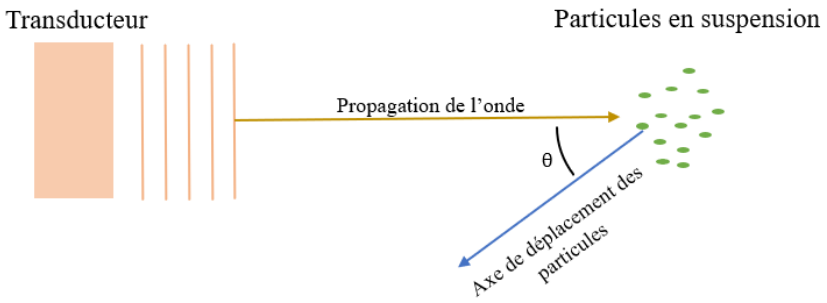


Figure 9 : Angle entre l'axe de propagation de l'onde et l'axe de déplacement des particules en suspension

Dans les technologies à effet Doppler, la vitesse obtenue le long d'un transducteur est donc une approximation de la vitesse radiale selon cet axe

$$V_{radiale} = \frac{\Delta F * C}{2 * F_{source}} \quad (17)$$

1.4.6 Technologie à large bande

Les récentes technologies à effet Doppler préfèrent utiliser le décalage de phase plutôt que le décalage de fréquence. C'est le traitement Doppler à large bande, plus connu sous l'anglicisme « BroadBand Doppler Processing ».

Plutôt que d'observer un décalage de fréquence, cette technologie s'appuie sur le décalage de phase observé entre 2 ondes émises successivement (Figure 10).

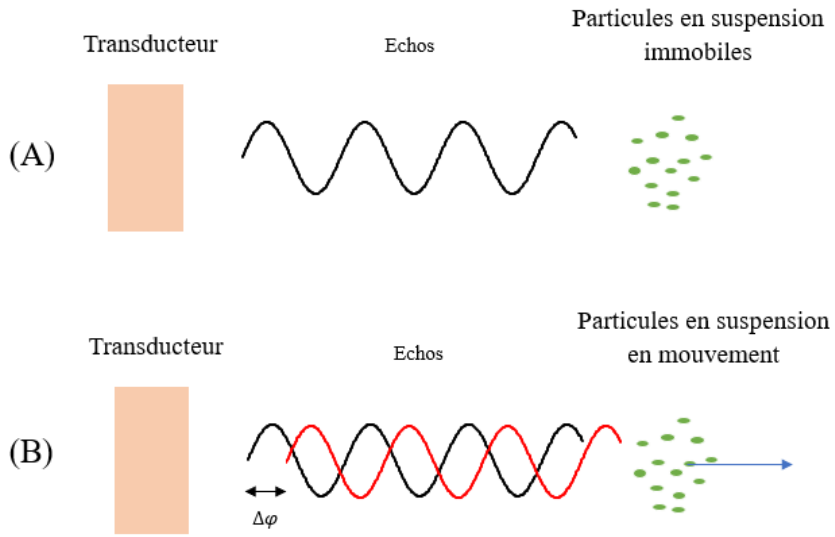


Figure 10 : Principe de fonctionnement des technologies à large bande
Source : Adaptée de (TeledyneRDI, 2011)

Si la particule n'est pas en mouvement, le transducteur recevra les deux ondes en phase. En revanche si la particule est en mouvement, la seconde onde envoyée après un temps Δt sera en décalage de phase. Le décalage alors reçu par le transducteur permettra de remonter à la vitesse relative de la particule, et donc du fluide (Mueller et al., 2013; Nortek, 2018; Simpson, 2001; TeledyneRDI, 2011). Celle-ci est obtenue à partir de l'équation :

$$V_{radiale} = \frac{\Delta\varphi * C}{4 * \pi * F_{source} * \Delta t} \quad (18)$$

- $\Delta\varphi$ est le déphasage mesuré entre les deux ondes émises (rad)
- Δt est le temps entre deux ondes successives (s)

Bien qu'équivalentes mathématiquement à la mesure du décalage fréquentielle, les approximations obtenues à partir du décalage de phase se sont avérées plus précises d'après la littérature (Mueller et al., 2013; Nortek, 2018; Simpson, 2001; TeledyneRDI, 2011).

1.4.7 Vitesses tridimensionnelles et systèmes de coordonnées

Les technologies à effets Doppler sont en général composées d'au moins 3 transducteurs orientés chacun dans des directions différentes. Chaque transducteur permet d'approximer la vitesse radiale du fluide parallèlement à leur axe d'orientation. Par conséquent, au moins trois vitesses radiales sont approximées dans le système de coordonnées des axes des transducteurs appelé « système de coordonnées des faisceaux » (Beam Coordinates). C'est dans ce système de coordonnées que sont enregistrées les données brutes sur les vitesses relatives mesurées. (Nortek, 2018; TeledyneRDI, 2011)

À partir des données brutes, et parce qu'au moins trois vitesses radiales sont connues, les relations trigonométriques permettent d'estimer la vitesse du fluide en 3 dimensions et dans n'importe quel système de coordonnées, sous réserve de connaître l'orientation des faisceaux par rapport à celui-ci. Il existe entre autres deux systèmes de coordonnées habituellement utilisés :

- Système de coordonnées cartésiennes (coordonnées XYZ). Ce système de coordonnées est le système propre à l'appareil à effet Doppler. Connaissant l'orientation des transducteurs par rapport à l'axe principal de l'appareil, il est possible d'exprimer la vitesse du fluide dans ce système de coordonnées.

- Système de coordonnées terrestres. Ce système de coordonnées permet d'exprimer la vitesse du fluide dans les axes Est, Nord et l'axe montant (East, North, Up ; ENU). Ce système de coordonnées peut être utilisé si l'instrument

est équipé d'un compas et d'un capteur d'inclinaison interne ou externe permettant de connaitre l'orientation des faisceaux dans le système ENU.

1.4.8 Technologies à effet Doppler

Les concepts précédemment exposés ont permis de donner naissance à trois instruments de mesure hydroacoustiques utilisés en océanographie (Nortek, 2019). Ceux-ci sont présentés dans ce paragraphe.

- Vélocimètre acoustique à effet Doppler

Le vélocimètre acoustique à effet Doppler (ADV, Acoustic Doppler Velocimeter) est un appareil acoustique dont les transducteurs sont dirigés vers l'intérieur. On dit qu'ils sont concaves (Figure 11).

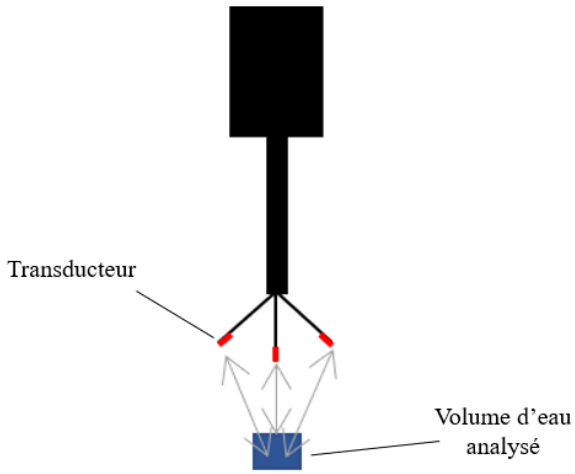


Figure 11 : Représentation d'un vélocimètre acoustique à effet Doppler

Cette géométrie permet d'estimer la vitesse du fluide en un point ponctuel de l'espace à partir d'un petit volume d'eau de l'ordre du centimètre cube. Les vitesses radiales sont obtenues à partir du même volume d'eau qui se trouve à quelques dizaines de centimètres

devant la sonde. De cette manière, l'ADV permet d'obtenir une approximation de la vitesse du courant dans le volume d'eau avec une grande précision (Nortek, 2018; SonTek, 2017).

- Profileur acoustique à effet Doppler

Le profileur acoustique à effet Doppler (ADCP, Acoustic Doppler Current Profiler) est une seconde technologie à effet Doppler utilisée en océanographie. Il est en général composé d'au moins trois transducteurs piézoélectriques qui transmettent et reçoivent les ondes sonores. Les transducteurs sont orientés vers l'extérieur. On dit qu'ils sont convexes (Nortek, 2018; TeledyneRDI, 2011).

Figure 12 : Profileur Acoustique à Effet Doppler

Chaque transducteur envoie une onde qui se propage le long de leur axe dans une colonne d'eau d'étude, d'une certaine profondeur. Un système interne à l'ADCP permet de fractionner la colonne d'eau d'étude en un certain nombre de cellules de longueur uniforme, relativement à l'axe d'orientation de l'ADCP (Figure 13). La longueur des cellules dépend de l'ADCP, de la fréquence d'émission de l'onde ainsi que des choix de l'utilisateur.

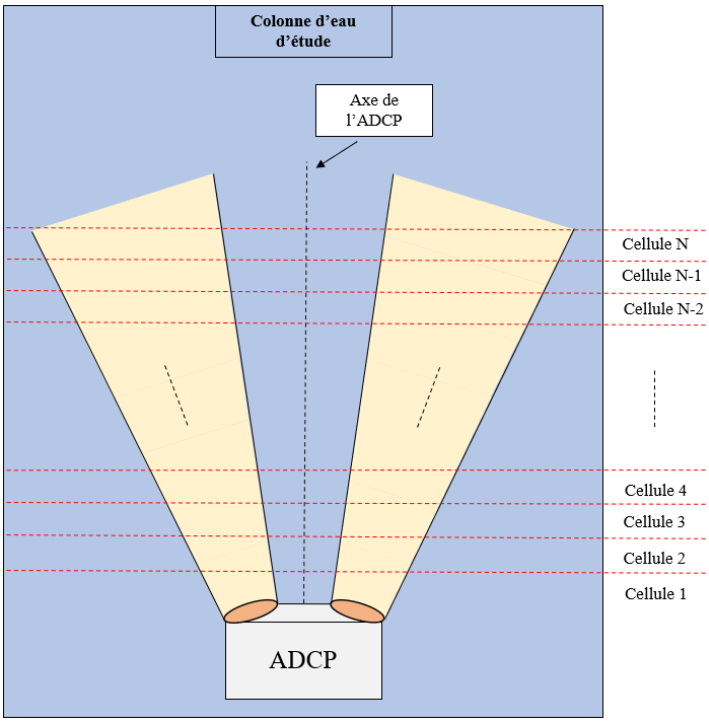


Figure 13 : Illustration du découpage de la colonne d'eau en N cellules le long de l'axe de l'ADCP
Source : Adaptée de (TeledyneRDI, 2011)

Les ondes envoyées par chaque transducteur permettent d'obtenir une estimation de la vitesse radiale au sein de chacune des cellules de la colonne d'eau, selon chacun des faisceaux. Pour N cellules, l'ADCP permet donc d'obtenir N valeurs de vitesses radiales le long de chaque faisceau, d'où l'obtention d'un profil de vitesses selon la distance à l'ADCP.

Le découpage se fait dans un premier temps le long de l'axe d'orientation de l'ADCP comme l'indique la Figure 13. Si l'utilisateur souhaite obtenir la vitesse du fluide en fonction de la profondeur (cas du système de coordonnées terrestre), une correction interne est faite pour que l'ADCP approxime la vitesse dans une cellule de même profondeur. (Figure 14)

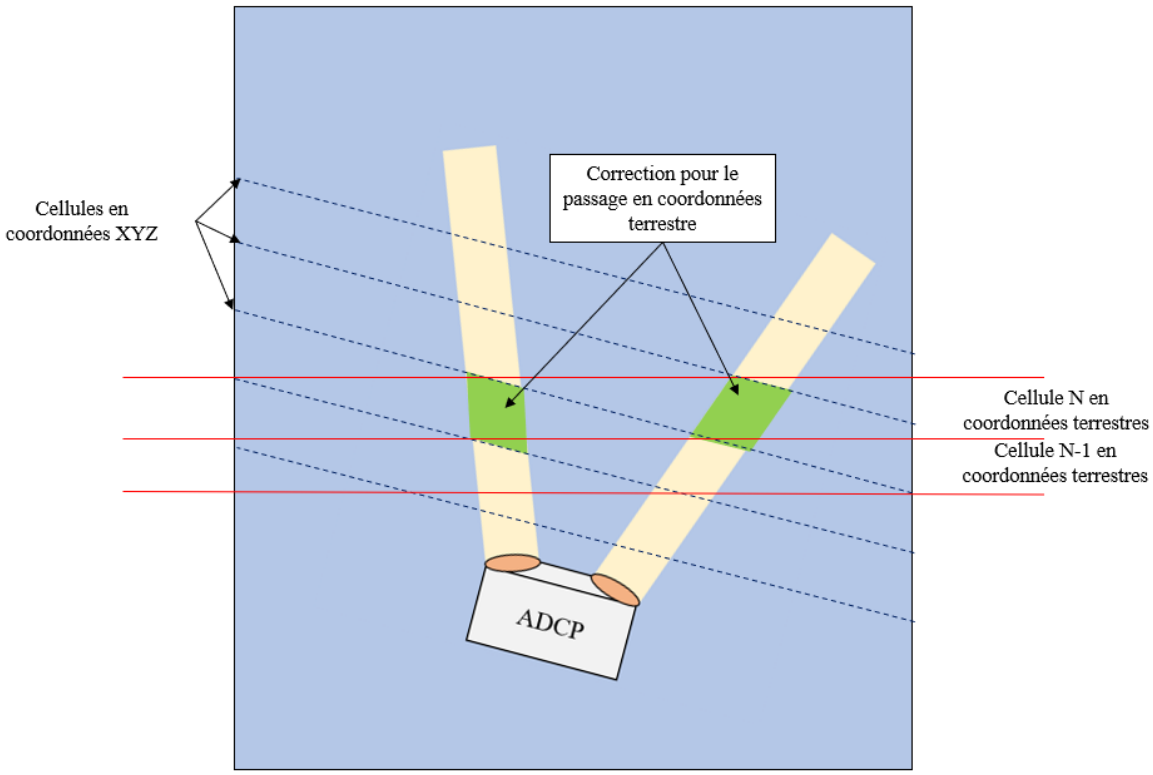


Figure 14 : Correction effectuée par l'ADCP afin d'aligner les cellules selon la même profondeur
Source : Adaptée de (TeledyneRDI, 2011)

L'approximation des vitesses radiales dans une cellule est en revanche obtenue à partir de volumes d'eau différents, contrairement à l'ADV. L'obtention de la vitesse tridimensionnelle nécessite de supposer que l'écoulement est homogène au sein d'une cellule. C'est l'hypothèse d'homogénéité qui est détaillée à la section 1.5.3. De cette manière, l'ADCP permet d'obtenir une estimation de la vitesse du fluide en 3 dimensions dans chacune des cellules de la colonne d'eau.

- Courantomètre à effet Doppler à une seule cellule

Le courantomètre à effet Doppler à une seule cellule est un autre instrument à effet Doppler. Il est également composé d'au moins 3 transducteurs convexes orientés dans des directions différentes (Figure 15).

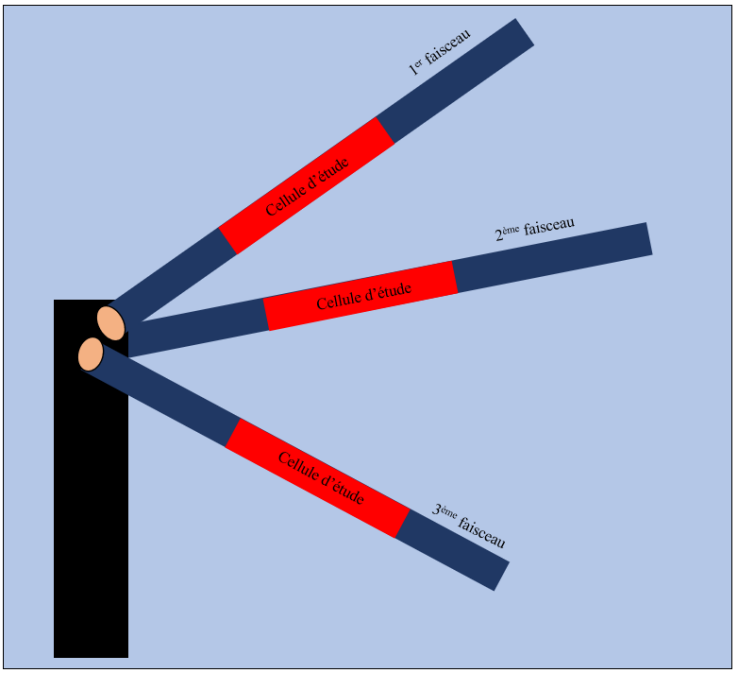


Figure 15 : Schéma d'un courantomètre à effet Doppler à une seule cellule

Cet instrument est très similaire à l'ADCP. La différence étant que le courantomètre à une seule cellule ne fractionne pas la colonne d'eau en N cellules. Il mesure uniquement la vitesse dans une seule cellule, représentée en rouge sur la Figure 15. C'est au sein de cette cellule que l'approximation de la vitesse est réalisée. Les zones en amont et en aval sont ignorées de l'étude. Les paramètres de la cellule dépendent également de l'ADCP et des choix de l'utilisateur.

Chaque faisceau des transducteurs permet d'approximer la vitesse radiale au sein de la cellule étudiée. Comme pour l'ADCP, la prise des mesures provient de volumes d'eau différents au sein de la cellule. Par conséquent, la vitesse radiale obtenue est en réalité représentative de volumes différents. L'obtention de la vitesse tridimensionnelle nécessite donc aussi de supposer que l'écoulement est homogène au sein d'une cellule. De cette manière, une approximation de la vitesse du fluide en 3 dimensions peut être obtenue.

1.5 LIMITES DU PROFILEUR ACOUSTIQUE À EFFET DOPPLER

Dans la suite de l'étude, nous détaillerons uniquement les limites de l'ADCP. C'est cet instrument que nous avons choisi d'étudier en pratique pour observer son potentiel de détection des delta P. Le choix parmi les différentes technologies est précisé dans la section 2.2.

1.5.1 Résumé de l'ADCP

L'ADCP est un appareil de mesure hydroacoustique similaire à un sonar composé de transducteurs piézoélectriques qui transmettent et reçoivent les ondes sonores. Les particules naturellement présentent dans l'eau permettent la réflexion des ondes sonores. Étant donné que les particules sont transportées par le courant sensiblement à la même vitesse, le décalage de phase de l'écho reçu par le transducteur est proportionnel à la vitesse du courant. De cette manière, l'effet Doppler nous permet d'obtenir la vitesse du courant à une certaine distance connue grâce au temps de parcours de l'onde sonore entre son émission et sa réception.

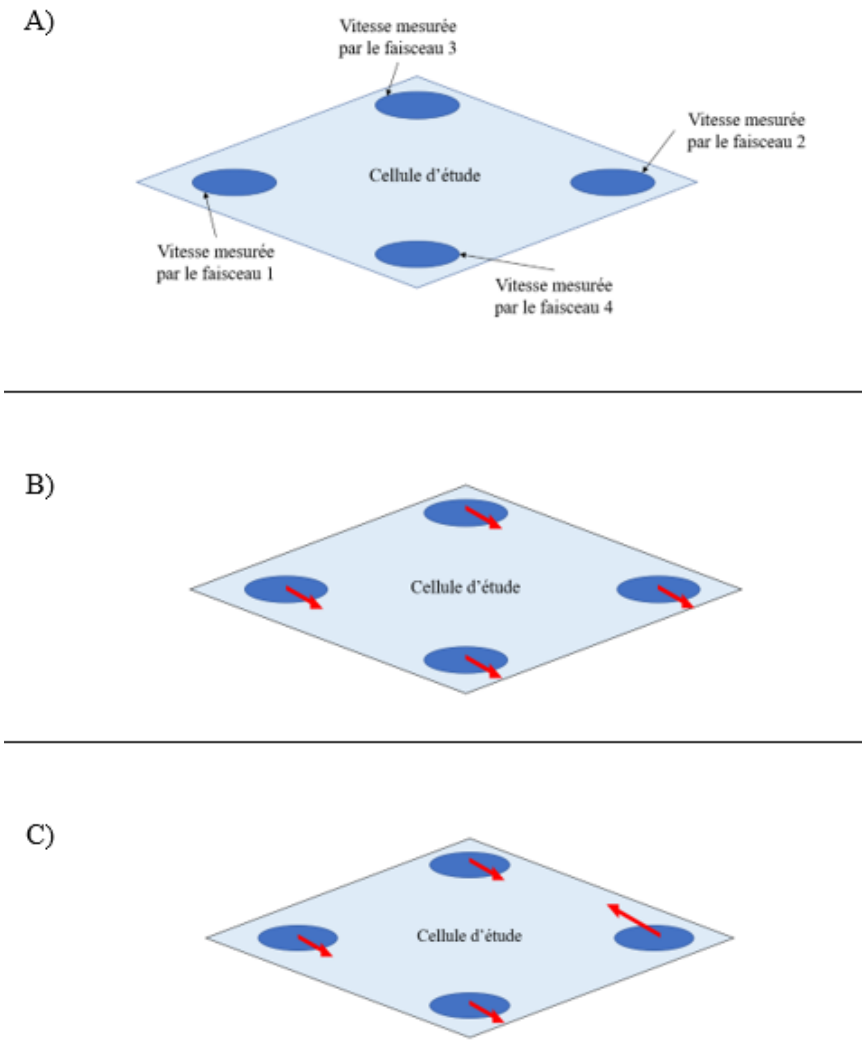
Malgré les forts progrès observés sur le potentiel des mesures des ADCP, il faut tenir compte de certaines limites de l'appareil qui peuvent biaiser les résultats dans notre cas.

1.5.2 Vitesses obtenues à partir des particules flottantes

Comme précédemment expliquée, l'approximation de la vitesse du fluide est obtenue à partir des échos des ondes ultra-sonores sur les particules flottantes (Nortek, 2018; TeledyneRDI, 2011). Il a été montré dans la littérature que ceux-ci vont en moyenne à la même vitesse que le fluide, ce qui permet sur une certaine durée d'obtenir une bonne approximation de la vitesse du fluide. Cependant ceci reste une hypothèse de base au principe et des biais peuvent alors apparaitre selon la qualité de l'eau dans lequel l'instrument est déployé.

1.5.3 Hypothèse d'homogénéité

La géométrie de l'appareil est telle que les faisceaux des transducteurs sont divergents. De ce fait, les faisceaux ne mesurent pas la vitesse relative de l'eau sur un seul et même volume d'eau. Il est alors nécessaire de supposer que l'eau au sein d'une cellule se déplace à la même vitesse. C'est l'hypothèse d'homogénéité de déplacement dans les cellules (Le Coz et al., 2009; Mueller et al., 2013; Nortek, 2018; Simpson, 2001; TeledyneRDI, 2011). Celle-ci est en général appropriée, notamment dans des grands volumes d'eau. L'hypothèse est illustrée sur la figure suivante :



A) Zones mesurées par l'ADCP dans une cellule
B) Hypothèse d'homogénéité vraie
C) Hypothèse d'homogénéité fausse

Figure 16 : Biais de mesures issus de l'hypothèse d'homogénéité
Source : Adaptée de (TeledyneRDI, 2011)

Si l'hypothèse d'homogénéité est vérifiée dans l'ensemble de la cellule (cas B), alors l'approximation de la vitesse tridimensionnelle établie à partir des quatre mesures de vitesses radiales effectuées sur les quatre volumes d'eau différents de la cellule est appropriée.

Si l'hypothèse d'homogénéité n'est pas vérifiée (cas C), la vitesse tridimensionnelle sera obtenue en tenant compte des quatre mesures de vitesses radiales effectuées sur les quatre volumes d'eau différents. Or, la vitesse obtenue selon le faisceau 2 est opposée à la vitesse obtenue selon les trois autres faisceaux. La vitesse tridimensionnelle moyenne obtenue au sein de la cellule sera alors nécessairement biaisée. Elle ne reflètera pas la vitesse réelle obtenue puisque l'écoulement n'est pas homogène.

1.5.4 Interférence des émissions secondaires

Lors de l'émission de l'onde sonore par un transducteur, des émissions indésirables sont également émises, ce sont les émissions secondaires (Mueller et al., 2013; Nortek, 2018; Simpson, 2001; TeledyneRDI, 2011). Elles sont d'une intensité bien plus faible que l'onde principale et ne sont pas réellement contraignantes dans l'océan, car un traitement efficace permet de ne pas prendre en compte leur effet lors de la réflexion des ondes sur les particules. Cependant, proche de la surface de l'eau, du fond marin ou des structures solides, la réflexion des ondes secondaires devient de même intensité que la réflexion de l'onde principale sur les particules. Les traitements actuels ne sont alors plus suffisamment efficaces et les mesures obtenues proches de ces environnements seront alors contaminées (Figure 17). C'est le phénomène d'interférence des émissions secondaires (sidelobe interference).

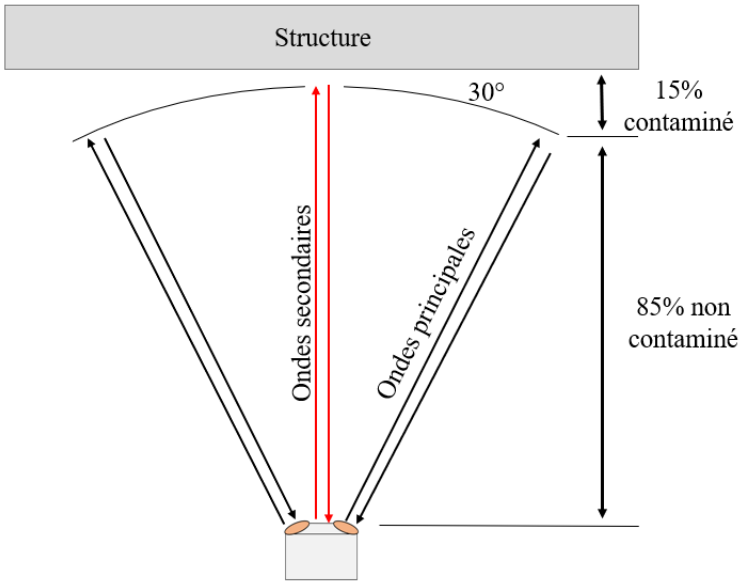


Figure 17 : Illustration de la zone contaminée à cause des ondes secondaires

En fonction de l'angle entre l'axe des transducteurs et l'axe principal de l'ADCP, la zone contaminée représente entre 6% et 15% de la profondeur de la colonne d'eau. La distance théorique maximale permettant d'obtenir des valeurs de vitesses approximatives sans contamination est obtenue par la relation :

$$R_{max} = D * cos\ (\gamma) \qquad (19)$$

- R_{max}est la distance théorique maximale sans contamination due aux ondes secondaires (m)
- D est la distance entre l'ADCP et la structure physique (m)
- γ est l'angle des transducteurs par rapport à l'axe principal de l'ADCP (rad)

La contamination apparait d'autant plus vite que les émissions secondaires rencontrent la structure solide rapidement (Nortek, 2018; TeledyneRDI, 2011).

1.5.5 Utilisation des coordonnées terrestres

Lorsque l'ADCP est déployé, les mesures de vitesses sont effectuées relativement à son orientation. L'obtention des vitesses tridimensionnelles peut être effectuée en tout temps dans le mode de coordonnées XYZ.

Néanmoins, il peut être intéressant de convertir les données dans les coordonnées terrestres pour son aspect pratique. Cela permet notamment d'obtenir la vitesse tridimensionnelle du fluide en fonction de la profondeur et non par rapport à la distance de l'ADCP (Figure 14).

Cependant, cette transformation nécessite de connaître l'angle d'orientation de l'ADCP par rapport au référentiel terrestre. Pour cette raison, les ADCP sont munis d'un capteur d'inclinaison. Cependant, les plages de mesure des capteurs angulaires sont limitées. Ce qui limite de surcroit le potentiel d'utilisation des coordonnées terrestres. À ceci, il faut également ajouter le temps de réponse des capteurs angulaires pour suivre effectivement l'angle d'orientation de l'ADCP (Nortek, 2018; TeledyneRDI, 2011).

1.5.6 Limites de phase

Dans les technologies à large bande, le calcul de vitesse s'effectue à partir du décalage de phase (section 1.4.6). Le transducteur mesure le décalage de phase obtenue entre deux signaux successifs. Tant que les vitesses radiales des particules n'entrainent pas un décalage de phase réel supérieur à 360° (Figure 18.A), l'approximation de la vitesse selon cette technologie est adéquate (Mueller et al., 2013; Nortek, 2018; TeledyneRDI, 2011).

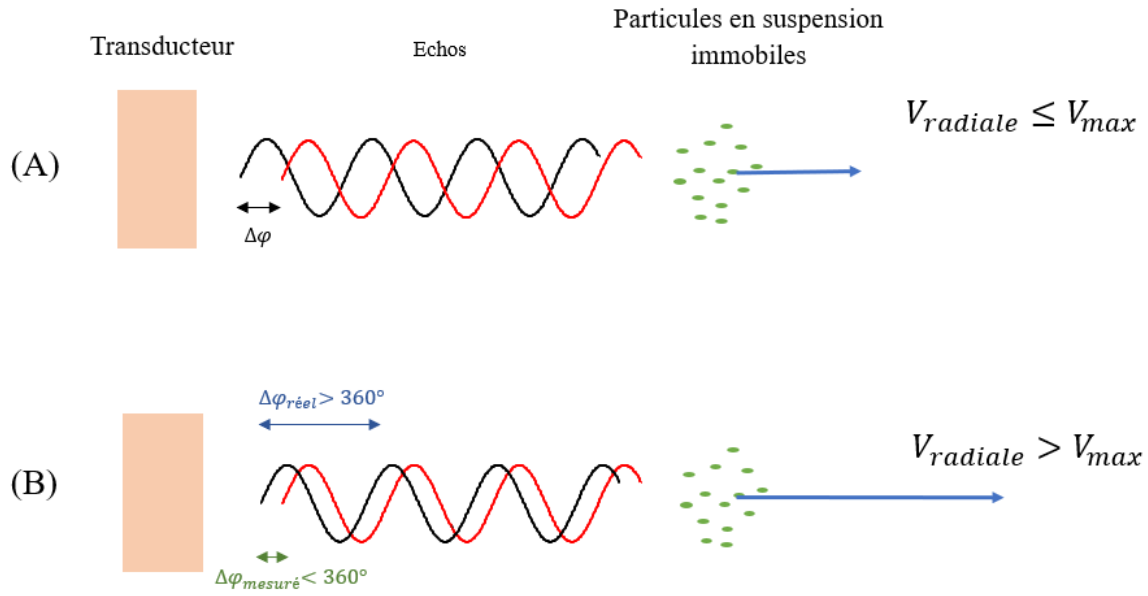


Figure 18 : Illustration de la limite du décalage de phase à 360°

Cependant, il peut arriver que les vitesses des particules soient si élevées que le décalage réel de phase soit supérieur à 360° (Figure 18.B). Or, si c'est le cas, la technologie mesurera un décalage de phase inférieur à 360°. C'est ce qu'illustre la Figure 18. Cette limite découle du principe même de la technologie à large bande. Afin d'effectuer des mesures convenables, il est nécessaire de s'assurer que les particules ne dépassent pas une vitesse critique propre à chaque ADCP qui entrainera une mesure de vitesse erronée.

1.5.7 Période blanche

Il existe également une limite communément appelée « période blanche » qui empêche d'approximer les mesures de vitesses sur les premiers centimètres devant les ADCP actuels (Nortek, 2018; TeledyneRDI, 2011). Cette limite ne sera pas développée dans notre cas, car elle n'est pas restrictive dans notre étude.

1.5.8 Traitement interne de l'ADCP

Afin d'estimer la vitesse du fluide dans chaque cellule de l'ADCP, un traitement interne des données reçues est effectué.

La durée de la pulsation permet de définir la taille de la cellule. La pulsation se propage ensuite dans la colonne d'eau et l'ADCP reçoit successivement les échos de l'onde sur les particules. Les échos provenant de distances éloignées mettent plus de temps à revenir vers l'ADCP que ceux provenant de distances proches. De cette manière, un traitement interne à l'ADCP segmente successivement les signaux reçus en portes (gates), et approxime la vitesse du fluide dans cette porte. La porte 1 correspond à la cellule 1, la porte 2 à la cellule 2 et ainsi de suite. La Figure 19 résume le processus.

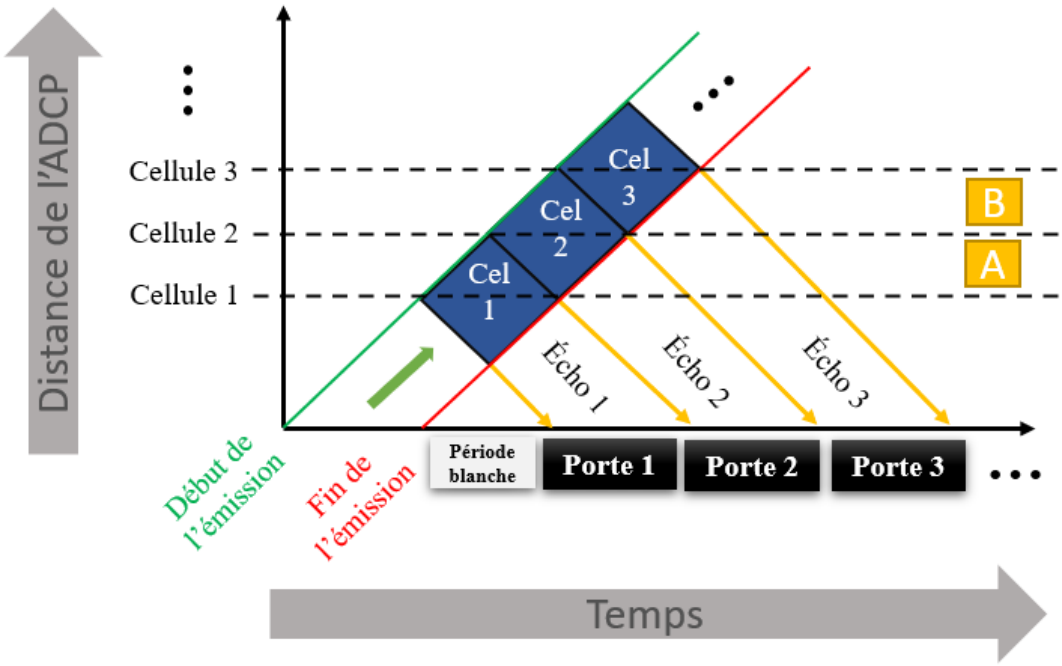


Figure 19 : Résumé du traitement interne à l'ADCP
Source : Adapté de (TeledyneRDI, 2011)

La courbe met en évidence le déroulement du traitement du signal en fonction du temps (abscisse). Lors d'une pulsation, l'émission d'une certaine durée est envoyée. Ensuite l'ADCP éteint le transducteur, l'ADCP ne traite aucune donnée (période blanche). L'ADCP traite ensuite les données de chaque porte successivement, afin d'obtenir les vitesses correspondantes à chaque cellule.

On remarque de ce fait la forme de losange correspondant à la cellule traitée pour chaque porte. On voit notamment que deux cellules adjacentes se chevauchent, c'est-à-dire que deux portes adjacentes utilisent des données correspondant à des mesures de vitesses sur une profondeur similaire. Par exemple une partie de la mesure des portes 1 et 2 provient de la profondeur A. Une partie des mesures des portes 2 et 3 provient de la profondeur B.

Au sein d'une porte, l'énergie obtenue liée aux données de vitesses est d'intensité différente. Les particules situées au milieu du losange confèrent davantage de données que celles figurant aux extrémités. De cette manière, l'approximation des vitesses au sein d'une cellule (ou d'une porte) utilise une fonction triangulaire pondérée (Figure 20).

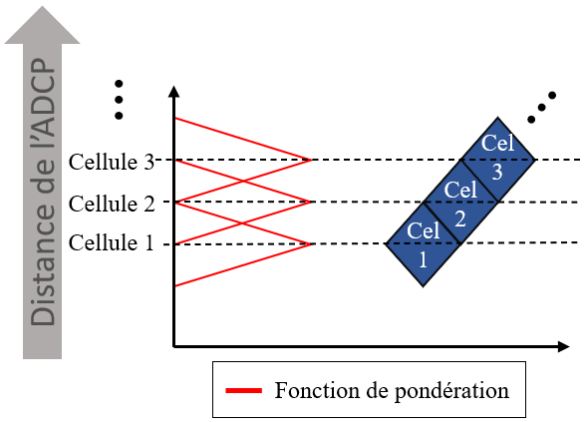


Figure 20 : Fonction triangulaire de pondération pour l'approximation des vitesses de chaque cellule

La figure ci-dessus met en évidence le chevauchement des cellules adjacentes dans le calcul de la vitesse moyenne au sein d'une cellule. La corrélation correspondant au chevauchement est estimée à 15% entre les cellules adjacentes (TeledyneRDI, 2011).

1.5.9 Incertitudes de mesures

Dans la prise de mesures, nous pouvons distinguer deux types d'incertitudes :

- L'erreur aléatoire, soit l'incertitude à court terme
- Les biais de mesures, soit l'incertitude à long terme

L'incertitude à court terme définit l'erreur pouvant être obtenue dans la mesure d'une vitesse suite à la réception d'une seule onde sonore. Dans ce cas de figure, l'incertitude est dominée par l'erreur aléatoire. Celle-ci est issue de facteurs internes comme la géométrie du faisceau ou la taille de la cellule et de facteurs internes comme le mouvement de l'ADCP ou les turbulences. Ces erreurs aléatoires sont relativement faciles à éliminer. Il suffit de réaliser un moyennage à partir de la réception de mesures de plusieurs ondes sonores. Par exemple, (TeledyneRDI, 2011) suggère qu'un moyennage sur une centaine d'échos permet de diminuer cette erreur d'un facteur 10. À ce stade, les incertitudes à court terme ne sont en général plus prédominantes.

L'incertitude à long terme est en revanche issue de biais de mesures extérieurs (salinité, température, interférence des émissions secondaires, hypothèse d'homogénéité …). Un moyennage des vitesses reçues ne pourra éliminer ces biais de mesures. Dans ce cas, il n'est pas encore possible de quantifier dans chaque situation l'incertitude résultante.

1.6 CONCLUSION

Les statistiques montrent une évolution positive dans la connaissance et la maitrise des dangers auxquels sont soumis les plongeurs en intervention. Le résultat étant un nombre de plus en plus faible d'accidents ayant lieu annuellement partout dans le monde. Malgré ceci, le nombre d'accidents dû au phénomène de delta P, première cause d'accident annuelle dans le monde professionnel, reste constant et des accidents mortels arrivent tous les ans à travers le monde (Hermans, 2016).

La dangerosité d'un delta P réside premièrement dans sa capacité à générer un courant fort, localisé, capable d'emporter un plongeur en intervention. Mais elle réside également dans sa capacité à surprendre. L'évolution de la vitesse proche d'un delta P se fait effectivement très subitement. Passant d'une vitesse presque nulle à un courant très fort emportant le plongeur. Une fois pris au piège, il est en général très difficile de s'en sortir seul. Actuellement, les instruments de détections des delta P utilisés s'avèrent être primaires et subjectifs, mettant souvent le plongeur en danger.

Depuis les années 1980, des instruments de mesure de vitesses s'appuyant sur le principe de l'effet Doppler sont utilisés en océanographie afin d'étudier les courants dans les milieux aquatiques. Les différents instruments qui en découlent permettent notamment de mesurer à distance les vitesses, de manière précise ou bien dans un grand volume d'eau. Malgré cela, les technologies à effet Doppler présentent certaines limites qui peuvent biaiser les données mesurées. Par exemple l'hypothèse que les particules en suspensions avancent à la même vitesse que le fluide, l'hypothèse d'homogénéité, l'effet des ondes secondaires proches de parois, les limites du capteur d'angle ainsi que la présence d'une vitesse mesurable maximale peuvent contaminer les mesures.

L'utilisation des appareils acoustiques pour la détection des delta P n'a, à l'heure actuelle, fait l'objet d'aucune étude.

CHAPITRE 2
PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIF

2.1 PROBLÉMATIQUE

Les plongeurs scaphandriers utilisent actuellement des appareils de détections rudimentaires, dont la mesure est localisée et parfois à caractères subjectifs (1.3.8). En intervention, ils sont généralement obligés de se rapprocher du danger pour le détecter.

L'objectif général du présent projet de recherche est d'étudier l'application d'un des appareils s'appuyant sur le principe de l'effet Doppler dans la détection des delta P. Cela afin de sécuriser les interventions de plongée sous-marine aux abords des barrages.

2.2 PRÉCISION DE LA PROBLÉMATIQUE

Conformément à la problématique définie ci-dessus, il paraît important d'insister sur le terme de détection dans le cadre de la localisation des delta P. Détecter c'est « Déceler la présence d'un corps ou d'un phénomène à l'aide d'un appareil » (dictionnaire Larousse,2021).

Par conséquent, détecter ne doit pas être confondu avec l'obtention de mesures de vitesses fidèles à la réalité. Il est tout à fait possible de détecter un phénomène sans nécessairement obtenir sensiblement des mesures de vitesses fidèles à la réalité. En d'autres termes, notre étude ne se veut pas seulement l'étude de la conformité des vitesses obtenue à

partir des instruments à effet Doppler sur les écoulements provoqués par les delta P. La conformité des vitesses mesurées par rapport à la réalité sera d'ailleurs secondaire. Il s'agira principalement d'étudier le potentiel de détection d'un des appareils à effet Doppler afin d'améliorer la sécurité des plongeurs. La sécurité étant notre principale préoccupation. C'est dans cette logique que s'articule la suite de notre étude.

2.3 CHOIX DE L'INSTRUMENT ÉTUDIÉ

Pour notre présente étude, nous avons décidé de nous concentrer sur un seul des instruments exposés à la section (1.4.8), même si tous les trois semblent montrer un potentiel. Pour rappel, les trois instruments étant les suivants :

- Le Vélocimètre Acoustique à Effet Doppler (ADV)
- Le Profileur Acoustique à Effet Doppler (ADCP)
- Le Courantomètre à Effet Doppler à une seule Cellule

L'ADV présente l'avantage d'obtenir des approximations de vitesses avec une grande précision, quand bien même l'écoulement présente des turbulences. En effet, l'ensemble des données récoltées provient d'un seul et même volume d'eau, de l'ordre du centimètre cube. Cependant, cette configuration permet d'observer la vitesse du fluide de manière localisée uniquement, ce qui est équivalent aux instruments utilisés actuellement par les plongeurs (1.3.8). Or, les delta P génèrent des courants très localisés (Figure 5). Si la prise de mesure est faite à côté, il se pourrait que le plongeur pense que la zone est sécurisée parce que l'ADV n'a analysé qu'un tout petit volume d'eau en dehors de la zone dangereuse. Même si c'est l'instrument qui semblerait nous apporter l'une des meilleures précisions sur la présence ou non d'un courant dangereux, il ne nous permet pas d'observer l'écoulement dans un gros volume d'eau, qui pourrait englober l'ensemble de la zone d'intervention.

L’ADCP et le courantomètre à effet Doppler à une seule cellule ont un fonctionnement très similaire comme nous l’avons précédemment expliqué (1.4.8). Entre les deux, l’ADCP est celui qui présente le meilleur potentiel. Il permet en effet de découper l’ensemble de la colonne d’eau d’étude en plusieurs cellules, ce qui permet d’améliorer la connaissance du profil d’écoulement de la zone d’intervention. Dans chaque cellule, les vitesses radiales selon les faisceaux ainsi qu’une approximation de la vitesse tridimensionnelle peuvent être obtenues. Ceci pourrait permettre d’observer des variations de vitesse entre les cellules. Le courantomètre à une seule cellule permet d’obtenir des résultats uniquement dans une seule cellule de la colonne d’eau étudiée. Ce qui est nettement moins intéressant que l’ADCP. Le principal avantage du courantomètre comparativement à l’ADCP est son coût d’achat qui est nettement plus faible. Parce qu’il permet de mesurer la vitesse dans une seule cellule, nous ne nous intéresserons pas au courantomètre à une seule cellule.

À contrario de l’ADV, l’ADCP mesure les vitesses du courant au sein d’une zone beaucoup plus grande (colonne d’eau). Si elle présente des mesures de vitesses anormales, alors cela pourrait signifier la présence d’un delta P au sein de cette zone. Naturellement, nous nous attendons à obtenir une mesure de vitesse moins précise qu’avec l’ADV, notamment sur des écoulements hétérogènes. Cependant, le risque de passer à côté de la zone dangereuse avec cet instrument est bien plus faible qu’avec l’ADV. À la grande différence de l’ADV et des instruments actuellement utilisés par les plongeurs, l’ADCP permet d’obtenir des informations sur les vitesses du courant d’une colonne d’eau, en une seule passe de mesure, et non localement. C’est ce que met en évidence la figure suivante :

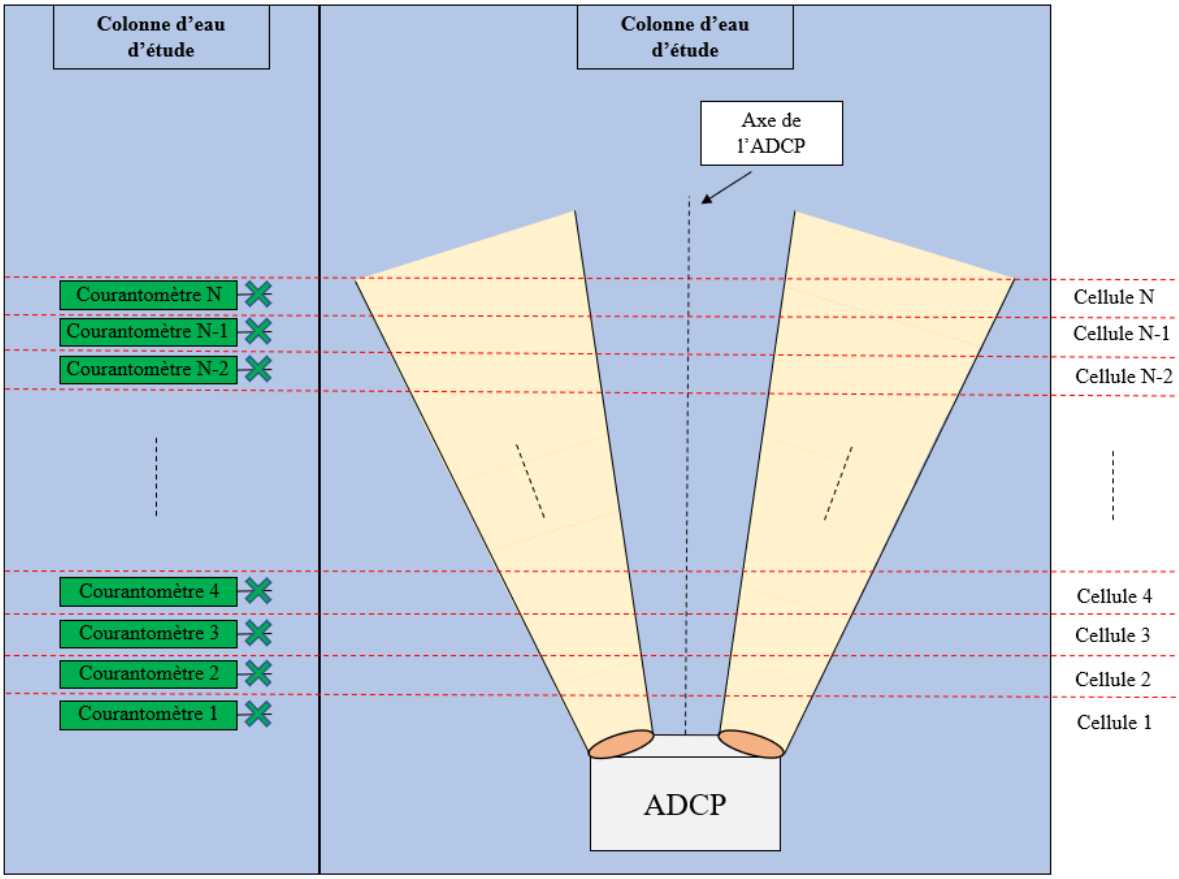


Figure 21 : Comparaison entre le courantomètre traditionnel à mesures localisées et l'ADCP

L'ADCP pourrait alors permettre de localiser à distance le delta P, sans nécessiter qu'un plongeur s'en approche dangereusement, et ainsi sécuriser l'intervention. Il pourrait effectivement balayer une section de la zone d'intervention afin d'évaluer le profil des vitesses à l'image de l'utilisation de l'ADCP dans les rivières afin d'évaluer le débit de celui-ci (Gotvald & Oberg, 2009; Mueller et al., 2013; Muste et al., 2008).

L'objectif principal du présent mémoire étant de sécuriser les interventions de plongées (2.2), nous avons privilégié l'aspect sécuritaire que peut apporter l'ADCP, au critère de précision que peut apporter l'ADV.

Ainsi, nous nous sommes orientés vers l'application d'un ADCP dans la sécurisation des interventions proches des barrages susceptibles de développer des delta P.

2.4 OBJECTIF

Conformément à la problématique émise ci-dessus, le but du présent mémoire est d'étudier le potentiel de l'ADCP afin de localiser les delta P en plongée sous-marine.

Il s'agira dans un premier temps de réaliser des expériences permettant d'observer le comportement de l'ADCP face à un delta P dans différentes situations. Notamment selon l'intensité du delta P (3.5.3), le type de delta P (3.5.4), puis selon la position de l'ADCP par rapport au delta P (3.5.2).

Afin de conclure sur son potentiel de détection, nous nous proposons également de concevoir une procédure s'appuyant sur les données des vitesses mesurées par l'ADCP pour déterminer s'il y a présence ou non d'un delta P. Cette procédure s'appuiera sur le principe du test d'hypothèse (3.6).

CHAPITRE 3
MATÉRIEL ET MÉTHODE

3.1 ADCP

Afin de mieux adapter l'appareil à notre besoin, nous nous sommes intéressés aux ADCP disponibles sur le marché. L'ADCP que nous avons utilisé lors des essais est également présenté dans ce sous-chapitre à la section 3.1.3.

3.1.1 Définition du besoin pour la détection des delta P

Les interventions de plongée sous-marine se situent dans leur quasi-totalité dans les cinquante premiers mètres de profondeur. Il faut que l'ADCP puisse être immergé jusqu'à cette profondeur.

Ensuite, puisque les delta P sont très localisés, l'idéal est d'utiliser un ADCP avec la plus petite épaisseur de cellule possible. Cela favorisera effectivement les chances de détecter des grandes variations de vitesse dues aux delta P. Notamment en évitant un moyennage sur une cellule trop grande.

3.1.2 Profileur Acoustique à Effet Doppler Idéal

L'ensemble des ADCP peuvent être immergés à 50 mètres et même bien plus profondément. Ce paramètre ne sera donc pas restrictif dans le choix de l'ADCP.

La taille de la cellule est liée à la fréquence de l'ADCP utilisé. Plus l'ADCP est de haute fréquence, plus l'épaisseur des cellules est fine. Notre besoin étant de diminuer au maximum la taille de la cellule, nous chercherons à utiliser un ADCP de très haute fréquence. On retrouvera idéalement sur le marché les ADCP de 1000 kHz ou de 2000 kHz, permettant d'obtenir des épaisseurs de cellules de l'ordre de la dizaine de centimètres (Nortek, 2019; TeledyneRDI, 2017).

Il est cependant à noter que la fréquence de l'ADCP est également liée à la longueur de la colonne d'eau pouvant être étudiée. Plus la fréquence de l'ADCP est élevée et plus la longueur de la colonne d'eau est faible.

Pour les plongeurs, une connaissance de la zone d'intervention sur une dizaine de mètres semble suffisante. Heureusement, les ADCP répondent dans la majeure partie des cas à ce besoin. Même ceux à très haute fréquence.

3.1.3 Profileur Acoustique Utilisé

L'ADCP de plus haute fréquence qu'il nous a été possible d'obtenir pour la réalisation de ce projet est le Sentinel V50 de Teledyne RD Instruments (Figure 22). Les spécifications du V50 sont également disponibles dans l'Annexe I.

Figure 22 : Sentinel V50 de Teledyne RD instruments

Le Sentinel V50 (abrégé V50) utilisé, de fréquence 500 kHz, est composé de 5 transducteurs. Parmi eux, quatre sont des transducteurs convexes inclinés à 25° par rapport à l'axe vertical de l'ADCP. Le 5^{e} transducteur (appelé transducteur vertical, ou central, quelle que soit la position de l'ADCP) est le transducteur orienté selon l'axe principal de l'ADCP, ou encore selon l'axe Z de l'ADCP (1.4.7).

D'après la fiche technique, le V50 nous permet d'obtenir une épaisseur de cellule minimale de 50 cm. Dans cette configuration, les faisceaux peuvent se propager jusqu'à une cinquantaine de mètres.

3.1.4 Potentiel théorique du Sentinel V50

Le Sentinel V50 étant muni d'un total de 5 transducteurs, il permet potentiellement d'étudier 5 vitesses radiales au sein de chaque cellule de 50 cm sur une colonne d'eau d'une cinquantaine de mètres maximum.

Les vitesses radiales peuvent ensuite être utilisées pour obtenir une approximation de la vitesse du fluide en trois dimensions au sein de la cellule. Selon les coordonnées XYZ ou bien en coordonnées terrestres. L'obtention de vitesses fidèles à la réalité dans ces systèmes de coordonnées nécessite de supposer un écoulement homogène au sein de chaque cellule (1.5.3). Nous faisons cette hypothèse, tout en sachant qu'elle pourrait ne pas être respectée. Dans le cas d'un écoulement dû à un delta P, il y a de forts risques que ceci ne soit pas le cas. Ainsi les vitesses tridimensionnelles obtenues dans ces deux systèmes de coordonnées seraient nécessairement faussées, mais pourraient indiquer la présence d'un delta P.

Sachant ceci, et conformément à la problématique (2.2), ces deux vitesses tridimensionnelles pourraient potentiellement être utilisées afin de détecter les delta P.

3.2 BASSIN EXPÉRIMENTAL

3.2.1 Composition

Afin de simuler l'environnement sous-marin proche des barrages, un bassin d'expérimentation d'une profondeur de 6 mètres a été construit à l'Institut Maritime du Québec à Rimouski. Ce bassin de 3 mètres de largeur par 6 mètres de longueur rend possible de représenter une multitude de delta P en milieu contrôlé. La vue de face du bassin est disponible sur la Figure 23.

Figure 23 : Bassin delta P chez Innovation Maritime
Source : Document interne à Innovation Maritime "Définition des mesures d'injection d'air lors de sauvetage en plongée" (IMAR, 2004)

Le bassin est séparé par un mur de poutrelle permettant de définir deux zones : l'amont du barrage et l'aval du barrage (Figure 24).

Figure 24 : Mur de poutrelles séparant l'amont et l'aval du barrage (bassin vide)

Le mur de poutrelles est également constitué de deux modules : un module inférieur et un module supérieur (Figure 25).

Figure 25 : Module supérieur et module inférieur du bassin

Les modules sont composés d'orifices permettant de relier la zone aval et la zone amont du barrage. En amont, les ouvertures sont de formes différentes, permettant de représenter différents delta P (Figure 28). En aval, des vannes papillons sont disposées sur des brides, permettant d'actionner ou de désactionner les différents delta P.

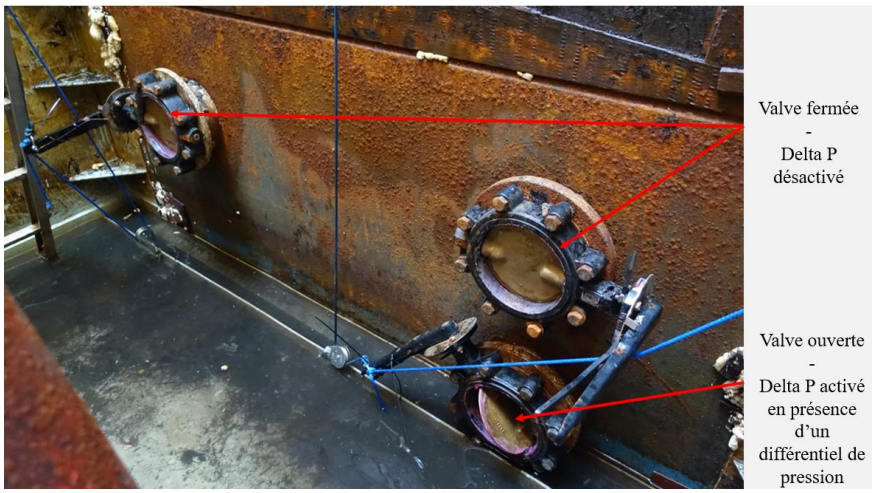


Figure 26 : Vannes papillon du module inférieur permettant d'activer un delta P

Un système de pompage permet d'acheminer l'eau de la partie aval à la partie amont. De cette manière, un différentiel de hauteur d'eau est créé (Figure 27).

Figure 27 : Différentiel de hauteur d'eau de 3m

En cas d'ouverture d'une des vannes, un écoulement dangereux se forme en amont du barrage. Un delta P est ainsi créé.

3.2.2 Delta P réalisables

Nous utiliserons uniquement le module inférieur dans notre étude puisque c'est celui qui nous permettra d'obtenir le plus grand différentiel de hauteur d'eau. Celui-ci nous permet de simuler différents types de delta P (Figure 28) :

- Renard-hydraulique horizontal et vanne mal fermée (orifice circulaire horizontal de diamètre 20 cm)
- Renard-hydraulique vertical (orifice circulaire vertical de diamètre 20 cm)
- Fente et bas de porte (orifice rectangulaire de section 90 cm x 7,5 cm)

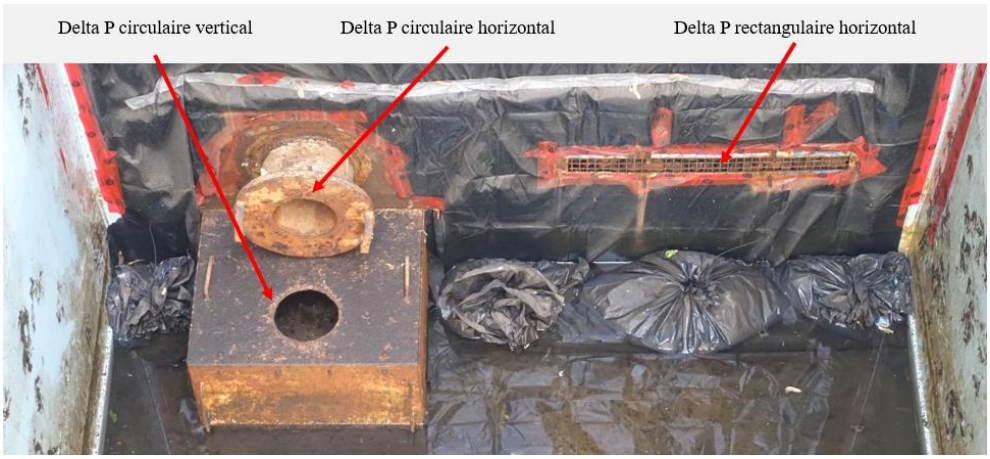


Figure 28 : Module inférieur et les trois formes de delta P

Les vannes papillon sont constituées de 9 positions différentes permettant de contrôler leur degré d'ouverture. Nous utiliserons ce paramètre afin de faire varier la section d'écoulement, et donc le débit d'eau passant à travers une vanne.

3.3 LIMITES DUES À L'UTILISATION DE L'ADCP DANS LE BASSIN

Les différentes expériences auront lieu dans le bassin présenté ci-dessus. L'ADCP sera placé et positionné dans la partie amont du bassin à l'aide d'une structure portante présentée à la section (3.4.2).

Les parois du bassin encadreront physiquement l'ADCP et cette configuration entraine naturellement des limites dans notre étude. C'est l'objet de ce sous-chapitre.

3.3.1 Effet des parois du bassin sur les mesures

Lors de l'émission des ondes, celles-ci rencontrent rapidement les parois du bassin. Les ondes se reflètent ensuite de paroi en paroi et changent alors de direction (Figure 29). Par conséquent, les données recueillies le long des faisceaux sont mal interprétées par l'ADCP. Il traitera effectivement la donnée comme si elle venait d'une certaine distance en direction du transducteur, alors que l'onde a en réalité été reflétée sur une ou plusieurs parois.

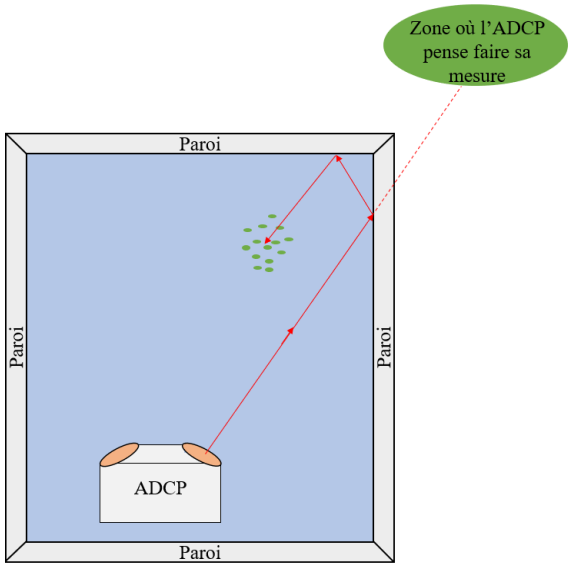


Figure 29 : Illustration de l'effet des parois du bassin sur les mesures obtenues par l'ADCP

De plus, la réflexion d'une onde émise par n'importe lequel des quatre transducteurs convexes sur une paroi peut contaminer les mesures des autres transducteurs convexes (source : échange courriel, Teledyne RDI, octobre 2020). Ceux-ci effectuent leur processus d'émission-réception simultanément. De ce fait, si un des faisceaux des transducteurs convexes percute une paroi rapidement, il viendra contaminer les données reçues par les trois autres transducteurs convexes. Ceci signifie que les données reçues par les transducteurs convexes deviennent dépendantes les unes des autres.

Ainsi, il ne semble plus pertinent d'étudier les données reçues par les transducteurs convexes, même dans un contexte de détection. Notamment parce que l'utilisation du V50 dans le bassin ne permet pas de conserver l'indépendance des données convexes.

3.3.2 Non utilisation des vitesses tridimensionnelles

La section (1.4.7) introduit le concept utilisé afin d'obtenir les vitesses tridimensionnelles à partir des mesures effectuées par l'ADCP. Cependant, le paragraphe précédent explique que les données brutes reçues par les transducteurs convexes ne seront pas utilisées dans notre étude. Par conséquent, aucune donnée tridimensionnelle ne pourra être obtenue à cause de l'utilisation du V50 dans le bassin.

Dans la suite de l'étude, nous nous concentrerons uniquement sur les données recueillies par le faisceau vertical.

3.4 PARAMÈTRES DES ESSAIS

3.4.1 Utilisation de la vitesse radiale du faisceau verticale

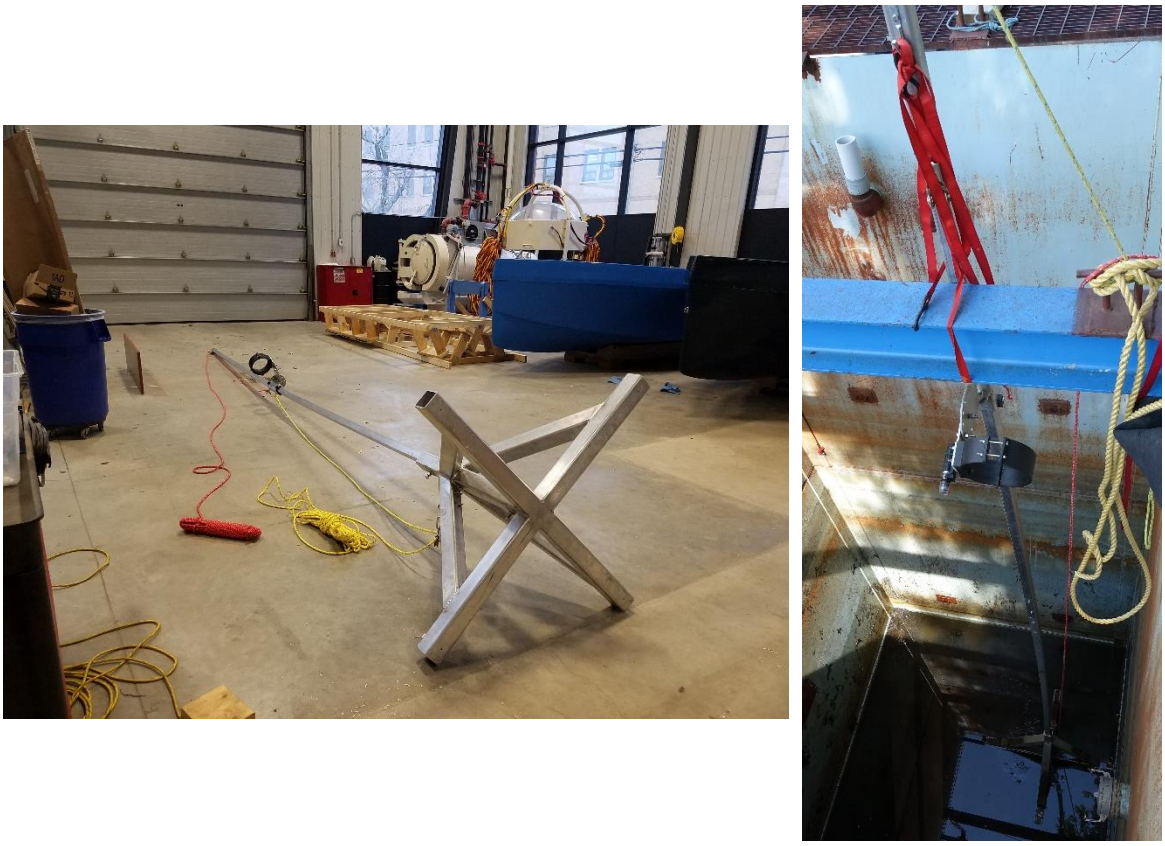
Le paragraphe 3.3.2 met en lumière l'interdépendance des faisceaux convexes dans la prise de données dans le bassin. Notamment parce que les quatre transducteurs convexes envoient leur onde en même temps.

Le processus d'émission-réception du 5^{e} faisceau est quant à lui décalé de 25 millisecondes par rapport aux faisceaux convexes. Ce décalage permet de conserver l'indépendance des données reçue par le transducteur vertical (source : échange courriel, Teledyne RDI, octobre 2020).

Nous utiliserons donc les mesures recueillies par le 5^{e} transducteur dans notre étude. Il est à noter que les vitesses recueillies seront donc uniquement les vitesses radiales captées par le transducteur vertical (1.4.5).

3.4.2 Positionnement de l'ADCP dans le bassin

Le positionnement et l'orientation de l'ADCP dans le bassin sont assurés par une structure portante en aluminium fabriquée à l'Université du Québec à Rimouski (UQAR).



(A) (B)

(A) Structure dans l'atelier (B) Structure positionnée dans le bassin

Figure 30 : Structure portante utilisée pour positionner l'ADCP

Un mât de 7 mètres de haut permet de manipuler l'ADCP depuis la surface et de l'abaisser à la profondeur souhaitée par l'intermédiaire d'un coulisseau. L'attache ADCP permet d'orienter l'instrument comme souhaité. Nous avons minimisé les jeux fonctionnels afin de minimiser la contamination des mesures de vitesses liée à ceux-ci. La mise en plan de la structure est disponible en Annexe II.

3.4.3 Étude effectuée sur 5 cellules

La structure portante est positionnée dans le bassin le plus loin possible du mur de poutrelles afin d'étudier le plus grand nombre de cellules possible. Le mât est attaché en haut de la poutre en H afin de maintenir la structure en position et de minimiser les mouvements secondaires. Ceux-ci pouvant provoquer le mouvement de l'ADCP.

Dans cette configuration, l'ADCP est positionné à 2,30 m du mur de poutrelles. Notre étude s'appuiera donc sur les 5 premières cellules de la colonne d'eau.

3.5 DESCRIPTIFS DES EXPÉRIENCES

Les expériences auront lieu dans le bassin décrit au paragraphe 3.2 avec l'appareil Sentinel V50 de Teledyne RDI décrit au paragraphe 3.1.3. Nous observerons la vitesse radiale obtenue par le transducteur vertical dans les 5 premières cellules mesurée par l'ADCP. L'ADCP effectuera autant de mesures que possible (une mesure en moyenne toutes les 0,5 secondes). La configuration de l'appareil V50 choisie pour les essais est disponible en Annexe I.

Afin de répondre à notre problématique, nous nous proposons d'effectuer quatre expériences différentes.

Premièrement, nous examinerons le comportement de l'ADCP face à un delta P dans des conditions idéales d'utilisation. Cette expérience sera composée de quatre essais identiques afin de confirmer ou d'infirmer certains comportements observés, notamment la répétabilité des mesures (3.5.1).

En second lieu, nous étudierons l'influence de la position de l'ADCP par rapport au centre du delta P. Il s'agira ici d'éloigner progressivement l'ADCP du centre du delta P (3.5.2).

Ensuite, il s'agira d'étudier le comportement de l'ADCP lorsque la surface du delta P diminue (3.5.3). La diminution de la surface s'associe avec une diminution de la zone de dangerosité sans entrainer une baisse de la vitesse résultante (1.3.4). Ceci signifie théoriquement que le delta P est plus difficile à détecter.

Enfin, nous souhaiterons observer l'attitude de l'ADCP en fonction du type de delta P. Pour ce faire, nous utiliserons les orifices de différentes formes (circulaires et rectangulaire) pour tester les différents delta P (3.5.4).

Pour la réalisation de ces essais, nous déciderons des paramètres suivants :

i) Forme du delta P

ii) Position de l'appareil V50 dans le bassin

iii) Degré d'ouverture de la vanne

iv) Choix du différentiel de hauteur d'eau

La procédure suivie pour chaque essai qui viendra composer les différentes expériences est la suivante :

a. Les vannes sont fermées et l'ADCP positionné, sans prendre de mesure.

b. Le système de pompage est activé et l'eau de la partie aval est acheminée dans la partie amont jusqu'à l'obtention du différentiel de hauteur d'eau souhaité. À ce moment, nous arrêtons le système de pompage.

c. Le système de pompage crée des remous dans la zone amont. Afin d'éviter qu'ils viennent perturber les mesures, nous attendons 20 minutes afin d'obtenir un fluide au repos.

d. Après 20 minutes d'attente, nous lançons la prise de mesure. L'ADCP récupère les données des vitesses du fluide au repos durant 10 minutes.

e. Après les 10 minutes de mesure du bassin au repos, nous ouvrons la vanne rapidement à la position souhaitée. Le delta P s'active subitement et le fluide s'écoule à travers la vanne de la zone amont vers la zone aval. L'ADCP continue de recueillir les données et nous attendons que les hauteurs d'eau de la partie aval et de la partie amont s'équilibrent.

f. Une fois l'équilibre obtenu, nous laissons l'ADCP prendre des mesures pendant un minimum de 20 minutes supplémentaires.

g. La prise de donnée est ensuite arrêtée.

3.5.1 Expérience I : Comportement de l'ADCP dans des conditions idéales d'utilisation – Test de répétabilité

Dans cette expérience, nous avons utilisé les paramètres favorisant nos chances de détecter le delta P afin d'obtenir une première approche sur son comportement. Elle est composée de 4 essais totalement identiques. Nous vérifierons également sa capacité à réagir de la même manière afin de valider ou non la répétabilité des essais.

Pour ce faire, nous avons utilisé l'orifice circulaire horizontal de 20 cm de diamètre pour produire notre delta P. L'ADCP a été placé face au delta P à sec. À l'aide d'un LASER, nous avons rigoureusement placé l'ADCP de telle sorte qu'il pointe le centre du delta P (Figure 31).

Figure 31 : Positionnement à sec de l'ADCP pour l'expérience I

La vanne sera entièrement ouverte afin d'obtenir le meilleur débit. Les essais seront également réalisés avec une différence de hauteur d'eau de 2,4 m au départ.

3.5.2 Expérience II : Influence de la position de l'ADCP par rapport au delta P

Dans cette seconde expérience, nous avons fait varier la hauteur de l'ADCP sur la structure entre chaque essai afin d'étudier l'influence que ceci pourrait avoir dans la détection des delta P.

Pour ce faire, nous avons conservé les mêmes paramètres relatifs au delta P qu'a l'expérience I. Nous avons utilisé l'orifice circulaire horizontal de 20 cm, la vanne a été entièrement ouverte et le différentiel de hauteur d'eau est également conservé à 2,4 m.

Entre chaque essai, l'ADCP a en revanche été déplacé de 30 cm en hauteur jusqu'à atteindre la surface du fluide. Nous avons ainsi réalisé 5 essais au total. Le premier essai se situant à 30 cm au-dessus de la position qu'avait l'ADCP dans l'expérience I.

3.5.3 Expérience III : Diminution de la zone de dangerosité sans diminution de la vitesse du fluide

Comme l'indique le Tableau 1, la zone de dangerosité (DPDZ) dépend du débit du fluide, soit de la section d'ouverture de la vanne et de la vitesse du fluide. Or la vitesse du fluide dépend directement du différentiel de pression (équation 1). Nous souhaitons, dans cette expérience, observer le comportement de l'ADCP, lorsque la zone de dangerosité diminue suite à la diminution de la surface d'ouverture de la vanne, sans pour autant modifier la vitesse résultante due au delta P.

Pour ce faire, nous avons de nouveau conservé certains paramètres utilisés à l'expérience I. Nous avons utilisé l'orifice circulaire horizontal de 20 cm, l'appareil V50 a de nouveau été positionné face au delta P circulaire horizontal comme indiqué sur la Figure 31 et le différentiel de hauteur d'eau est également conservé à 2,4 m.

En revanche, la vanne a été ouverte de 15° supplémentaires entre chaque essai. Lors du premier essai, l'ouverture de la vanne est de 15°. Nous avons répété les essais jusqu'à obtenir une ouverture de 75°. Cinq essais ont donc été réalisés pour composer notre expérience III.

3.5.4 Expérience IV : Différentes formes de Delta P

Enfin, nous avons réalisé des essais sur deux autres formes de delta P communément rencontrées en plongée sous-marine, afin d'observer si la géométrie a une influence sur le comportement de l'ADCP.

De la même manière qu'à l'expérience I (3.5.1), l'ADCP est positionné à 2,3 m du mur. Cependant, il sera placé face aux deux autres formes de delta P pouvant être testées.

En premier lieu, l'ADCP sera placé une première fois face à l'orifice circulaire vertical de 20 cm de diamètre. Cette expérience sera appelée l'expérience IV.A. En second lieu, l'ADCP sera placé face à l'orifice rectangulaire de section 90 cm x 7,5 cm. Cette expérience sera appelée l'expérience IV.B. Les différentes sections utilisées dans ces deux sous-expériences sont visualisable sur la Figure 28.

L'expérience IV.A sera composée de deux essais tandis que l'expérience IV.B sera composée de 3 essais. Les vannes ont également été entièrement ouvertes et la différence de hauteur d'eau utilisée est également 2,4 m.

3.6 MODÈLE PROBABILISTE DU TEST D'HYPOTHÈSE

Afin de conclure sur la capacité d'un ADCP à détecter les différents delta P, il nous faut établir un modèle rigoureux et fiable qui permet de conclure sur la présence d'un delta P ou non à partir d'un échantillon de mesures obtenues par l'appareil V50. Cela permettra alors d'assurer la présence d'un danger ou non dans la zone d'intervention du plongeur.

Pour ce faire, nous avons choisi d'étudier l'approche du test d'hypothèse comme outil de décision sur la présence ou non d'un delta P. Cette approche est très utilisée dans l'univers scientifique afin de rejeter ou non une hypothèse à partir d'une population. Elle a notamment l'avantage de s'appuyer sur des concepts mathématiques uniquement, ce qui élimine forcément le caractère subjectif dans la prise de décision.

3.6.1 Introduction aux tests d'hypothèses

On appelle test d'hypothèse un procédé mathématique d'inférence permettant de choisir entre deux hypothèses à partir d'une étude ou d'un échantillon aléatoire (Dantan & Homri, 2018; Foucart, 2000; Ruch, 2012; Watkins, 2019).

Les tests d'hypothèse permettent avec un certain degré de probabilité de conclure si la différence observée au niveau de l'étude ou de l'échantillon est due au hasard ou bien à un paramètre extérieur.

Dans notre situation, notre objectif en utilisant le test d'hypothèse est de conclure durant les essais s'il y a présence ou non d'un delta P. Au vu des expériences réalisées, nous souhaitons donc analyser les mesures de vitesses obtenues afin de conclure sur la présence à un instant donné du delta P ou non.

3.6.2 Construction des tests d'hypothèse

Selon la méthodologie de la construction des tests proposée dans la littérature, nous définissons les deux hypothèses suivantes :

- L'hypothèse nulle, notée H_0 : « Il n'y a pas de delta P »
- L'hypothèse alternative, notée H_A : « Il y a présence d'un delta P »

Les tests permettent d'accepter ou de rejeter l'hypothèse H_0 avec laquelle nous travaillons. Par extension, le fait de rejeter H_0 permet de retenir H_A, et le fait d'accepter H_0 permet de rejeter H_A.

3.6.3 Erreurs potentielles

Le test statistique ne permet pas d'assurer la présence ou non d'un delta P. Il s'agit simplement d'un critère de décision. Par conséquent, il peut arriver deux erreurs potentielles :

- Le test rejette H_0 alors qu'H_0 était vraie. Ceci signifie que le test détecte la présence d'un delta P, alors qu'il n'y en avait pas. On appelle cette erreur « risque de première espèce ». Le risque est fixé par l'expérimentateur à partir d'une valeur de risque α.

- Le test accepte H_0 alors qu'H_0 est faux. Ceci signifie que le test détecte l'absence de delta P alors qu'il y en a un. On appelle cette erreur « risque de deuxième espèce », de probabilité β. Le risque associé est directement dépendant de la distribution de l'échantillon et du risque α choisi précédemment.

Le premier cas n'est pas très grave. Si le test conclut qu'il y a un delta P alors qu'il n'y en a pas, le plongeur ne se sera pas mis en danger. Cependant, dans le deuxième cas, ceci signifierait que le test conclut qu'il n'y a pas de delta P, alors qu'il y en a un. Dans ce cas nous pouvons imaginer que le plongeur poursuivrait son intervention et se dirigerait en direction du delta P. Par exemple :

Test \ Réalité	H_0 vraie	H_A vraie
H_0 décidé	Correct	Manque de puissance Risque de seconde espèce Probabilité β
H_A décidé	Rejet à tort Risque de première espèce Probabilité α	Correct

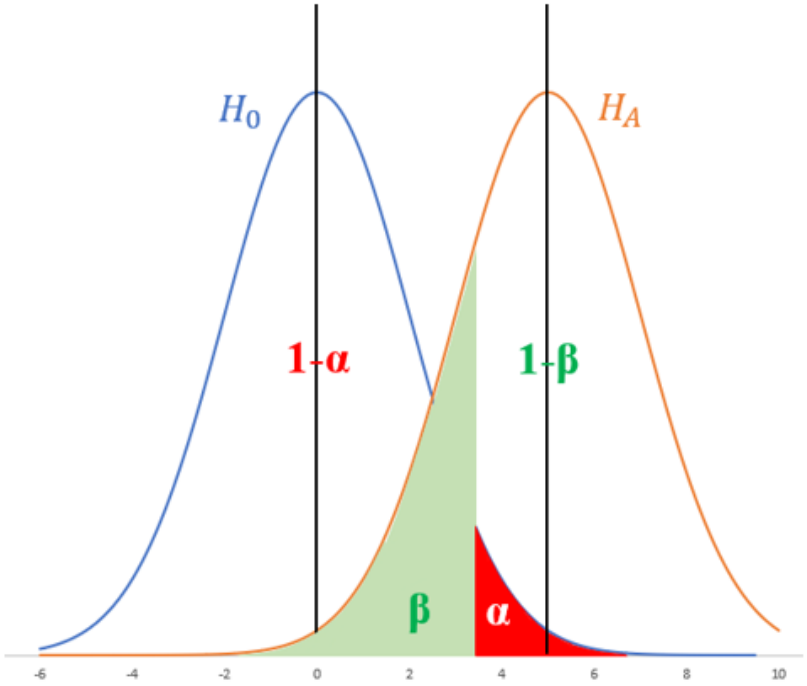


Figure 32 : Résumé des risques de première et deuxième espèce

3.6.4 Réalisation

Comme expliqué précédemment, le test d'hypothèse permet de quantifier statistiquement l'inférence existant entre des paramètres statistiques. Dans notre cas, notre

objectif est de comparer les données statistiques (moyenne ou écart-type) d'un échantillon par rapport à une référence. De cette manière, nous pouvons décider si l'échantillon est statistiquement proche ou très éloigné de l'échantillon de référence et ainsi rejeter l'hypothèse ou non.

On comprend alors que notre test a besoin d'un échantillon et d'une référence :

- L'échantillon est évidemment composé des mesures de vitesses obtenues par l'ADCP selon les expériences réalisées.

- La référence peut quant à elle être choisie par l'utilisateur et doit représenter la valeur statistique (moyenne ou écart-type) obtenue dans le cas d'absence de delta P. Cependant, nous verrons dans le CHAPITRE 4 que les résultats ne nous permettent pas de fixer cette valeur. Par conséquent, nous avons décidé de composer un intervalle de référence à partir des valeurs de vitesses obtenues également par l'ADCP. L'intervalle évoluera donc constamment au cours du temps. Il devra notamment s'adapter aux variations naturelles du fluide, sans pour autant s'adapter aux évolutions causées par le delta P.

Dans la suite de l'étude, on notera $I_{réf}$ et $I_{éch}$ les intervalles représentant respectivement les mesures de vitesses de l'intervalle de référence et de l'échantillon.

N'étant pas censé connaître les périodes de présence d'un delta P, il est normal de voir dans la suite de l'étude que $I_{réf}$ sera amené à prendre en compte les vitesses engendrées par le delta P. L'idée derrière la composition de notre référence est d'obtenir une valeur statistique de référence forgée sur les dernières mesures de vitesses en supposant l'absence de delta P. L'intervalle est alors idéalement composé d'un maximum de mesures de vitesses. Cependant, si trop de valeurs sont prises en compte celui-ci ne s'adapte pas aux fluctuations naturelles du fluides (risque de première espèce). Ainsi, il faut choisir un intervalle suffisamment petit permettant à la valeur statistique de s'adapter aux fluctuations naturelles

du fluides, mais suffisamment grand afin qu'il de s'adapte pas aux variations brutales de vitesses pouvant refléter l'apparition du delta P. Pour ce faire, il est important de conserver un échantillon de vitesses $I_{éch}$ bien plus petit que celui qui compose $I_{réf}$.

Notez que nous faisons l'hypothèse que $I_{réf}$ représente les valeurs de vitesses obtenues en l'absence de delta P. Dans les expériences, ceci est vrai avant ouverture de la vanne et peu après l'équilibre des hauteurs d'eau. Durant la phase de delta P, nous assumons que $I_{réf}$ est partiellement composé de valeurs de vitesses représentatives du delta P. Même si les valeurs statistiques de références ne représentent plus uniquement l'absence de delta P, il est intéressant de comparer les valeurs statistiques de l'échantillon avec celles de référence afin d'observer si elles peuvent demeurer significativement différentes et conclure sur la présence d'un delta P. Ceci montre une nouvelle fois l'importance de conserver un échantillon de vitesses $I_{éch}$ bien plus petit que celui qui compose $I_{réf}$.

La procédure des essais décrite dans le paragraphe (3.5) permet d'obtenir pour chaque essai des mesures de vitesses dans les 5 premières cellules sur une période dépendant de la durée de l'essai. L'appareil V50 prend en moyenne une mesure dans chaque cellule toutes les 0,5 secondes. Par conséquent, pour chaque cellule, le nombre de valeurs de vitesses mesurées noté N_{mesure} vaut :

$$N_{mesure} = \frac{D_{essai}}{T_{mesure}} \qquad (20)$$

- N_{mesure} est le nombre de valeur de vitesse mesurée durant l'essai
- D_{essai} est la durée de l'essai (s)
- T_{mesure} est la période entre 2 mesures de vitesses (s)

Pour l'intervalle de référence, nous prendrons $N_{réf}$=100. Nous verrons que 100 valeurs de vitesses permettent à l'intervalle d'évoluer au cours du temps et de s'adapter aux

évolutions naturelles des mouvements du fluide. L'échantillon sera quant à lui composé de $N_{éch}$=30 valeurs de vitesses. Ceci permet de respecter le critère des grands nombres ($N_{éch}$≥30) nécessaire au test, tout en minimisant le temps de traitement.

La Figure 33 résume le processus de formation de $I_{réf}$ et de $I_{éch}$ à partir de I_{mesure} pour chaque itération.

Les deux intervalles $I_{réf}$ et de $I_{éch}$ glissent d'un pas de $N_{éch}$ valeurs le long de l'intervalle de mesure I_{mesure} entre chaque itération. De cette manière, les données statistiques nécessaires aux tests d'hypothèse sont récupérées à chaque itération, puis testées (3.6.5).

De cette manière, nous pouvons obtenir une décision quant à la présence ou l'absence de delta P pour chaque itération, tout au long de l'essai.

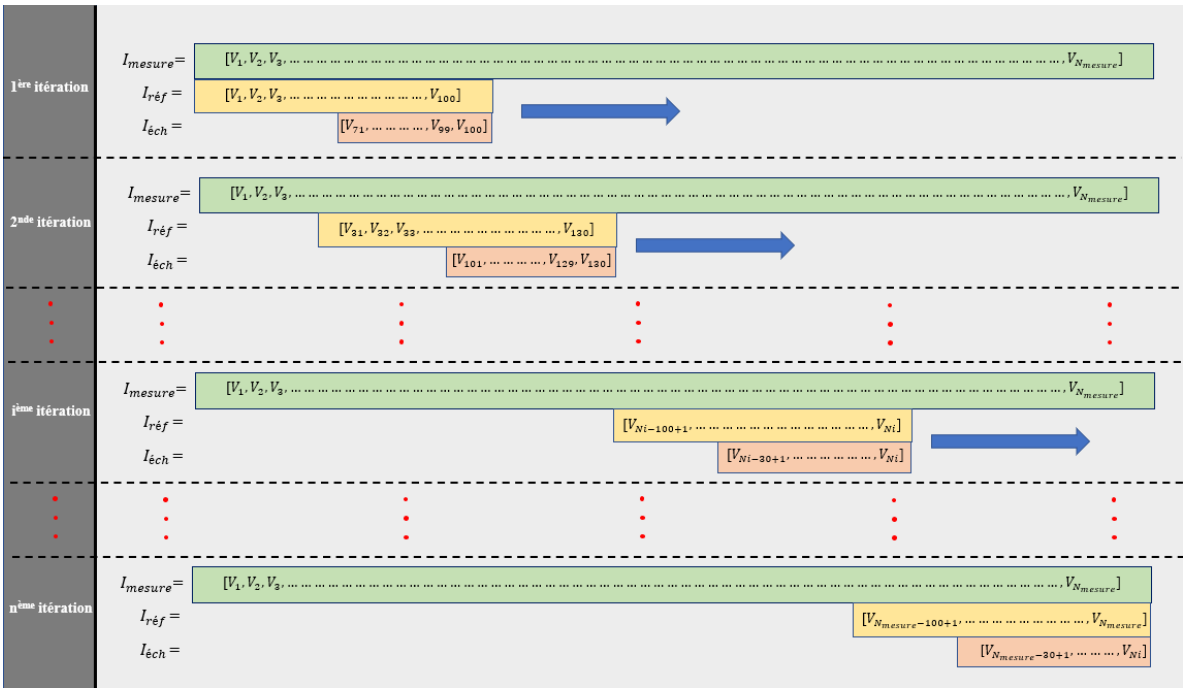


Figure 33 : Processus de récupération des intervalles de références et d'échantillon utilisés pour les tests d'hypothèse

3.6.5 Tests explorés

Nous nous appuierons sur trois tests différents afin d'étudier leur comportement dans le cadre de notre étude :

- Le test paramétrique sur la moyenne
- Le test de comparaison de moyennes
- Le test de comparaison de variances

Chaque test permet de calculer une variable de décision à partir des intervalles obtenus. Cette variable de décision est ensuite comparée à un critère de décision (appelé seuil) qui permet de décider si l'on rejette H_0 ou non.

À partir des conclusions du test, nous serons capables d'observer si le test est fiable, c'est-à-dire que l'hypothèse H_0 est vérifiée lorsqu'il y a bel et bien absence d'un delta P, et que l'hypothèse H_A est vérifiée lorsqu'il y a bel et bien présence d'un delta P. Ce critère permettra de conclure quant à la capacité d'un ADCP à détecter les différents delta P, par l'intermédiaire des différents tests d'hypothèse.

Afin d'utiliser convenablement les tests, la littérature mentionne qu'en condition normale d'utilisation les vitesses mesurées par l'ADCP doivent suivre une loi normale. Nous vérifierons cette hypothèse dans la section 5.6.2. Les modèles seront programmés et testés sur Matlab à partir des expériences précédentes.

3.6.6 Test 1 : Test paramétrique sur la moyenne

L'idée du premier test est simple : rejeter l'hypothèse nulle si la vitesse mesurée sort d'un certain intervalle. C'est le principe du test paramétrique sur la moyenne (Ruch, 2012).

Pour ce faire, on se propose d'accepter H_0 si la vitesse mesurée appartient à l'intervalle suivant :

$$\left[V_{réf} - u_{1-\frac{\alpha_{seuil}}{2}} * \frac{\sigma_{éch}}{\sqrt{N_{éch}}}; V_{réf} + u_{1-\frac{\alpha_{seuil}}{2}} * \frac{\sigma_{éch}}{\sqrt{N_{éch}}}\right] \quad (21)$$

- $V_{réf}$ est la moyenne de référence au test correspondant à la moyenne des mesures de vitesses obtenue sur un intervalle $I_{réf}$ (cm/s)
- α_{seuil} est le seuil de risque accepté dans le test d'hypothèse
- $u_{1-\frac{\alpha_{seuil}}{2}}$ est le quantile d'ordre $1 - \frac{\alpha_{seuil}}{2}$ obtenu à partir des tables de la loi normale centrée réduite
- $\sigma_{éch}$ est l'écart-type obtenu à partir des mesures sur l'intervalle $I_{éch}$ (cm/s)
- $N_{éch}$ est le nombre de mesures que comporte l'échantillon pour le test

Pour ce test, nous avons décidé de choisir $\alpha_{seuil} = 5\%$ soit $t(\alpha_{seuil}) = 1{,}96$ selon les tables de la loi normale centrée réduite.

3.6.7 Test 2 : Comparaison de moyennes

Dans le cadre de la détection d'un delta P, nous nous proposons avec ce test de comparer la moyenne d'un échantillon de mesures à une moyenne de référence. Ce test a l'avantage de comparer directement deux moyennes, en supposant donc que la moyenne de référence caractérise un écoulement sans delta P (Foucart, 2000; Ruch, 2012).

Pour ce faire, on considère la variable aléatoire T qu'on définit par :

$$T = \left| \frac{V_{éch} - V_{réf}}{\sqrt{\frac{{\sigma_{éch}}^2}{N_{éch}} + \frac{{\sigma_{réf}}^2}{N_{réf}}}} \right| \quad (22)$$

- $V_{éch}$ est la vitesse moyenne de l'échantillon (cm/s)
- $V_{réf}$ est la vitesse moyenne de référence (cm/s)
- ${\sigma_{éch}}^2$ est la variance de l'échantillon
- ${\sigma_{réf}}^2$ est la variance de référence
- $N_{éch}$ est le nombre de valeurs représentant l'échantillon testé
- $N_{réf}$ est le nombre de valeurs représentant l'échantillon de référence

La variable aléatoire suit alors une loi de Student à υ degrés de liberté où υ est l'entier le plus proche de :

$$\upsilon = \frac{\left(\frac{{\sigma_{éch}}^2}{N_{éch}} + \frac{{\sigma_{réf}}^2}{N_{réf}}\right)^2}{(N_{éch} - 1)\frac{{\sigma_{éch}}^4}{{N_{éch}}^4} + (N_{réf} - 1)\frac{{\sigma_{réf}}^4}{{N_{réf}}^4}} \quad (23)$$

Pour un α_{seuil} choisi, l'hypothèse nulle est rejetée si le résultat du calcul de la variable de décision à chaque itération est compris dans l'intervalle :

$$\left]t_{1-\frac{\alpha_{seuil}}{2}}(\upsilon), +\infty\right[\quad (24)$$

- $t_{1-\frac{\alpha_{seuil}}{2}}(\upsilon)$ est le quantile d'ordre $1 - \frac{\alpha_{seuil}}{2}$ à υ degrés de liberté obtenu à partir des tables de la loi de Student

Nous avons décidé de prendre $\alpha_{seuil} = 5\%$, soit $t_{1-\frac{\alpha_{seuil}}{2}}(\upsilon) = 1{,}96$. Ceci est discuté au paragraphe 5.6.4.

3.6.8 Test 3 : Comparaison de variances

Ce test permet de considérer la variance comme critère décisionnel, contrairement aux tests 1 et 2 qui s'appuyaient sur la moyenne des intervalles (Dantan & Homri, 2018; Foucart, 2000; Ruch, 2012).

Pour ce faire, on considère la variable aléatoire Y définie par :

$$Y = \frac{N_{éch} * {\sigma_{éch}}^2}{{\sigma_0}^2} \tag{25}$$

- ${\sigma_{éch}}^2$ est la variance de l'échantillon
- ${\sigma_0}^2$ est une variance de référence
- $N_{éch}$ est le nombre de valeurs de l'échantillon

Y suit alors une loi du χ^2 à $N_{éch}$-1 degrés de liberté. Pour un critère α_{seuil} donné, on définit alors la région de rejet par l'intervalle :

$$\left]0, \chi^2_{\frac{\alpha_{seuil}}{2}}(N_{éch}-1)\right[\cup \left]\chi^2_{1-\frac{\alpha_{seuil}}{2}}(N_{éch}-1), +\infty\right[\tag{26}$$

- $\chi^2_{\frac{\alpha_{seuil}}{2}}(N_{éch}-1)$ est le quantile d'ordre $\frac{\alpha_{seuil}}{2}$ à $(N_{éch}-1)$ degrés de liberté obtenu à partir des tables de la loi du χ^2
- $\chi^2_{1-\frac{\alpha_{seuil}}{2}}(N_{éch}-1)$ est le quantile d'ordre $1-\frac{\alpha_{seuil}}{2}$ à $(N_{éch}-1)$ degrés de liberté obtenu à partir des tables de la loi du χ^2

Au regard des résultats observés dans le CHAPITRE 4, nous avons décidé de choisir ${\sigma_0}^2 = 2$. D'après les tables du χ^2 à 29 degrés de liberté, on a aussi $\chi^2_{\frac{\alpha_{seuil}}{2}}(n_{éch} - 1) = 16{,}05$ et $\chi^2_{1-\frac{\alpha_{seuil}}{2}}(n_{éch} - 1) = 45{,}72$.

CHAPITRE 4
RÉSULTATS ET ANALYSES

4.1 INTRODUCTION

Cette présente introduction a pour objectif de présenter les courbes obtenues lors de la prise de mesure d'un seul essai. Cette première approche favorisera notablement la compréhension des résultats obtenus dans les différentes expériences présentées ci-dessous. L'Annexe I rappelle les spécifications de l'appareil V50 et montre le paramétrage de celui-ci choisi pour les essais.

4.1.1 Présentation d'une courbe

La Figure 34 représente la vitesse radiale mesurée par l'ADCP au sein de la seconde cellule lors d'un essai. On retrouve en abscisse le temps (s) et en ordonnée la vitesse verticale mesurée par l'instrument (cm/s). Pour rappel, la vitesse radiale correspond à la vitesse relative mesurée par l'ADCP selon son axe d'orientation, et non la vitesse réelle du fluide. Ceci est expliqué au paragraphe 1.4.5. Chaque point correspond à une mesure de vitesse à un instant donné.

Des droites verticales apparaissent sur les figures. Elles correspondent à un évènement qui s'est déroulé à un instant donné lors de la prise de mesure. Dans le cas de la figure ci-dessous par exemple, la droite verticale rouge représente l'ouverture d'une vanne, et la bleue correspond à l'équilibre visuel des hauteurs d'eau, soit la fin du delta P. Elles permettent de

faciliter l'analyse des courbes et d'observer simplement le comportement de l'ADCP selon chaque essai.

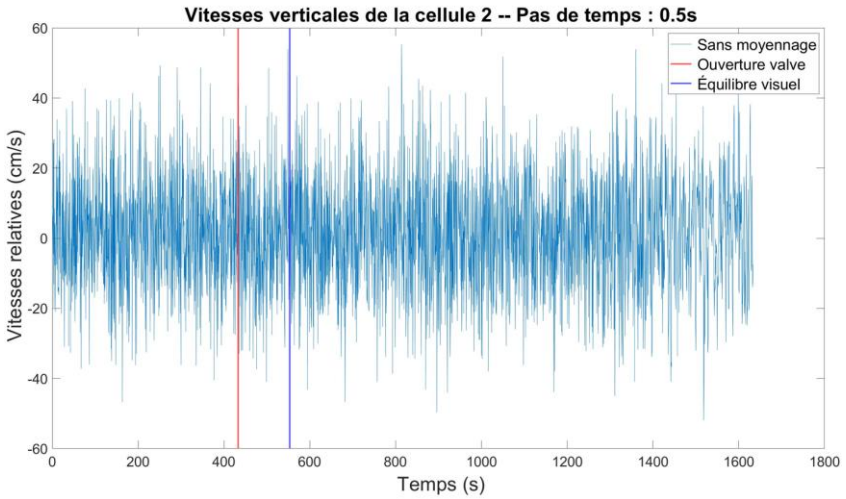


Figure 34 : Courbe de vitesses de la cellule 2 dans un cas de delta P

4.1.2 Analyse d'un essai préliminaire

Le Tableau 2 représente les mesures de vitesses recueillies par l'ADCP lors d'un essai préliminaire aux expériences. Celui-ci consistait à ouvrir la vanne dans des conditions similaires à l'expérience I. Elles représentent respectivement les mesures de vitesses obtenues selon les cellules 1, 2, 3, 4 et 5.

Tableau 2 : Analyse préliminaire des cinq premières cellules

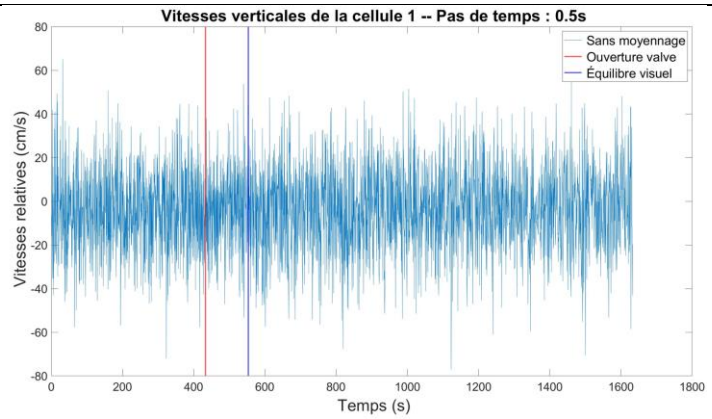
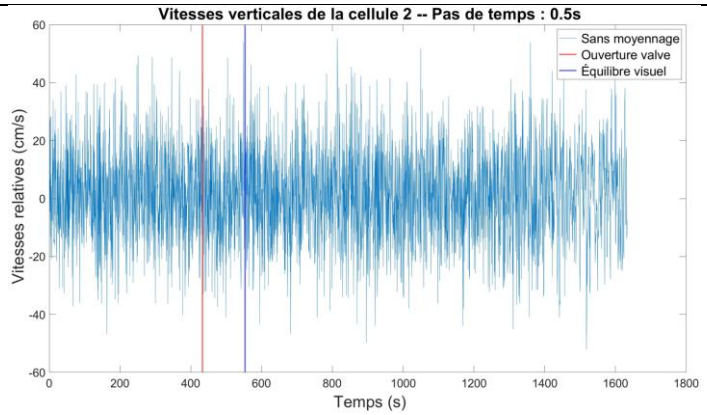
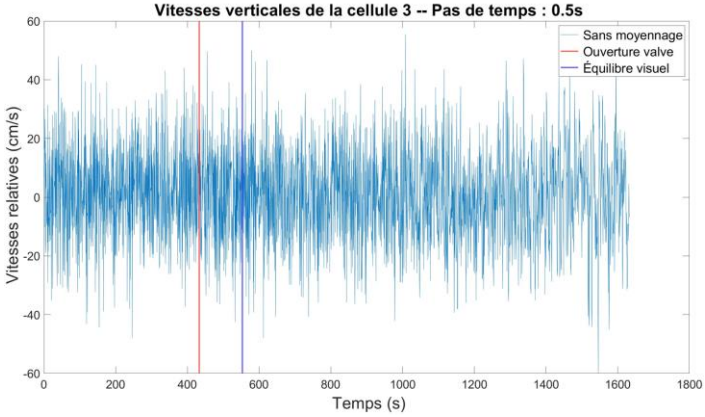
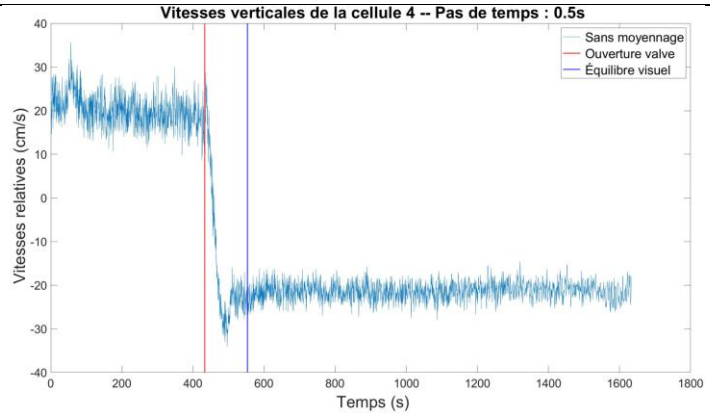
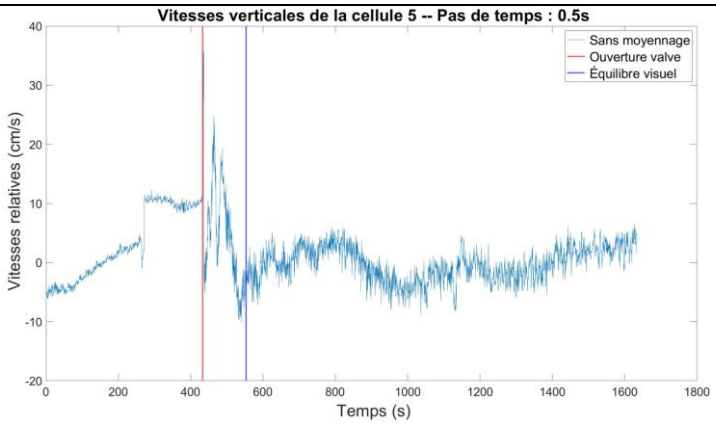
(2.1)	
(2.2)	
(2.3)	

Tableau 2 : Analyse préliminaire des cinq premières cellules (suite)

(2.4)	
(2.5)	

Nous constatons d'emblée que les trois premières cellules ne repèrent aucun changement de vitesse dû à l'ouverture de la vanne. Ceci est valable pour la quasi-totalité des essais réalisés dans chaque expérience (excepté pour l'expérience IV.A, mentionné dans la discussion).

Comme précisé dans la section 1.3, les vitesses dues au delta P décroissent très rapidement. Par exemple, pour une différence de hauteur d'eau de 10 mètres (Figure 5), la vitesse décroit dans les 50 premiers centimètres autour du delta P. Au-delà, celle-ci est quasi nulle. La troisième cellule se situe au plus proche à 80 centimètres du delta P. Par conséquent,

il n'est pas étonnant d'observer que les trois premières cellules de l'ADCP n'observent aucune variation de vitesse mais seulement du bruit.

En revanche, les cellules 4 et 5 nous renvoient des courbes intéressantes. Pour ces raisons, seules les figures correspondant aux cellules 4 et 5 seront présentées et analysées dans les prochaines sections.

Dans la suite de l'étude, nous distinguerons trois zones définissant chaque phase :

- La phase de préouverture, qualifiant la phase avant ouverture de la vanne.
- La phase de delta P, délimité par l'ouverture de la vanne et l'atteinte de l'équilibre visuel, soit l'apparition puis la fin du delta P.
- La phase d'équilibre, correspondant à la zone post delta P où il n'y a plus de différences de hauteur d'eau et donc plus de delta P.

4.2 RÉSULTATS DE L'EXPÉRIENCE I – COMPORTEMENT DE L'ADCP DANS DES CONDITIONS OPTIMALES D'UTILISATION – TEST DE RÉPÉTABILITÉ

Les conditions de l'expérience I sont décrites à la section 3.5.1.

4.2.1 Présentation et analyse des résultats – Cellule 4

Dans le Tableau 3, les courbes de la 4^{e} cellule sont représentées. À droite de chaque courbe figurent des données statistiques telles que la moyenne (M) et l'écart-type (ET). Elles sont obtenues avant l'ouverture de la vanne et après l'équilibre visuel. Elles sont indiquées respectivement pas l'abréviation A.O (Avant Ouverture) et A.E (Après Équilibre).

Tableau 3 : Résultats de l'expérience I – conditions optimales - Cellule 4

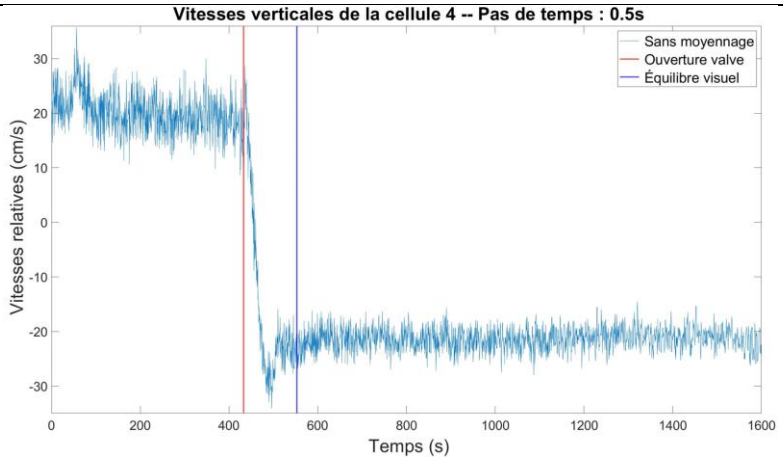
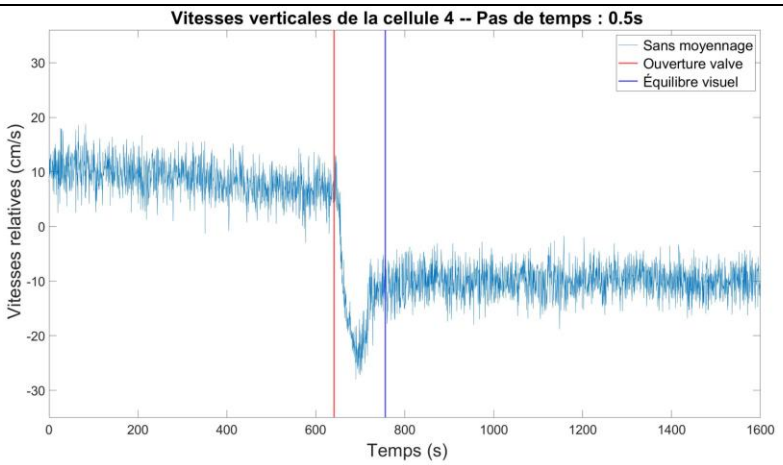
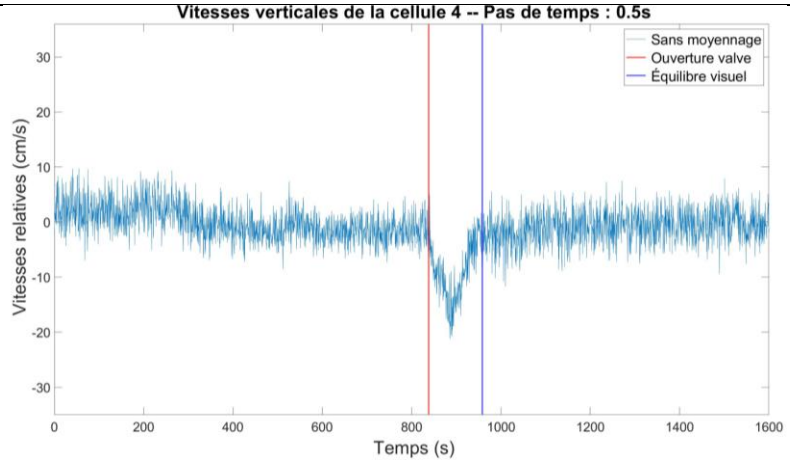
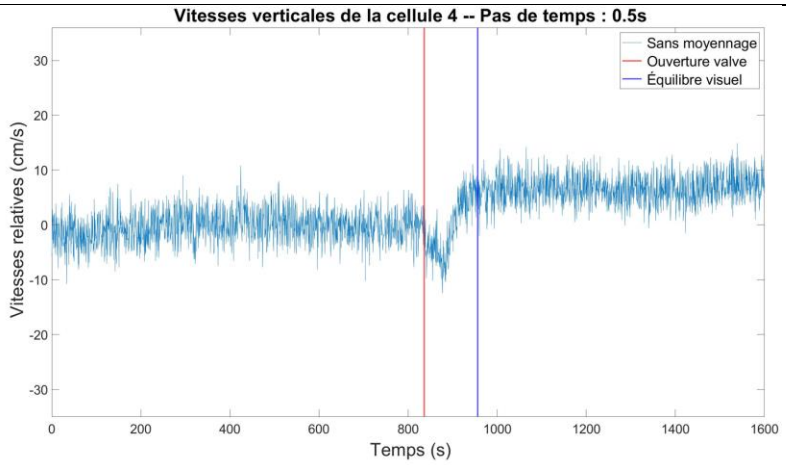
(3.1)		M_AO	**20,2**	**cm/s**
		ET_AO	**3,7**	**cm/s**
		M_AE	**-21,3**	**cm/s**
		ET_AE	**2,0**	**cm/s**
		Vmin :	**-34,1**	**cm/s**
		Vmax :	**35,7**	**cm/s**
(3.2)		M_AO	**8,8**	**cm/s**
		ET_AO	**3,1**	**cm/s**
		M_AE	**-9,9**	**cm/s**
		ET_AE	**2,6**	**cm/s**
		Vmin :	**-28,0**	**cm/s**
		Vmax :	**18,7**	**cm/s**
(3.3)		M_AO	**0,0**	**cm/s**
		ET_AO	**3,1**	**cm/s**
		M_AE	**-0,8**	**cm/s**
		ET_AE	**2,5**	**cm/s**
		Vmin :	**-21,2**	**cm/s**
		Vmax :	**9,8**	**cm/s**

Tableau 3 : Résultats de l'expérience I – conditions optimales - Cellule 4 (suite)

(3.4)		M_AO	**-0,4**	**cm/s**
		ET_AO	**2,9**	**cm/s**
		M_AE	**6,2**	**cm/s**
		ET_AE	**2,6**	**cm/s**
		Vmin :	**-12,4**	**cm/s**
		Vmax :	**14,9**	**cm/s**

Les quatre essais permettent de visualiser d'emblée trois parties distinctes, qui sont bien séparées par les évènements d'ouverture de la vanne et par l'équilibre visuel, soient respectivement l'apparition puis la disparition du delta P.

- Avant l'ouverture de la vanne, on remarque que les mesures tendent à osciller autour d'une certaine vitesse, qui sont cependant différentes selon les essais. Les 2 premiers essais mesurent respectivement 20,2 cm/s et 8,8 cm/s de moyenne. Les deux derniers essais mesurent une vitesse presque nulle, respectivement 0 cm/s et - 0,4 cm/s. Pourtant les essais ont été faits dans des conditions totalement similaires. De plus, avant ouverture de la vanne, le bassin est au repos. Par conséquent, nous pouvions nous attendre à obtenir des vitesses oscillantes autour de la vitesse nulle pour la totalité des essais, ce qui n'est pas le cas.

- Durant la phase de delta P, on remarque un pic descendant de vitesse jusqu'à une vitesse minimale. Une fois atteinte, la vitesse tend à remonter jusqu'à

l'évènement d'équilibre visuel. Ce pic de vitesse est observable sur les quatre figures. De plus, les vitesses minimales retenues dans la zone de delta P est notablement différente (respectivement -34 cm/s, -28 cm/s, -21 cm/s et -12 cm/s).

- Une fois l'équilibre visuel atteint, les mesures se stabilisent de nouveau et oscillent autour d'une seconde valeur de vitesse. Comme avant l'ouverture de la vanne, elles sont de nouveau différentes (respectivement -21,3 cm/s, -9,9 cm/s, -0,8 cm/s et 6,2 cm/s). Le bassin revient pourtant rapidement dans son état de repos à cette phase-ci.

Nous pouvons également remarquer que le palier de stabilisation obtenu durant la phase de préouverture et d'équilibre est différent, sauf pour la courbe 3 où la vitesse semble nulle dans les deux cas.

Enfin et quel que soit l'essai, le pic de vitesse observable se situe bel et bien dans la zone de delta P. Cette zone correspondant dans la totalité des cas à une durée de 120 secondes.

4.2.2 Présentation et analyse des résultats - Cellule 5

Les résultats de la cellule 5 sont présentés dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Résultats de l'expérience I – conditions optimales - Cellule 5

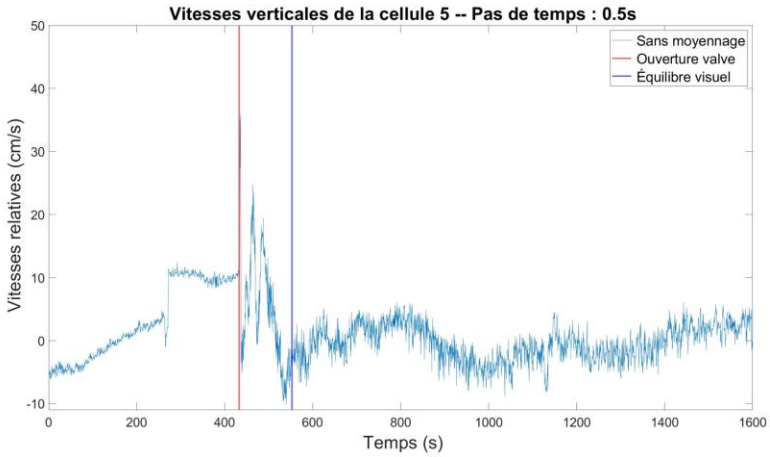
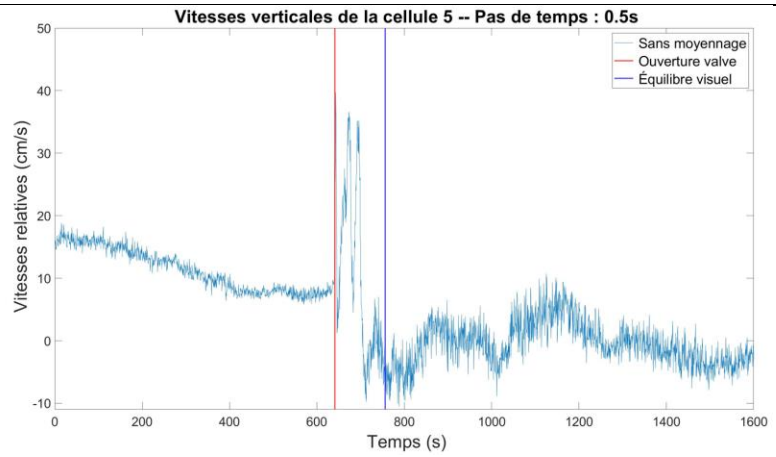
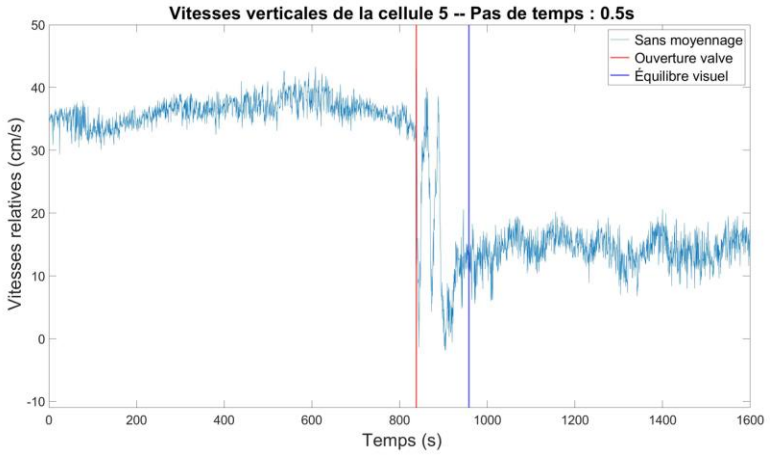
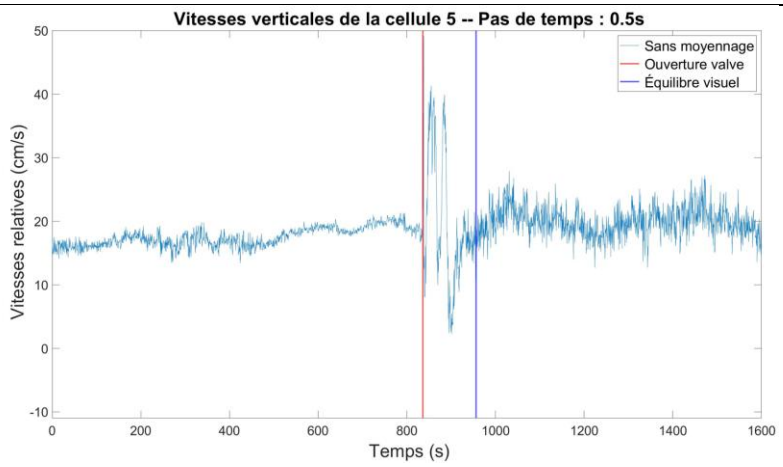
(4.1)		M_AO **2,9** **cm/s** ET_AO **5,9** **cm/s** M_AE **-0,3** **cm/s** ET_AE **2,8** **cm/s** Vmin : **-10,1** **cm/s** Vmax : **35,9** **cm/s**
(4.2)		M_AO **11,4** **cm/s** ET_AO **3,4** **cm/s** M_AE **-0,6** **cm/s** ET_AE **3,2** **cm/s** Vmin : **-10,5** **cm/s** Vmax : **39,7** **cm/s**
(4.3)		M_AO **36,2** **cm/s** ET_AO **2,0** **cm/s** M_AE **11,1** **cm/s** ET_AE **3,0** **cm/s** Vmin : **-1,9** **cm/s** Vmax : **43,3** **cm/s**

Tableau 4 : Résultats de l'expérience I – conditions optimales - Cellule 5 (suite)

(4.4)		M_AO	**17,5**	**cm/s**
		ET_AO	**1,5**	**cm/s**
		M_AE	**19,1**	**cm/s**
		ET_AE	**2,4**	**cm/s**
		Vmin :	**2,3**	**cm/s**
		Vmax :	**49,2**	**cm/s**

On remarque également trois zones de mesures visuellement différentes, séparées par les droites verticales.

- Durant la phase de préouverture les mesures de vitesses semblent également osciller autour d'une valeur moyenne généralement très différente (respectivement 2,9 cm/s, 11,4 cm/s, 36,2 cm/s et 17,5 cm/s). On observe également sur la première courbe un saut de vitesse qu'on ne retrouve pas dans les trois autres courbes.

- Durant la phase de delta P, on remarque des grandes variations de mesures de vitesses. Dès l'ouverture de la vanne, on obtient une chute de vitesse, puis une augmentation en second lieu, formant de nouveau un pic de vitesse. La vitesse maximale retenue dans la zone de delta P se situe entre 35,9 cm/s et 49,2 cm/s, soit un écart non négligeable de presque 15 cm/s.

- Enfin après ouverture, les mesures de vitesses oscillent également autour d'une valeur moyenne assez stable. Le palier de celui-ci peut être visuellement

différent de celui avant l'ouverture de la vanne, dépendamment des essais. Les deux premiers essais affichent une valeur moyenne quasi nulle. Les deux derniers essais affichent quant à eux des valeurs moyennes respectives de 11,1 cm/s et 19,1 cm/s

Enfin, le pic de vitesse est bel et bien contenu dans la zone de delta P.

4.3 RÉSULTATS DE L'EXPÉRIENCE II – INFLUENCE DE LA POSITION DE L'ADCP

Les conditions de l'expérience sont décrites au paragraphe 3.5.2. Entre chaque courbe, l'appareil V50 est déplacé de 30 cm en hauteur.

4.3.1 Présentation et analyse des résultats – Cellule 4

Les courbes de la cellule 4 de l'expérience II sont affichées dans le Tableau 5 ci-dessous.

Tableau 5 : Résultats de l'expérience II – élévation de l'ADCP - Cellule 4

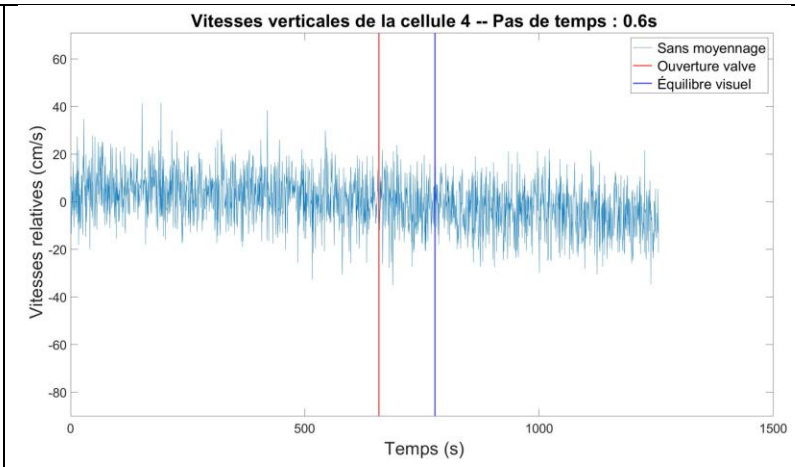
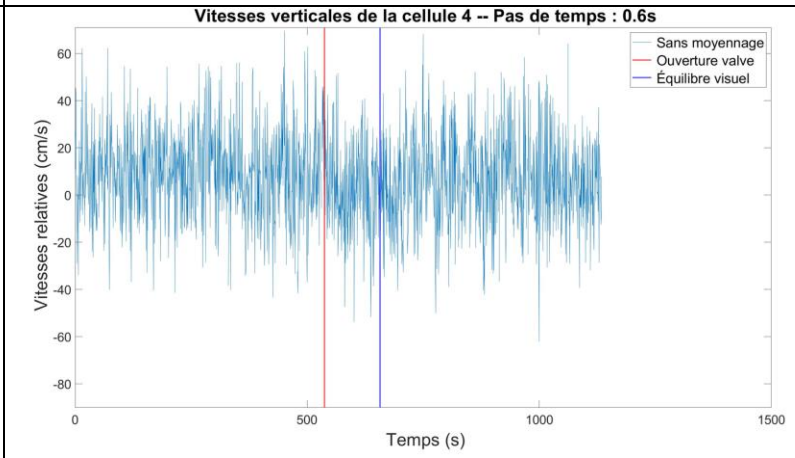
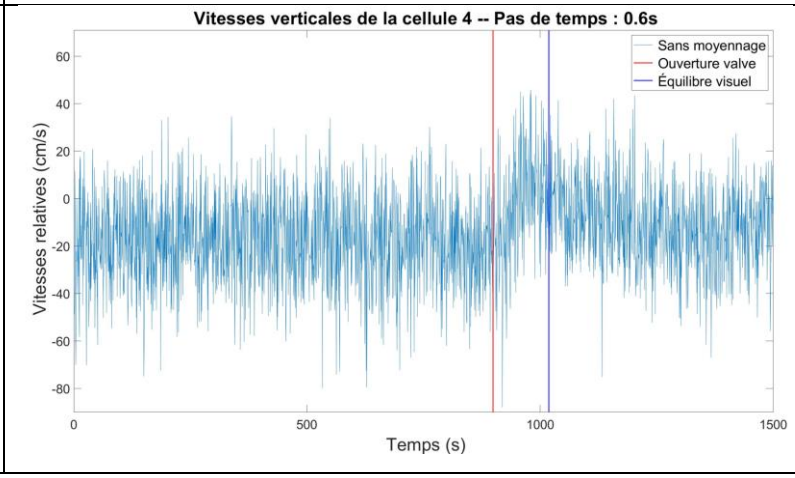
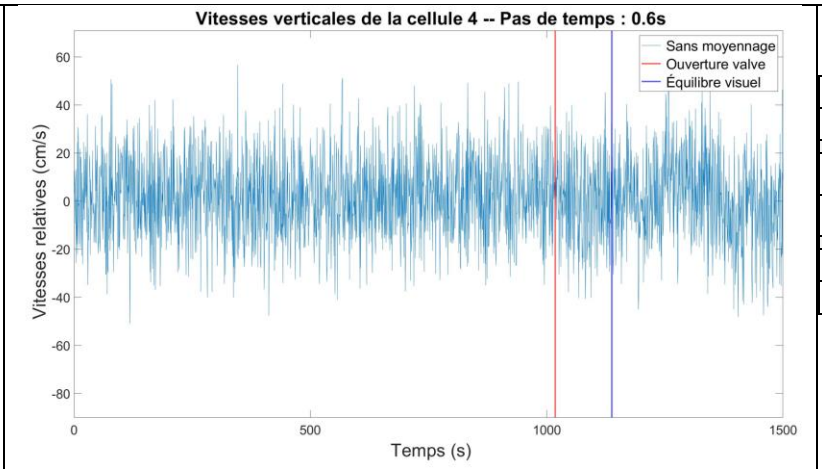
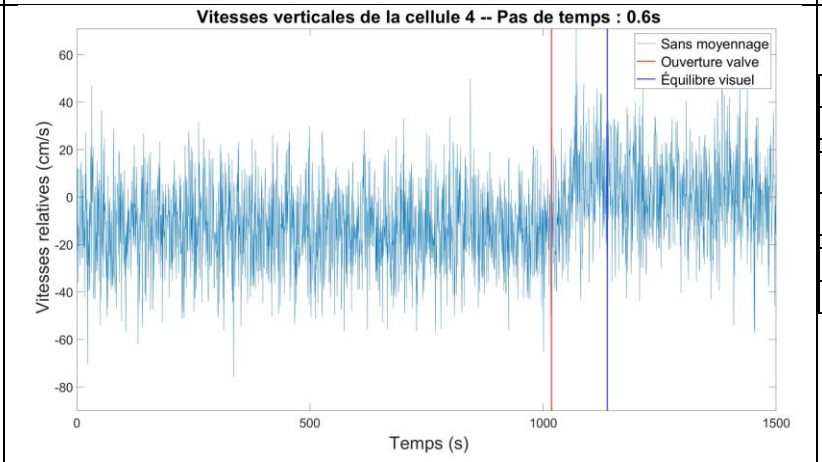
(5.1)		M_AO	**3,5**	**cm/s**
		ET_AO	**9,8**	**cm/s**
		M_AE	**-4,3**	**cm/s**
		ET_AE	**9,9**	**cm/s**
		Vmin :	**-35,0**	**cm/s**
		Vmax :	**41,6**	**cm/s**
		Position 30 cm		
(5.2)		M_AO	**9,0**	**cm/s**
		ET_AO	**18,8**	**cm/s**
		M_AE	**6,5**	**cm/s**
		ET_AE	**19,1**	**cm/s**
		Vmin :	**-62,0**	**cm/s**
		Vmax :	**69,7**	**cm/s**
		Position 60 cm		
(5.3)		M_AO	**-17,8**	**cm/s**
		ET_AO	**16,9**	**cm/s**
		M_AE	**-10,7**	**cm/s**
		ET_AE	**16,9**	**cm/s**
		Vmin :	**-87,9**	**cm/s**
		Vmax :	**45,9**	**cm/s**
		Position 90 cm		

Tableau 5 : Résultats de l'expérience II – élévation de l'ADCP - Cellule 4 (suite)

<table>
<tr>
<td>(5.4)</td>
<td> 
</td>
<td>
<table>
<tr><td>M_AO</td><td>2,2</td><td>cm/s</td></tr>
<tr><td>ET_AO</td><td>16,4</td><td>cm/s</td></tr>
<tr><td>M_AE</td><td>-1,1</td><td>cm/s</td></tr>
<tr><td>ET_AE</td><td>17,7</td><td>cm/s</td></tr>
<tr><td>Vmin :</td><td>-50,9</td><td>cm/s</td></tr>
<tr><td>Vmax :</td><td>64,3</td><td>cm/s</td></tr>
</table>
Position 120 cm
</td>
</tr>
<tr>
<td>(5.5)</td>
<td> 
</td>
<td>
<table>
<tr><td>M_AO</td><td>-13,5</td><td>cm/s</td></tr>
<tr><td>ET_AO</td><td>17,2</td><td>cm/s</td></tr>
<tr><td>M_AE</td><td>1,4</td><td>cm/s</td></tr>
<tr><td>ET_AE</td><td>17,7</td><td>cm/s</td></tr>
<tr><td>Vmin :</td><td>-75,9</td><td>cm/s</td></tr>
<tr><td>Vmax :</td><td>70,9</td><td>cm/s</td></tr>
</table>
Position 150 cm
</td>
</tr>
</table>

Dès le premier essai, on remarque que l'allure de la courbe ne nous permet plus de distinguer visuellement la zone de delta P. On remarque que :

- Dans les essais 1, 2 et 4, les mesures ne sont pas accompagnées d'une augmentation ou diminution de vitesse rapide lors de l'ouverture de la vanne ou lors de l'obtention de l'équilibre visuel.

- Dans les essais 3 et 5, les mesures permettent d'observer une légère augmentation de la vitesse lors de l'ouverture de la vanne, puis une légère diminution proche de l'équilibre visuel. Mais dans ces deux cas, les mesures obtenues durant la phase de delta P et durant la phase d'équilibre ne sont pas clairement différentes.

Nous pouvons également faire remarquer qu'avant ouverture de la vanne, les essais 1, 2 et 4 obtiennent une mesure de vitesse se situant entre 0 et 10 cm/s (respectivement 3,5 cm/s, 9,0 cm/s et 2,2 cm/s). Les essais 3 et 5 mesurent des vitesses très différentes (-17,8 cm/s et -13,5 cm/s). Il semblerait donc que les essais 3 et 5 aient réagi différemment par rapport au trois autres.

4.3.2 Présentation et analyse des résultats – Cellule 5

Les courbes de la cellule 5 de l'expérience II sont présentées dans le Tableau 6 ci-dessous.

Tableau 6 : Résultats de l'expérience II – élévation de l'ADCP - cellule 5

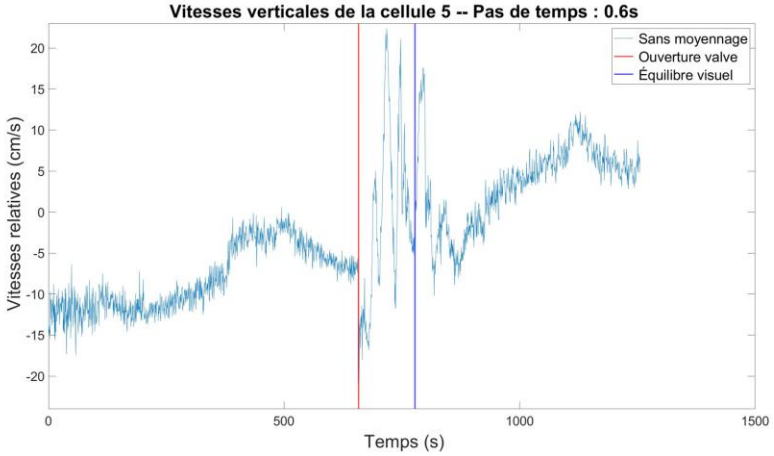
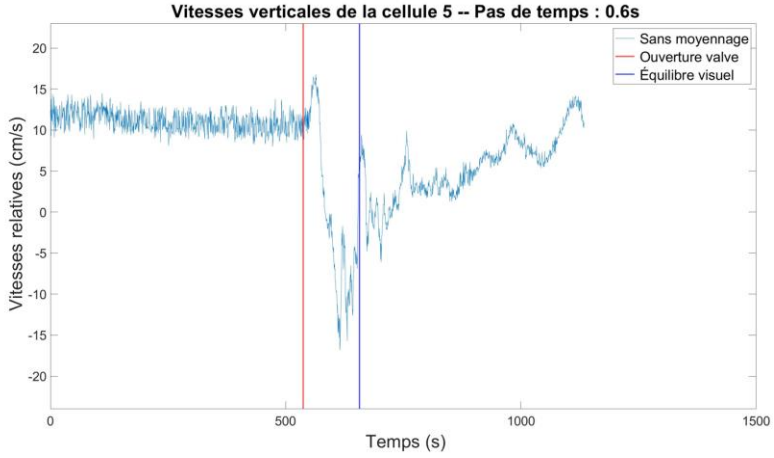
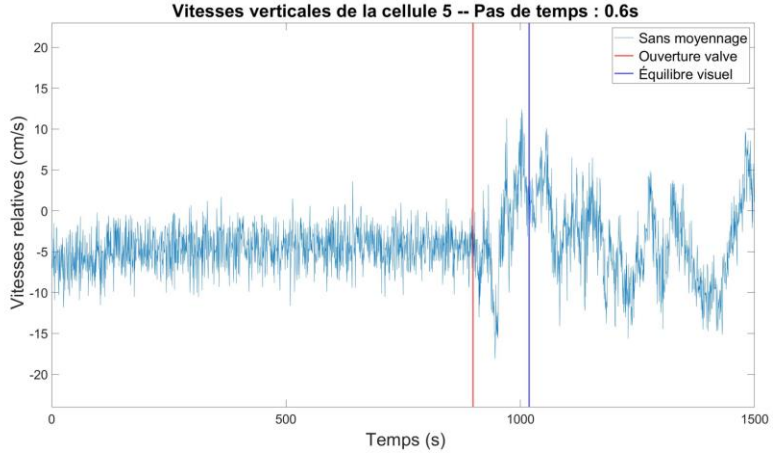
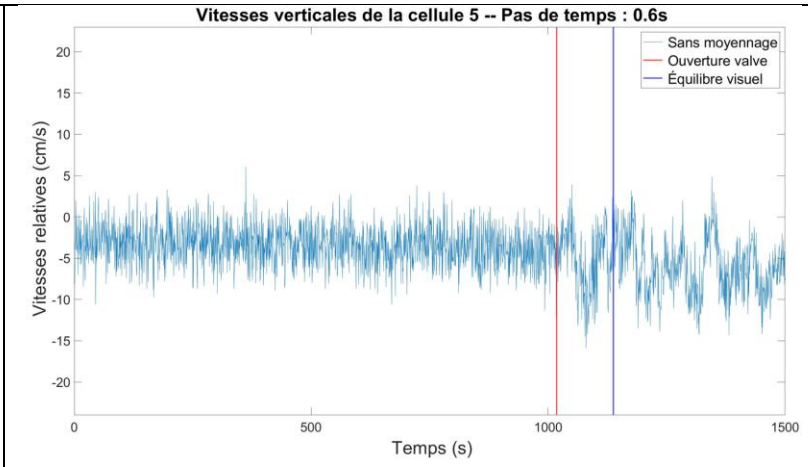
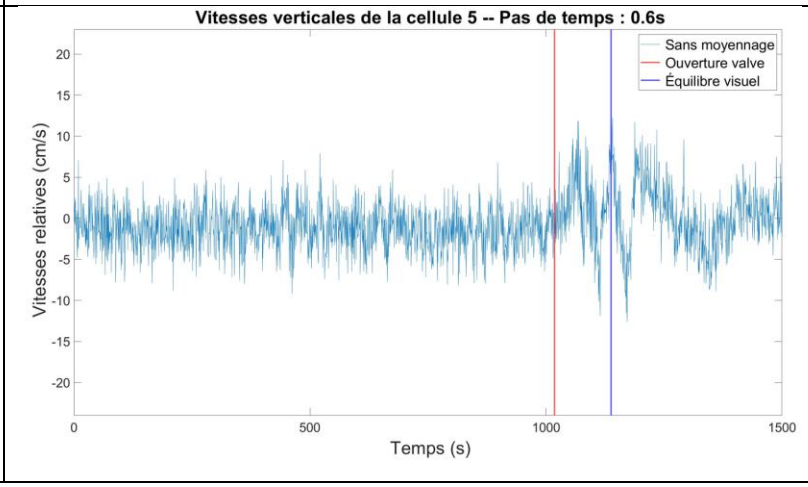
(6.1)		M_AO **-8,2 cm/s** ET_AO **3,9 cm/s** M_AE **3,5 cm/s** ET_AE **4,9 cm/s** Vmin : **-23,1 cm/s** Vmax : **22,4 cm/s** *Position 30 cm*
(6.2)		M_AO **11,1 cm/s** ET_AO **1,2 cm/s** M_AE **5,4 cm/s** ET_AE **3,9 cm/s** Vmin : **-16,8 cm/s** Vmax : **16,8 cm/s** *Position 60 cm*
(6.3)		M_AO **-4,6 cm/s** ET_AO **2,2 cm/s** M_AE **-3,7 cm/s** ET_AE **4,9 cm/s** Vmin : **-18,1 cm/s** Vmax : **12,4 cm/s** *Position 90 cm*

Tableau 6 : Résultats de l'expérience II – élévation de l'ADCP - cellule 5 (suite)

(6.4)		M_AO **-3,4 cm/s** ET_AO **2,4 cm/s** M_AE **-5,7 cm/s** ET_AE **3,7 cm/s** Vmin : **-15,9 cm/s** Vmax : **6,1 cm/s** *Position 120 cm*
(6.5)		M_AO **-1,3 cm/s** ET_AO **2,5 cm/s** M_AE **-0,1 cm/s** ET_AE **3,5 cm/s** Vmin : **-12,6 cm/s** Vmax : **12,3 cm/s** *Position 150 cm*

Les résultats obtenus par la cellule 5 sont ici totalement différents des résultats obtenus par la cellule 4. La cellule 5 permet visuellement de distinguer un changement d'allure dans la totalité des expériences dès l'ouverture de la vanne.

Comme dans l'expérience I, on remarque qu'avant ouverture de la vanne nous obtenons un profil de vitesse stable, mais que les vitesses tendent à osciller autour d'une vitesse moyenne pouvant être différente entre les essais.

Dès l'ouverture de la vanne, de grandes fluctuations apparaissent. Les profils de vitesses oscillent avec une amplitude relativement élevée, nous permettant de visuellement distinguer l'évènement d'ouverture de la vanne sur la totalité des essais. On remarque également que plus nous nous éloignons du delta P et plus l'amplitude des oscillations obtenues diminues. On remarque effectivement que la différence entre la vitesse maximale et la vitesse minimale obtenue diminue au fil des essais. Il n'y a cependant pas de tendance à relever sur l'allure de la courbe dans la zone de delta P. Par exemple dans le cas de la première courbe, les mesures de vitesses diminuent légèrement avant d'augmenter rapidement, atteignant ainsi la vitesse maximale. Dans le second cas, c'est l'inverse qui se produit. Les mesures de vitesses augmentent légèrement, avant de diminuer rapidement jusqu'à atteindre la vitesse minimale.

Une fois l'équilibre atteint, les mesures de vitesses continuent d'osciller avec une certaine amplitude. Plus on s'éloigne du delta P et plus les oscillations après l'équilibre visuel se dissimulent avec celles obtenues dans la zone de delta P. En effet, sur les deux premiers essais, on peut visuellement distinguer la fin de la zone de delta P, c'est-à-dire que nous sommes capables de relever le moment où l'équilibre visuel est atteint. En revanche, à partir du troisième essai, la zone de delta P se dissimule de plus en plus avec la zone d'équilibre visuel. Les oscillations sont alors d'amplitudes similaires aux oscillations observables dans la zone de delta P. Ce phénomène se confirme en observant les essais 4 et 5.

4.4 RÉSULTATS DE L'EXPÉRIENCE III - DIMINUTION DE LA ZONE DE DANGEROSITÉ

Les conditions de l'expérience III sont décrites au paragraphe 3.5.3.

4.4.1 Présentation et analyse des résultats – Cellule 4

Les courbes de la cellule 4 de l'expérience III sont affichées dans le Tableau 7 ci-dessous.

Tableau 7 : Résultats de l'expérience III – Augmentation du débit - Cellule 4

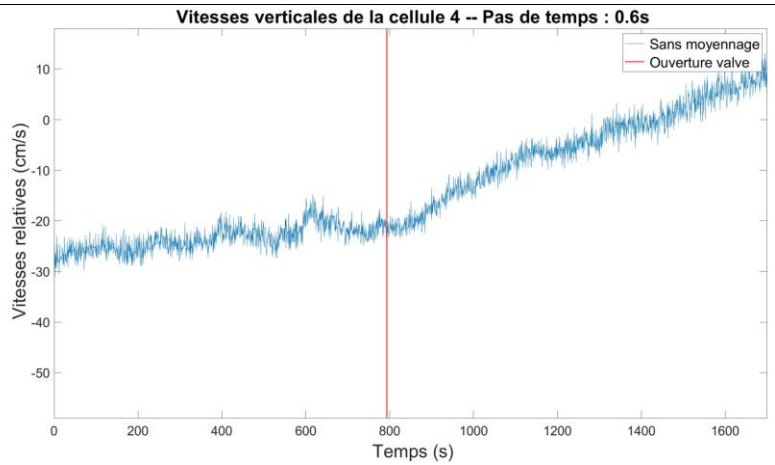
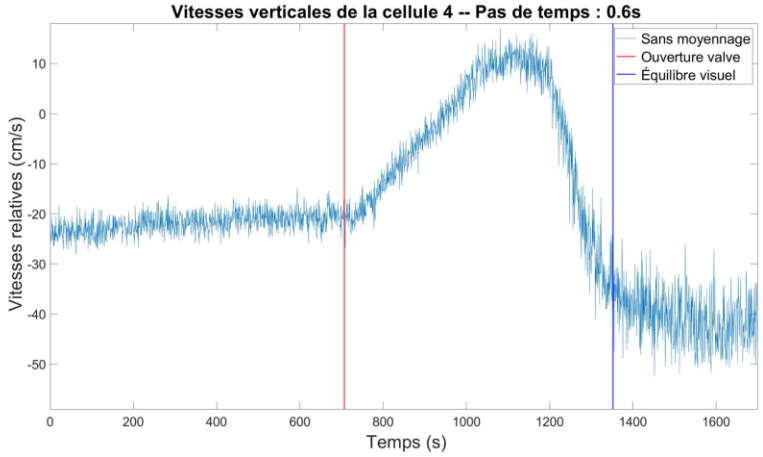
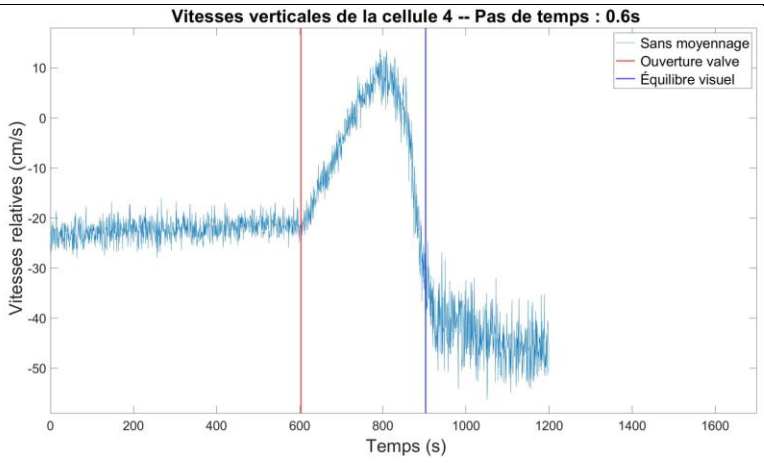
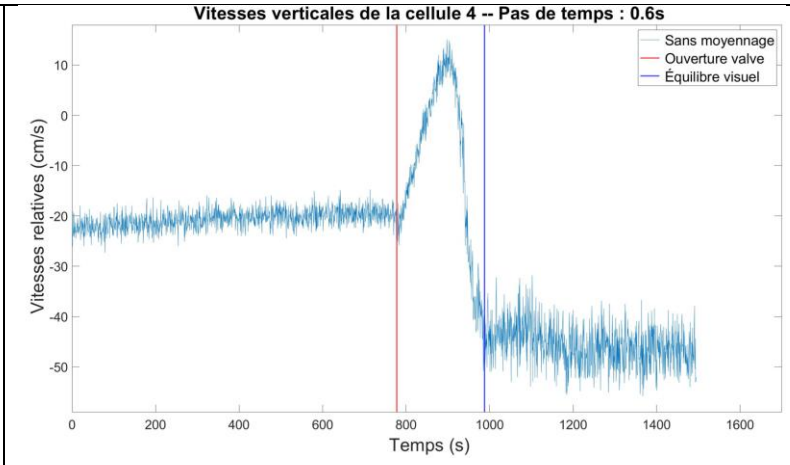
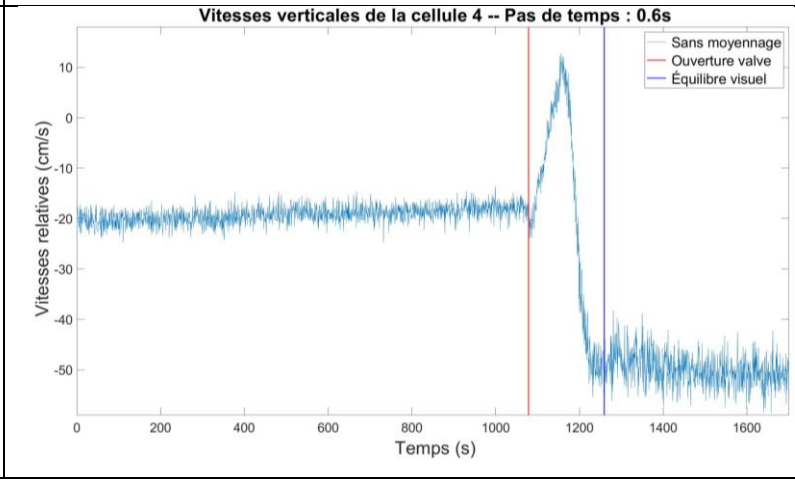
(7.1)		M_AO **-23,4** **cm/s** ET_AO **2,6** **cm/s** M_AE **X** **cm/s** ET_AE **X** **cm/s** Vmin : **-31,0** **cm/s** Vmax : **17,6** **cm/s** *Ouverture 15°*
(7.2)		M_AO **-21,8** **cm/s** ET_AO **2,1** **cm/s** M_AE **-40,7** **cm/s** ET_AE **4,9** **cm/s** Vmin : **-52,4** **cm/s** Vmax : **17,0** **cm/s** *Ouverture 30°*
(7.3)		M_AO **-22,3** **cm/s** ET_AO **1,9** **cm/s** M_AE **-43,6** **cm/s** ET_AE **5,1** **cm/s** Vmin : **-56,3** **cm/s** Vmax : **13,8** **cm/s** *Ouverture 45°*

Tableau 7 : Résultats de l'expérience III – Augmentation du débit - Cellule 4 (suite)

(7.4)		M_AO **-20,6** **cm/s** ET_AO **1,9** **cm/s** M_AE **-45,6** **cm/s** ET_AE **4,1** **cm/s** Vmin : **-55,8** **cm/s** Vmax : **15,1** **cm/s** *Ouverture 60°*
(7.5)		M_AO **-19,2** **cm/s** ET_AO **1,7** **cm/s** M_AE **-49,9** **cm/s** ET_AE **3,2** **cm/s** Vmin : **-58,6** **cm/s** Vmax : **12,7** **cm/s** *Ouverture 75°*

Pour l'essai 1, l'équilibre visuel n'a pas été atteint car l'ouverture de la vanne était très faible. Le delta P diminuant au cours du temps ne nous a pas permis d'atteindre l'équilibre visuel sur les 20 minutes suivant l'ouverture de la vanne.

Dans cette expérience, on remarque visuellement que les courbes ont sensiblement la même allure.

- Avant l'ouverture de la vanne, les mesures de vitesses sont toutes très stables et oscillent autour d'une vitesse moyenne d'environ -20 cm/s.

- Dès l'ouverture de la vanne, on observe un changement dans l'allure de la courbe. Les mesures de vitesses tendent à augmenter progressivement. Plus l'ouverture est grande et plus la pente de la courbe est élevée. Selon l'ouverture de la vanne, on remarque que l'augmentation de la vitesse est constante au cours du temps. À l'approche de l'équilibre, on remarque que les mesures de vitesses changent de tendance et diminuent progressivement dans la totalité des cas. La pente associée est elle aussi d'autant plus élevée que l'ouverture de la vanne est grande. On remarque également que la vitesse maximale mesurée a tendance à diminuer au cours des essais. Sauf pour l'essai 5 où la vitesse maximale mesurée est inférieure à la vitesse maximale mesurée dans l'essai 4.

- Dans tous les essais où l'équilibre a été atteint, on remarque que les mesures de vitesses se stabilisent autour d'une vitesse moyenne d'environ -43 cm/s. La vitesse moyenne est une nouvelle fois différente de la vitesse moyenne obtenue avant l'ouverture de la vanne. Pourtant le bassin est bel et bien au repos dans les deux cas.

Enfin, on peut observer que la durée de la zone de delta P diminue au cours des expériences.

4.4.2 Présentation et analyse des résultats - Cellule 5

Les courbes de la cellule 5 de l'expérience III sont affichées dans le Tableau 8 ci-dessous.

Tableau 8 : Résultats de l'expérience III - Cellule 5

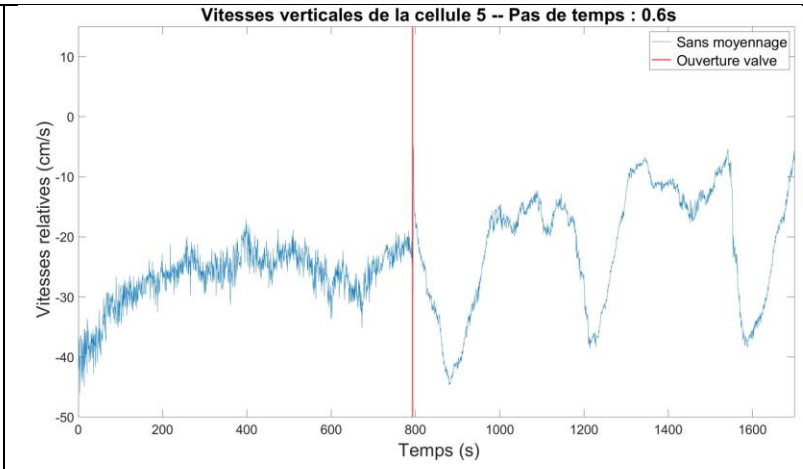
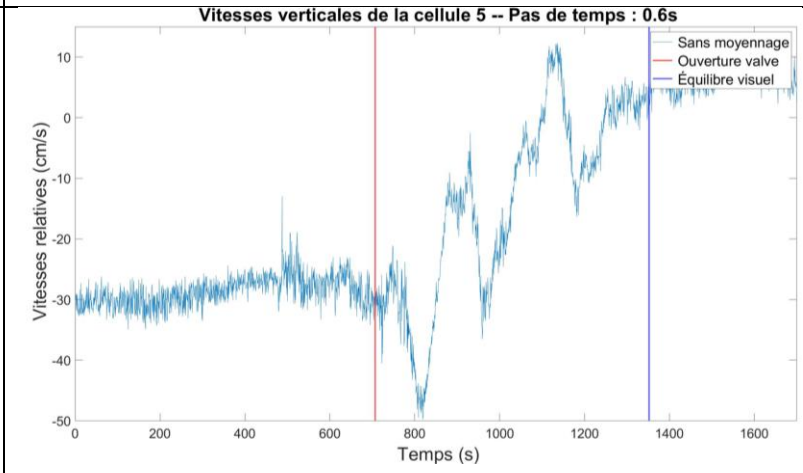
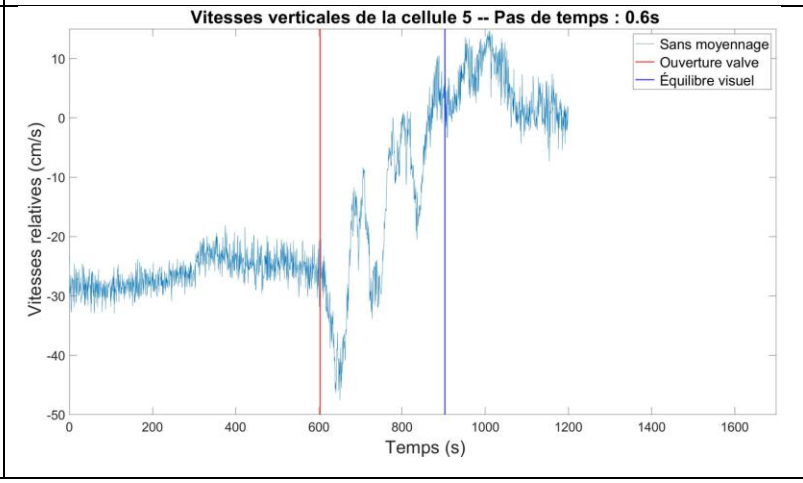
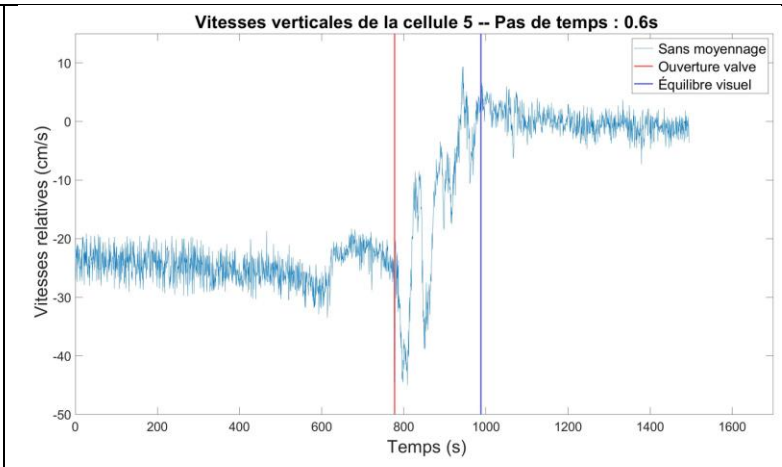
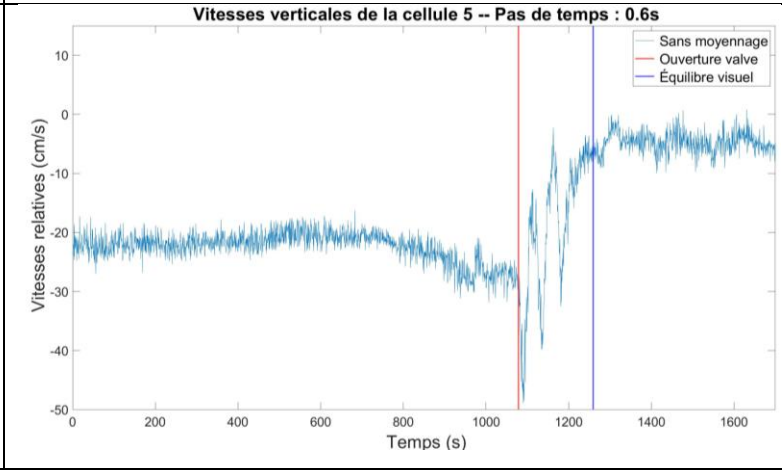
(8.1)		M_AO	**-26,7**	**cm/s**
		ET_AO	**4,6**	**cm/s**
		M_AE	**X**	**cm/s**
		ET_AE	**X**	**cm/s**
		Vmin :	**-46,2**	**cm/s**
		Vmax :	**12,9**	**cm/s**
		Ouverture 15°		
(8.2)		M_AO	**-28,6**	**cm/s**
		ET_AO	**2,5**	**cm/s**
		M_AE	**7,3**	**cm/s**
		ET_AE	**2,4**	**cm/s**
		Vmin :	**-49,7**	**cm/s**
		Vmax :	**14,2**	**cm/s**
		Ouverture 30°		
(8.3)		M_AO	**-26,1**	**cm/s**
		ET_AO	**2,6**	**cm/s**
		M_AE	**4,6**	**cm/s**
		ET_AE	**4,7**	**cm/s**
		Vmin :	**-47,6**	**cm/s**
		Vmax :	**14,7**	**cm/s**
		Ouverture 45°		

Tableau 8 : Résultats de l'expérience III - Cellule 5 (suite)

(8.4)		M_AO **-24,6 cm/s** ET_AO **2,6 cm/s** M_AE **-0,2 cm/s** ET_AE **1,9 cm/s** Vmin : **-45,0 cm/s** Vmax : **9,4 cm/s** *Ouverture 60°*
(8.5)		M_AO **-22,4 cm/s** ET_AO **2,5 cm/s** M_AE **-5,6 cm/s** ET_AE **2,2 cm/s** Vmin : **-48,9 cm/s** Vmax : **0,8 cm/s** *Ouverture 75°*

On remarque visuellement que les courbes ont également la même allure.

- Avant l'ouverture de la vanne, les mesures de vitesses sont relativement stables et oscillent toutes autour d'une vitesse moyenne de l'ordre de -20 cm/s.

- Dès l'ouverture de la vanne, on observe un changement dans l'allure de la courbe. Les mesures de vitesses tendent à diminuer dans un premier temps, puis

à augmenter de manière répétée. On peut observer trois fois ce phénomène dans la zone de delta P. Dans l'ensemble, la répétition de ce phénomène tend vers une augmentation de la vitesse jusqu'à l'obtention de l'équilibre visuel. Plus l'ouverture de la vanne est élevée et plus le phénomène d'oscillation observable trois fois dans la zone de delta P est rapide, menant à l'équilibre visuel.

- Dès l'équilibre visuel, on observe que le phénomène d'oscillation s'arrête. Les vitesses se stabilisent de nouveau autour d'une certaine valeur moyenne.

4.5 RÉSULTATS DE L'EXPÉRIENCE IV.A - DELTA P VERTICAL

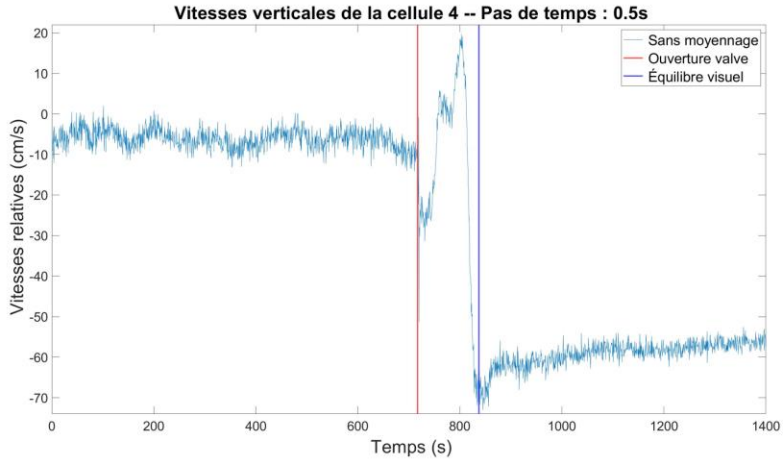
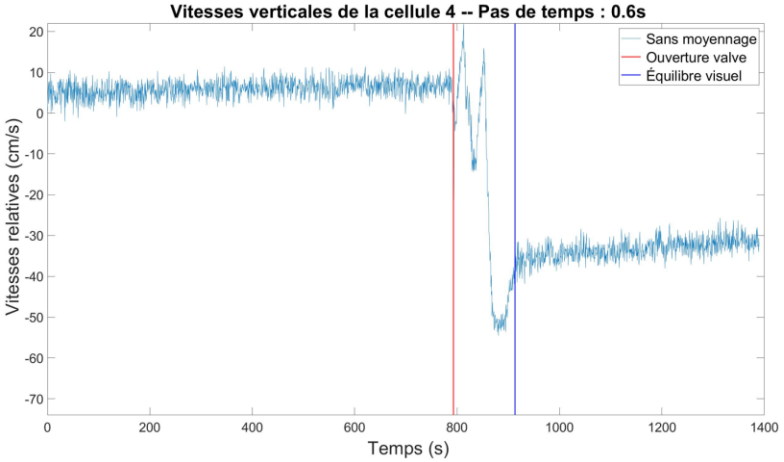
Les conditions de l'expérience IV sont décrites au paragraphe 3.5.4.

4.5.1 Présentation et analyse des résultats - Cellule 4

Les courbes de la cellule 4 de l'expérience IV correspondant au delta P vertical sont affichées sur le

Tableau 9 ci-dessous.

Tableau 9 : Résultats de l'expérience IV – Delta P vertical - Cellule 4

(9.1)		M_AO **-6,0** **cm/s** ET_AO **2,4** **cm/s** M_AE **-57,8** **cm/s** ET_AE **3,2** **cm/s** Vmin : **-73,0** **cm/s** Vmax : **19,7** **cm/s**
(9.2)		M_AO **6,0** **cm/s** ET_AO **2,1** **cm/s** M_AE **-33,3** **cm/s** ET_AE **2,3** **cm/s** Vmin : **-54,5** **cm/s** Vmax : **21,9** **cm/s**

On retrouve le constat fait à l'expérience I sur la cellule 4 :

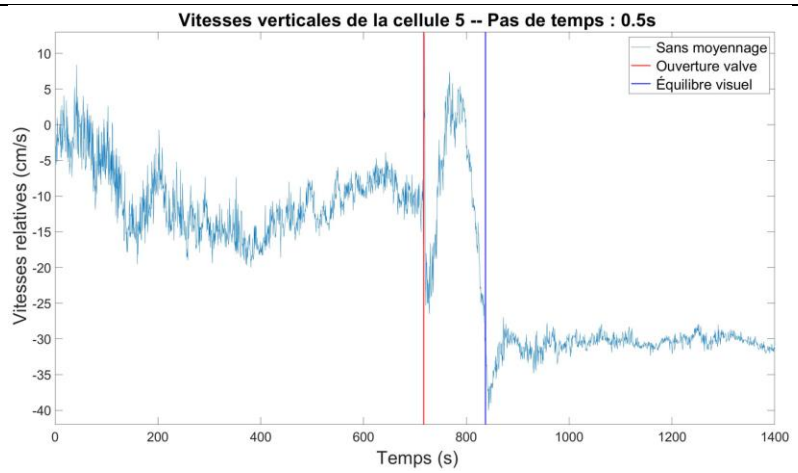
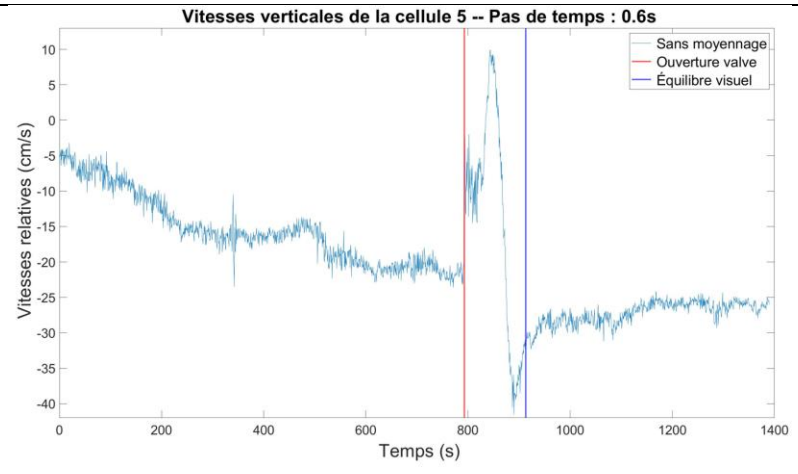
- Avant ouverture et durant l'équilibre, les vitesses oscillent autour d'une vitesse moyenne qui diffère entre elles.

- Dans la phase de delta P, on retrouve un pic de vitesse descendant jusqu'à un minimum, puis la vitesse remonte légèrement avant de se stabiliser au point d'équilibre visuel.

4.5.2 Présentation et analyse des résultats - Cellule 5

Les courbes de la cellule 5 de l'essai IV correspondant au delta P vertical sont affichées sur le Tableau 10 ci-dessous.

Tableau 10 : Résultats de l'expérience IV – Delta P vertical - Cellule 5

(10.1)		M_AO	**-10,3**	**cm/s**
		ET_AO	**4,9**	**cm/s**
		M_AE	**-30,6**	**cm/s**
		ET_AE	**1,1**	**cm/s**
		Vmin :	**-40,0**	**cm/s**
		Vmax :	**12,8**	**cm/s**
(10.2)		M_AO	**-15,5**	**cm/s**
		ET_AO	**4,9**	**cm/s**
		M_AE	**-27,1**	**cm/s**
		ET_AE	**1,5**	**cm/s**
		Vmin :	**-41,5**	**cm/s**
		Vmax :	**9,9**	**cm/s**

De la même manière, nous pouvons établir le même constat que pour la cellule 5 de l'expérience I :

- Avant l'ouverture de la vanne les vitesses convergent puis se stabilisent.
- Lors de l'ouverture, la vitesse mesurée est en perpétuelle évolution. On note un pic brutal de vitesse dès l'ouverture de la vanne. Puis la vitesse tend à augmenter jusqu'à son extremum d'environ 10 cm/s. Ensuite, la vitesse diminue jusqu'à l'équilibre visuel.
- Une fois l'équilibre visuel atteint, les mesures se stabilisent autour d'une vitesse moyenne.

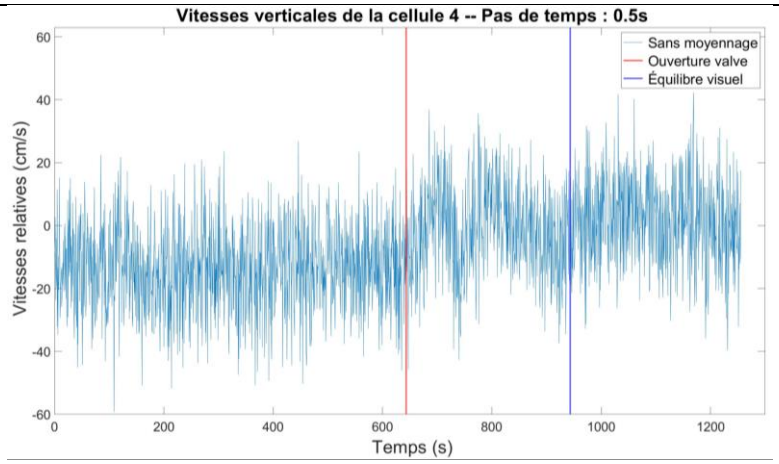
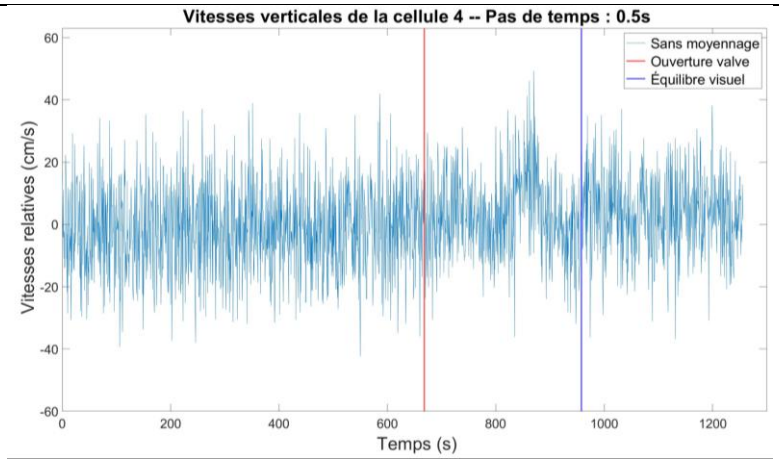
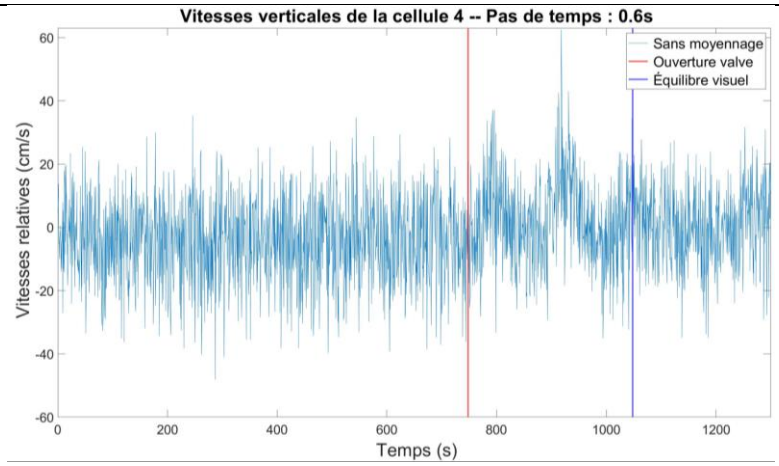
4.6 RÉSULTATS DE L'EXPÉRIENCE IV.B - DELTA P RECTANGULAIRE

Les conditions de l'expérience IV sont décrites au paragraphe 3.5.4.

4.6.1 Présentation et analyse des résultats – Cellule 4

Les résultats de la cellule 4 de l'expérience IV – delta P fissure sont affichés dans le Tableau 11

Tableau 11 : Résultats de l'expérience IV - Delta P fissure - Cellule 4

(11.1)		M_AO **-13,5** **cm/s** ET_AO **13,4** **cm/s** M_AE **1,7** **cm/s** ET_AE **13,5** **cm/s** Vmin : **-59,2** **cm/s** Vmax : **42,3** **cm/s**
(11.2)		M_AO **-1,6** **cm/s** ET_AO **13,4** **cm/s** M_AE **3,4** **cm/s** ET_AE **12,0** **cm/s** Vmin : **-42,3** **cm/s** Vmax : **49,3** **cm/s**
(11.3)		M_AO **-4,1** **cm/s** ET_AO **13,0** **cm/s** M_AE **0,6** **cm/s** ET_AE **11,3** **cm/s** Vmin : **-48,1** **cm/s** Vmax : **62,5** **cm/s**

Cette fois-ci, on retrouve sensiblement les mêmes courbes que dans l'expérience II (4.3.1).

- Avant ouverture de la vanne et durant l'équilibre, les mesures oscillent autour d'une vitesse moyenne. Celle-ci semble néanmoins différer.
- Durant la phase de delta P, le profil tend à osciller, mais ces oscillations ne sont pas flagrantes et peuvent facilement être confondues avec les phases de préouverture et d'équilibre.

4.6.2 Présentation et analyse des résultats - Cellule 5

Les courbes de la cellule 5 de l'expérience IV – Delta P fissure sont affichées dans le Tableau 12.

Tableau 12 : Résultats de l'expérience IV - Delta P fissure - Cellule 5

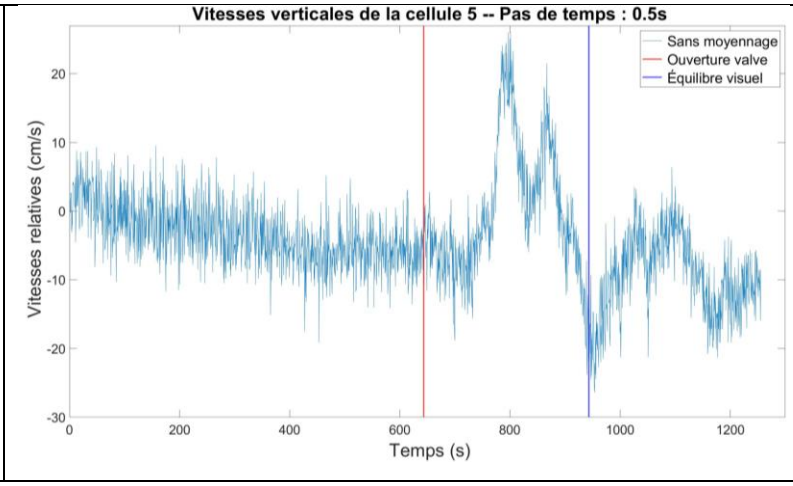
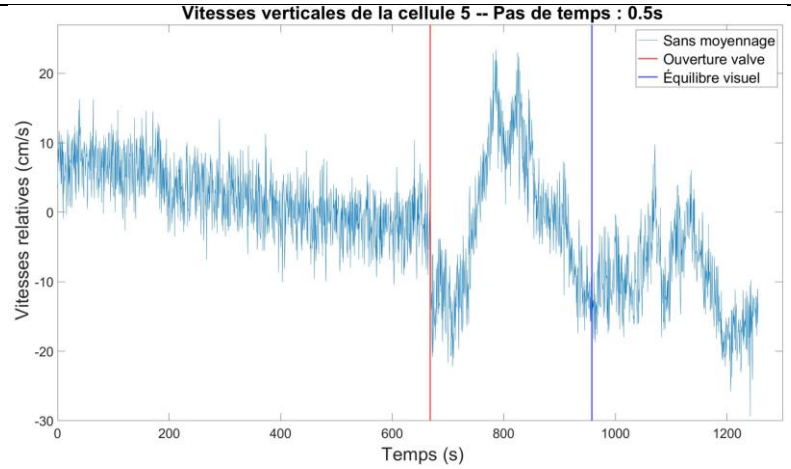
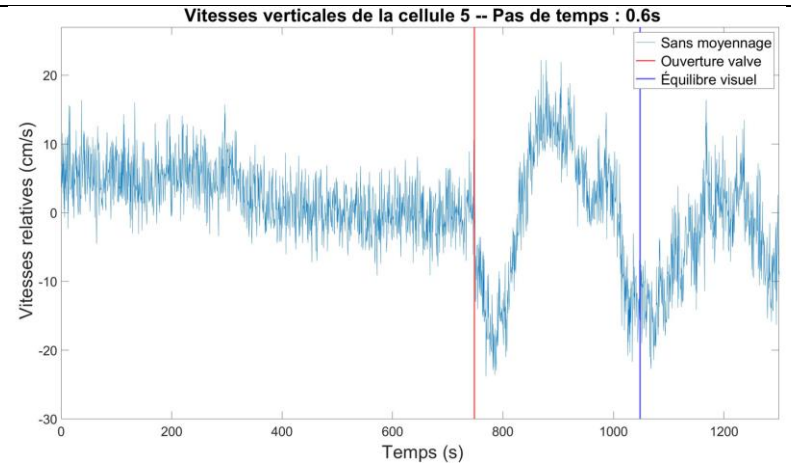
(12.1)		M_AO	**-3,3**	**cm/s**
		ET_AO	**4,4**	**cm/s**
		M_AE	**-9,2**	**cm/s**
		ET_AE	**5,6**	**cm/s**
		Vmin :	**-26,4**	**cm/s**
		Vmax :	**26,1**	**cm/s**

Tableau 12 : Résultats de l'expérience IV - Delta P fissure - Cellule 5 (suite)

(12.2)		M_AO **2,4** **cm/s** ET_AO **4,7** **cm/s** M_AE **-9,9** **cm/s** ET_AE **6,3** **cm/s** Vmin : **-29,3** **cm/s** Vmax : **23,4** **cm/s**
(12.3)		M_AO **2,5** **cm/s** ET_AO **4,3** **cm/s** M_AE **-4,5** **cm/s** ET_AE **6,5** **cm/s** Vmin : **-23,8** **cm/s** Vmax : **22,2** **cm/s**

Même constat que pour les courbes obtenues dans la cellule 5 de l'expérience II (4.6.2).

- Avant ouverture de la vanne, les ensembles oscillent autour des vitesses moyennes de -3,3 cm/s, 2,4 cm/s et 2,5 cm/s pour les essais respectifs 1, 2 et 3.
- Durant la phase de delta P, on observe un changement brutal dans l'allure de la courbe. Les vitesses semblent osciller une nouvelle fois.

- Durant la phase d'équilibre, le profil reste oscillant mais avec une amplitude plus faible. Dans l'essai 3, on pourrait d'ailleurs presque confondre la zone de delta P avec la zone d'équilibre visuel.

4.7 RÉSULTATS DES TESTS D'HYPOTHÈSE

Ce sous-chapitre vise à expérimenter les trois tests d'hypothèse présentés dans le sous-chapitre 3.6. Nous présenterons les résultats des tests et ferons une succincte analyse. Les tests ont été effectués sur l'essai 4 de l'expérience III. Nous verrons le comportement des tests sur la cellule 4 et la cellule 5.

Dans chaque tableau est présentée une première courbe, permettant de comparer la valeur de la variable de décision du test par rapport au seuil.

La seconde courbe présente le résultat binaire du test :

- La valeur « 0 » signifie que le test accepte H_0 « Il n'y a pas de delta P »
- La valeur « 1 » signifie que le test rejette H_0 « Il y a un delta P »

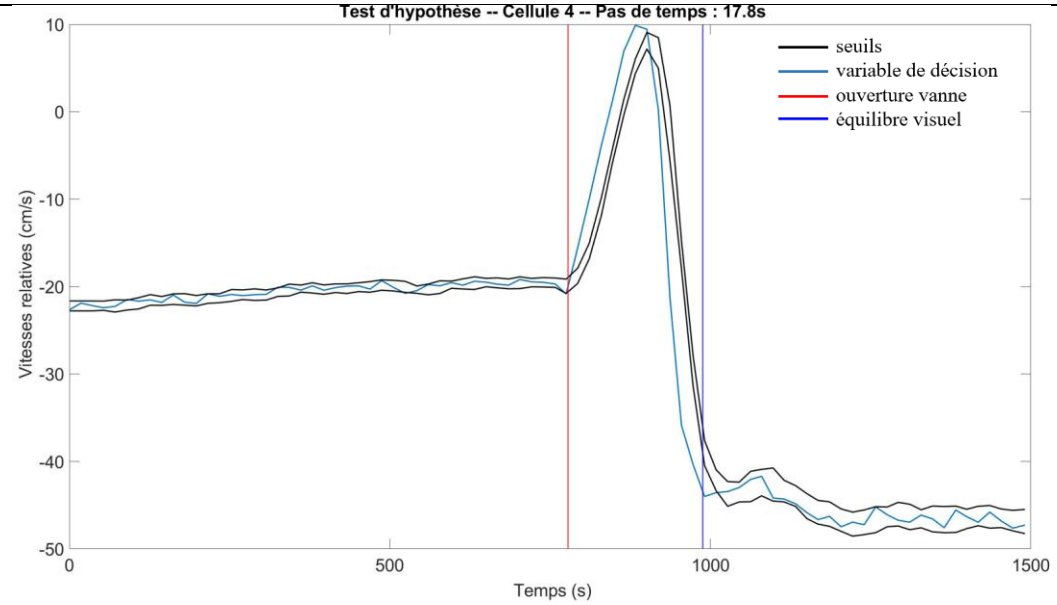
La section 4.7.1 présente les résultats du test paramétrique sur la moyenne, la section 4.7.2 du test de comparaison de moyennes et la section 4.7.3 du test de comparaison de variances.

4.7.1 Résultats du test 1 : Test paramétrique sur la moyenne

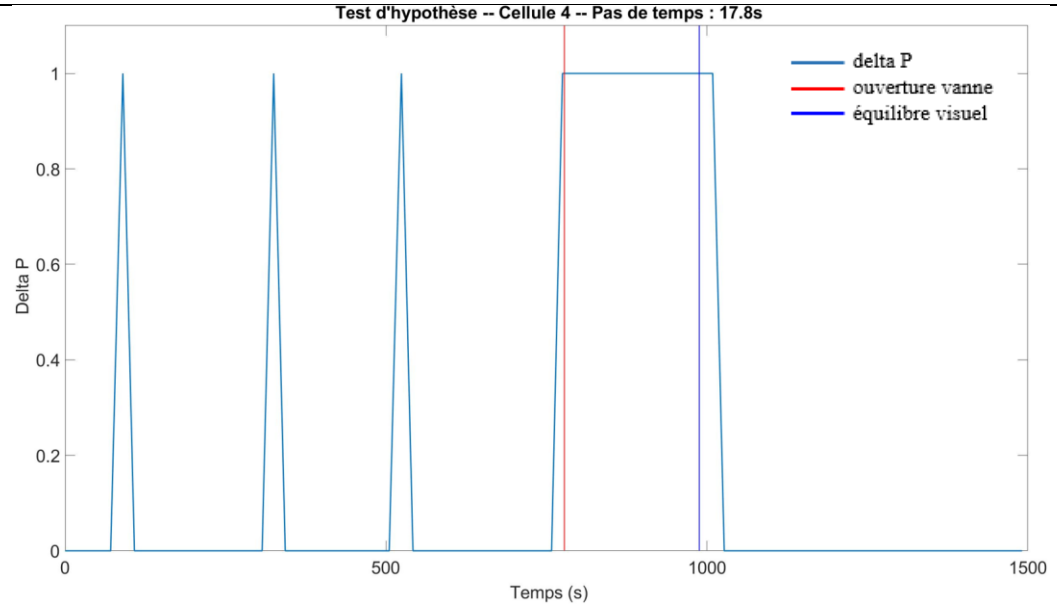
Le principe de ce test est défini à la sous-section 3.6.6. Le Tableau 13 et le Tableau 14 présentent respectivement les courbes du test d'hypothèse 1 des cellules 4 et 5. Ici la variable de décision est simplement la vitesse moyennée sur 30 mesures. L'intervalle d'acceptation est délimité par un seuil maximal et un seuil minimal.

Tableau 13 : Résultats du test d'hypothèse 1 - Cellule 4

(13.1)



(13.2)

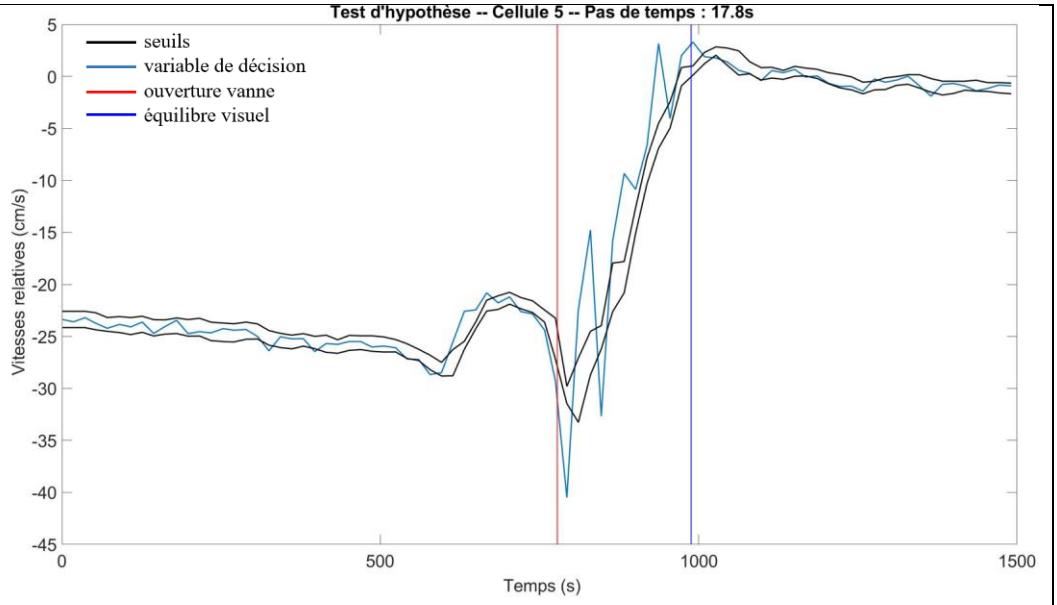
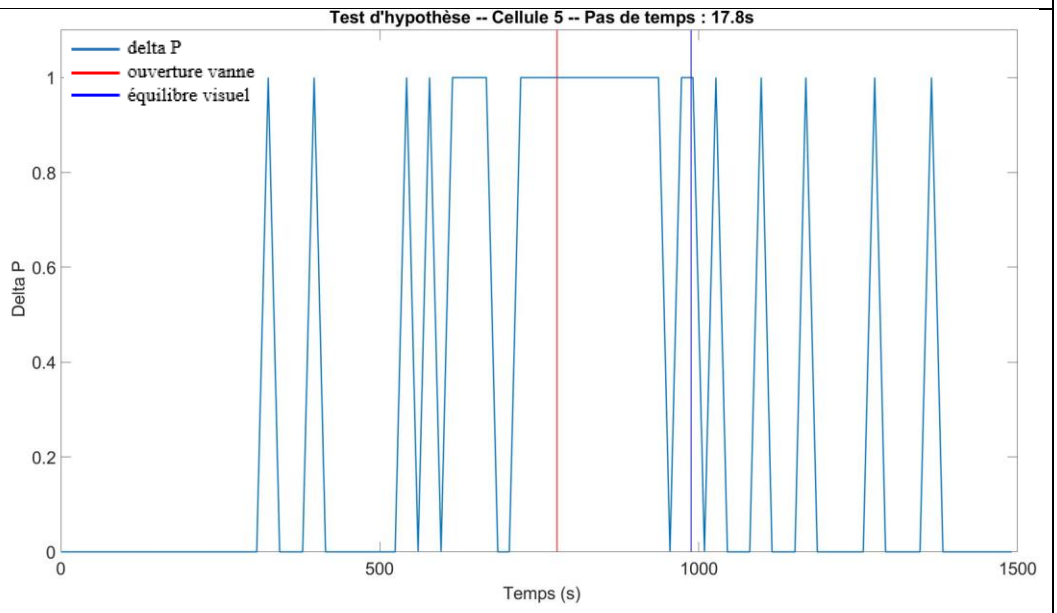


L'intervalle d'acceptation sur la première courbe a tendance à suivre l'évolution en l'absence de delta P (phase de préouverture et d'équilibre). Dès que l'évolution de la vitesse devient trop brutale (zone de delta P), l'intervalle ne suit plus, ce qui est intéressant pour éviter les erreurs de première espèce.

Cependant, on obtient tout de même trois erreurs de première espèce durant la phase de préouverture. Durant la zone de delta P, le test est intéressant puisqu'il nous renvoie qu'il y a bel et bien un delta P durant toute la période. Ce résultat dépend néanmoins du pas de temps choisi. Sur la première figure, on voit que la courbe bleue croise les seuils minimal et maximal d'acceptation. Pourtant, le test continu de rejeter l'hypothèse. Avec un pas de temps légèrement différent, il aurait probablement accepté l'hypothèse nulle.

On peut noter également sur la première courbe que la largeur de l'intervalle tend à évoluer au cours du temps. Dans la zone de préouverture nous obtenons une largeur assez constante, dans la zone de delta P on remarque que l'intervalle s'est resserré, puis dans la zone d'équilibre, l'intervalle a une largeur encore plus importante que dans la zone d'équilibre. Nous parlerons de ce phénomène dans la discussion.

Tableau 14 : Résultats du test d'hypothèse 1 - Cellule 5

(14.1)	
(14.2)	

Dans la cellule 5, le test effectue davantage d'erreurs de première espèce et semble bien moins performant. Il détecte bel et bien le delta P durant sa phase associée mais effectue de nombreuses erreurs. L'intervalle d'acceptation sur la première courbe a tendance à suivre l'évolution de la vitesse dans la zone de préouverture et d'équilibre, cependant des petites variations de vitesses continue de mener à une détection de delta P.

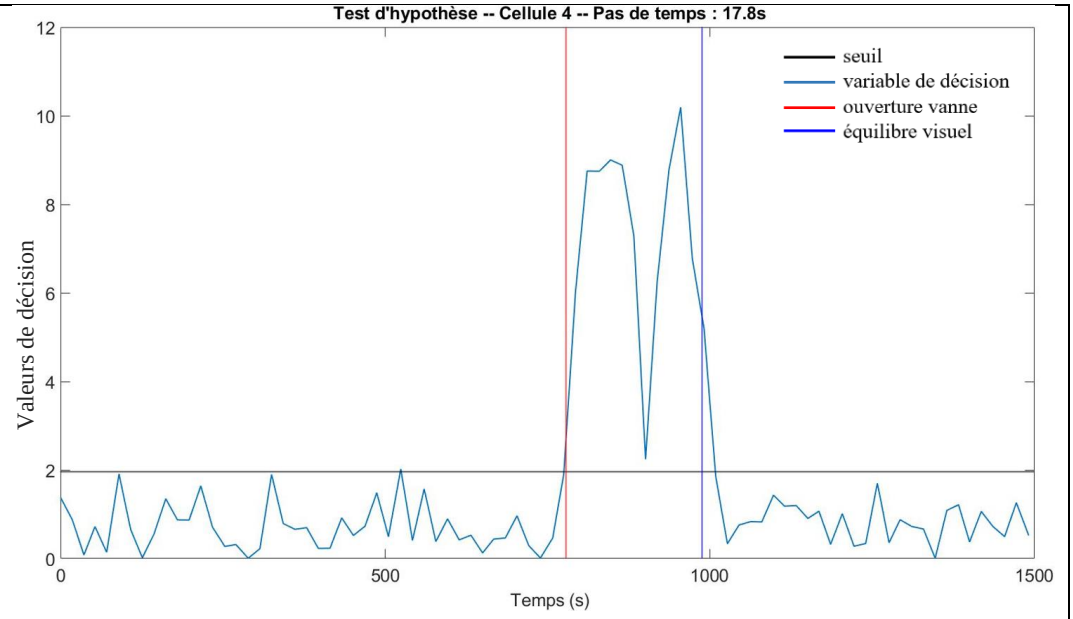
Durant la zone de delta P, on voit que l'intervalle suit l'évolution de la vitesse et il augmente en moyenne. Cependant, la vitesse dans cette zone étant oscillante, elle traverse à plusieurs reprises la zone d'acceptation du delta P, pouvant conclure à l'absence de delta P.

4.7.2 Résultats du test 2 : Comparaison de moyennes

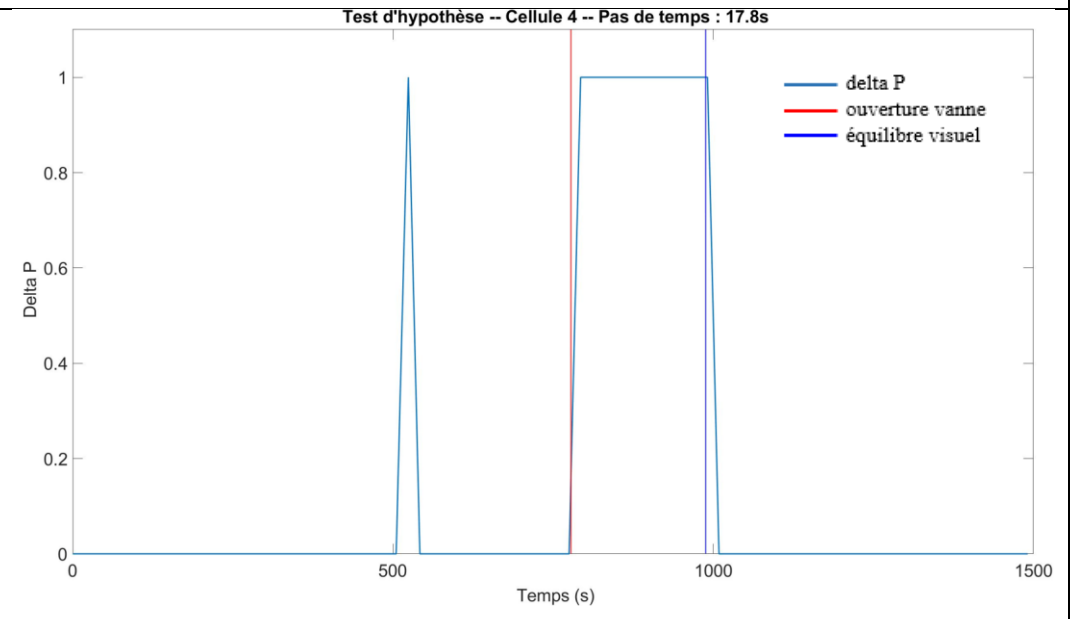
Les Tableau 15 et Tableau 16 présentent respectivement les résultats du test de comparaison de moyenne sur les cellules 4 et 5 de l'essai 4 de l'expérience III.

Tableau 15 : Résultats du test d'hypothèse 2 - Cellule 4

(15.1)



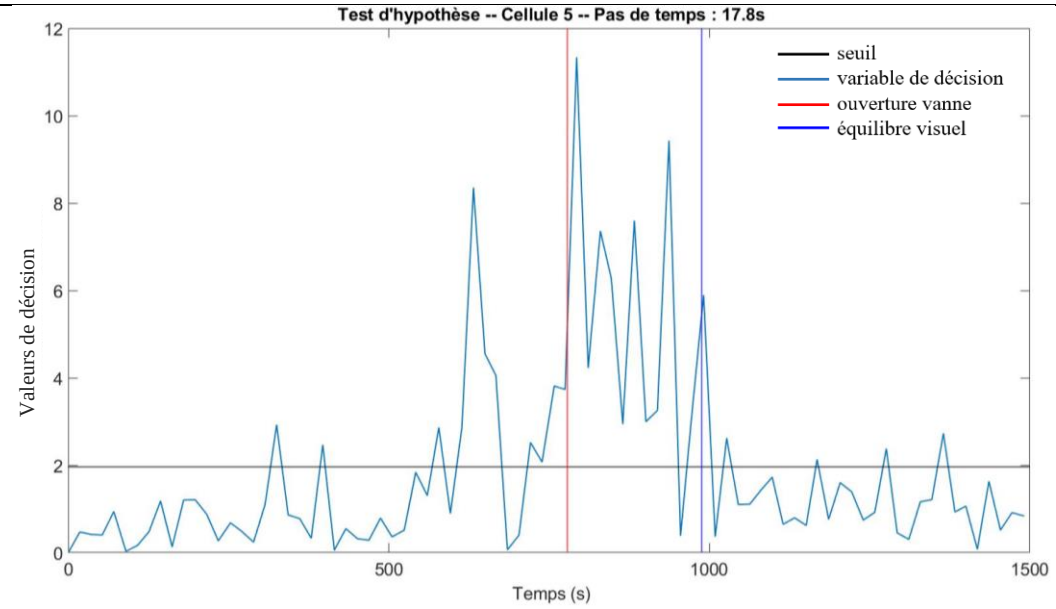
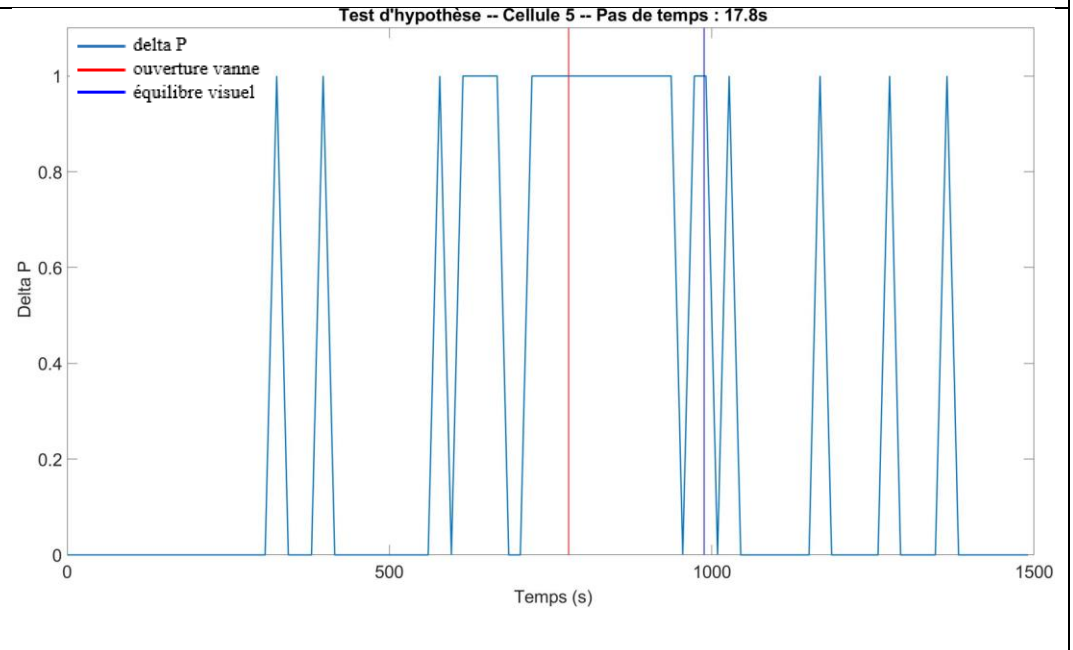
(15.2)



On remarque sur la première courbe que la variable de décision a tendance à être inférieure au seuil durant les phases de préouverture et d'équilibre. Il y a seulement eu une seule erreur de première espèce. On note toutefois que la variable de décision est relativement oscillante durant les phases de préouvertures et d'équilibre. Même si elle est restée en grande partie en dessous du seuil, on note une certaine quantité de points où la variable de décision était très proche du seuil.

Durant la phase de delta P, on obtient une décision de delta P durant la totalité de la phase de delta P. La variable de décision est effectivement largement au-dessus du seuil durant cette phase. On note toutefois sur la première courbe qu'à t=850 secondes, la variable de décision a fortement chuté et s'est considérablement rapprochée du seuil de décision, sans pour autant produire une erreur de seconde espèce.

Tableau 16 : Résultats du test d'hypothèse 2 - Cellule 5

(16.1)	
(16.2)	

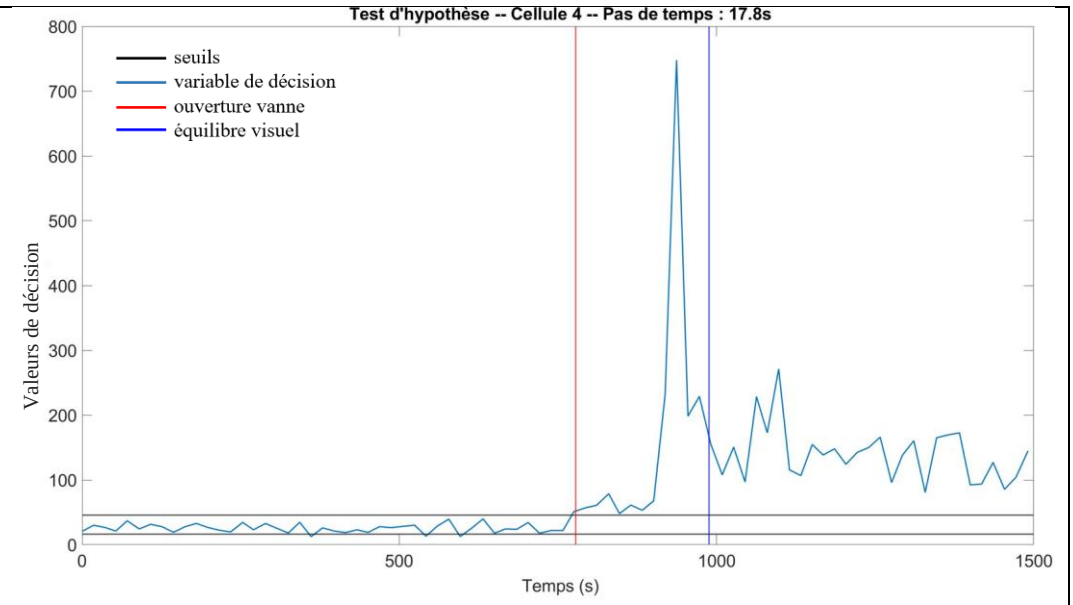
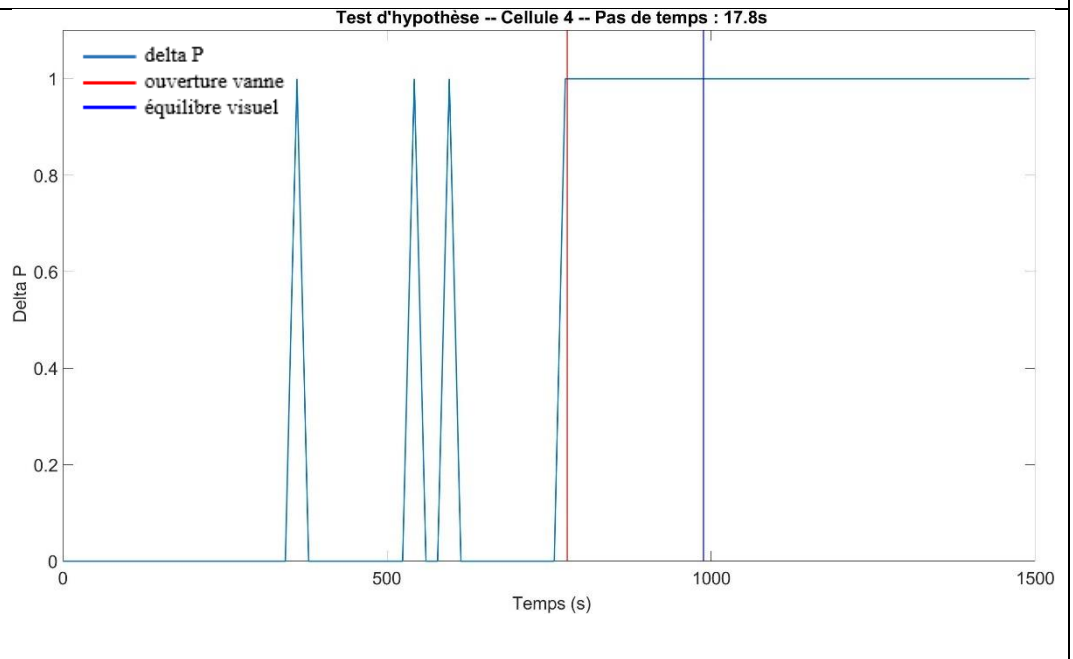
Concernant la 5ème cellule, on note des dépassements réguliers du seuil provoquant de nombreuses erreurs de premières espèces. La variable de décision a tendance à être inférieure au seuil durant les phases de préouverture et d'équilibre. Cependant les variations de vitesses permettent une nouvelle fois de dépasser le seuil. On retrouve le phénomène d'oscillation décrit dans l'analyse de la cellule 4 durant ces deux phases, provoquant une certaine instabilité.

On obtient néanmoins un palier de détection du delta P durant sa phase associée, ce qui reste intéressant.

4.7.3 Résultats du test 3 : Comparaison de variances

Les Tableau 17 et Tableau 18 représentent respectivement les résultats du test d'hypothèse sur la variance des cellules 4 et 5 de l'essai 4 de l'expérience III.

Tableau 17 : Résultats du test d'hypothèse 3 - Cellule 4

(17.1)	
(17.2)	

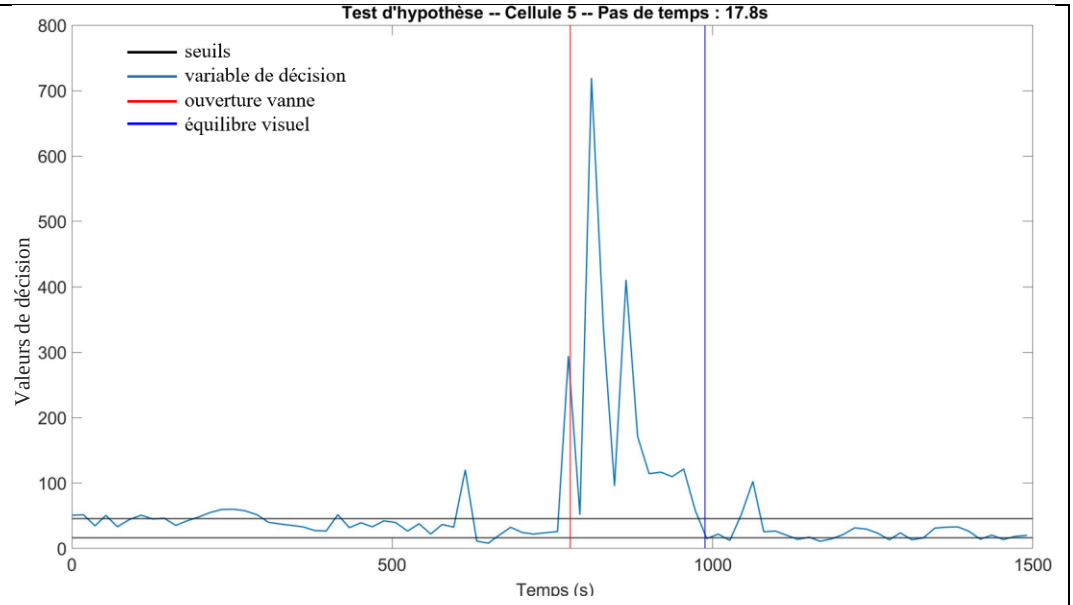
Le test réagi très différemment par rapport aux deux précédents. Durant les phases de préouverture et d'équilibre où les mesures semblent stables, le test effectue respectivement 3 erreurs de première espèce dans le premier cas et se trompe intégralement dans le second cas.

En effet, la courbe de la variable de décision est assez stable durant la phase de préouverture et reste dans l'intervalle d'acceptation. Durant la phase d'équilibre, la variable de décision est également stable mais est complètement en dehors de l'intervalle.

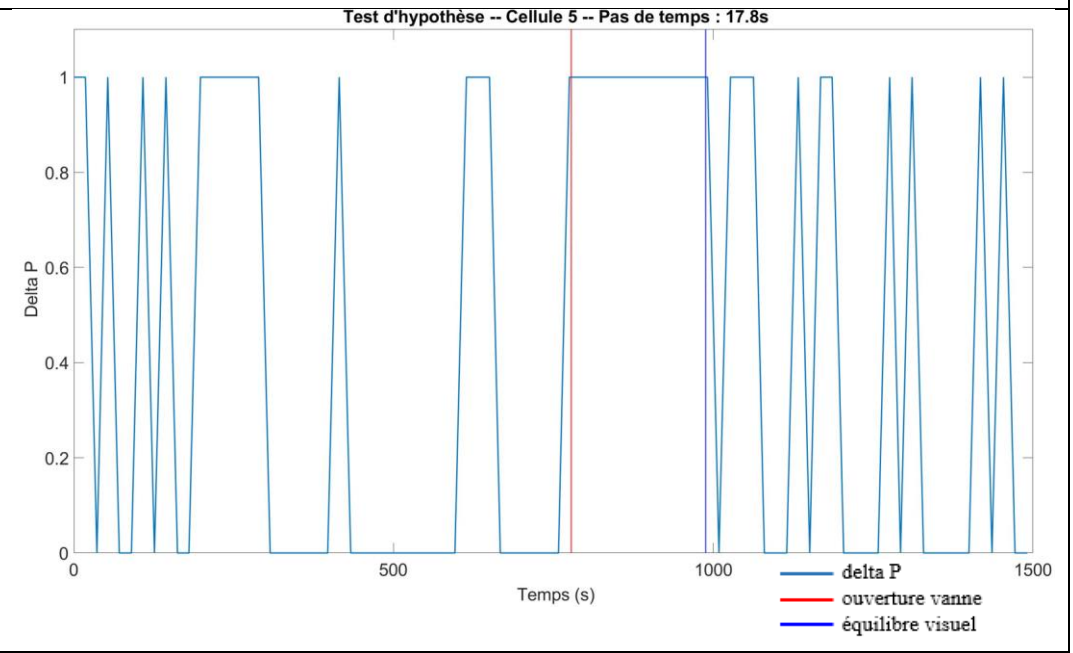
Cependant, le test a bel et bien détecté la variation brutale de vitesse et donc le delta P associé.

Tableau 18 : Résultats du test d'hypothèse 3 - Cellule 5

(18.1)



(18.2)



La courbe de la variable de décision montre une différence notable durant la zone de delta P de la cellule 5. Durant cette phase, on remarque une augmentation de la variable de décision entrainant un dépassement du seuil maximal. Durant les deux autres phases où il y a absence de delta P, on peut noter que la variable de décision calculée est plus faible, mais oscille autour des seuils.

4.8 SYNTHÈSE DES ANALYSES

L'appareil Sentinel V50 utilisé détecte des variations de vitesse lors de l'ouverture de la vanne. Dépendamment des cas, il détecte également lorsque l'équilibre visuel est atteint, c'est-à-dire lors de la disparition du delta P.

Pour des essais similaires, on obtient également des courbes aux allures similaires. Cependant, les valeurs des vitesses obtenues sont souvent différentes et parfois même surprenantes.

En général, nous pouvons relever que l'allure des courbes nous permet de distinguer 3 zones selon les cellules 4 et 5.

i. Avant ouverture, lorsque le fluide est au repos, les mesures tendent à osciller autour d'une vitesse moyenne relativement stable. Les valeurs moyennes des cellules 4 et 5 sont en revanche souvent différentes de zéro, pourtant le fluide est au repos dans cette première phase. De plus, certains essais renvoient des valeurs de vitesses moyennes très différentes, pourtant les essais étaient similaires (expérience I notamment).

ii. Lors de l'ouverture de la vanne, on remarque une variation des mesures de vitesses obtenues.

- Dans le cas de la cellule 4, on obtient un unique pic de vitesse qui atteint un extremum au bout d'un certain temps. Nous pouvions nous attendre à obtenir un pic brutal lors de l'ouverture de la vanne, puis une diminution progressive de la vitesse, ce qui ne fut pas le cas.

- Dans le cas de la cellule 5, nous avons pu observer de grandes variations de vitesse durant la zone de delta P, avec une tendance moyenne d'évolution de la vitesse. Dans le cas spécifique de l'expérience III, nous avons pu voir 3 oscillations se répéter dans la totalité des essais durant la phase de delta P.

iii. Une fois le delta P éliminé, les mesures de vitesses se stabilisent une nouvelle fois autour d'une vitesse moyenne également stable. En revanche, dans une grande partie des cas, nous avons pu observer que la vitesse moyenne obtenue après équilibre des hauteurs d'eau était très différente de la vitesse obtenue avant l'ouverture de la vanne. Pourtant, le fluide retourne dans son état de repos.

Concernant les tests d'hypothèse, nous pouvons observer un comportement assez différent entre les résultats de la cellule 4 et ceux de la cellule 5. On observe dans la cellule 4 une tendance à détecter la zone de delta P même si elle est accompagnée de quelques erreurs de premières espèces. Pour le test de la variance en revanche, on observe que le test décide de la présence d'un delta P durant toute la phase d'équilibre.

Concernant la cellule 5, on note une détection du delta P très oscillante. Celle-ci semble presque très hasardeuse et mène à de nombreuses erreurs de premières espèces, même si les tests parviennent en général à détecter la zone de delta P.

Nous pouvons finalement faire remarquer que les tests 1 et 2 se comportent relativement de la même manière.

CHAPITRE 5
DISCUSSION

5.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous discuterons des résultats et des problèmes soulevés dans le chapitre précédent dans le but d'expliquer le comportement de l'appareil Sentinel V50 face aux delta P. Nous discuterons également des résultats des tests d'hypothèse afin de tirer des conclusions sur l'utilisation de l'ADCP dans la détection des delta P.

Pour ce faire, une première partie sera consacrée à présenter le profil théorique obtenu lors de l'ouverture de la vanne grâce à une simulation en régime transitoire (5.2). Cette sous-partie viendra appuyer la connaissance du milieu et nous permettra de mieux discuter des données des vitesses obtenues par l'ADCP vis-à-vis du profil du fluide.

Dans le deuxième (5.3) et troisième (5.4) sous-chapitres, nous discuterons des problèmes rencontrés en général dans la totalité des expériences du précédent chapitre. Nous tenterons d'expliquer notamment les phénomènes suivants :

i. Vitesses non nulles obtenues avant et après la phase de delta P dans les cellules 4 et 5

ii. Vitesses faussées dans l'ensemble des essais et évolution non brutale de la vitesse lors de l'ouverture de la vanne (mis en avant dans la section Simulation)

iii. Vitesses différentes durant la phase de préouverture et d'équilibre, alors que l'appareil V50 est dans des conditions d'utilisation quasi-identiques

iv. Phénomène d'oscillation de vitesse dans la cellule 5 durant la phase de delta P

Une quatrième partie permettra de revenir sur chacune des expériences et de tirer des conclusions sur le comportement de l'ADCP en tenant compte des limites qui y seront exposées (5.5).

Une dernière partie permettra de discuter des trois tests d'hypothèse utilisés dans l'application de détection des delta P (5.6).

5.2 PROFIL D'ÉCOULEMENT OBTENU PAR SIMULATION

Nous avons réalisé des simulations à partir de Solidworks Flowsimulation en régime transitoire sur les trois premières secondes suivant l'ouverture de la vanne. Les simulations réalisées servent d'appui pour améliorer la connaissance de l'écoulement durant la phase de delta P. L'Annexe III détail davantage la modélisation utilisée pour la simulation.

Nous avons réalisé trois simulations, représentant respectivement l'écoulement lors de l'utilisation du delta P circulaire horizontal (expérience I, II, III), du delta P vertical (expérience IV.A) ainsi que du delta P rectangulaire (expérience IV.B).

Pour chaque simulation, nous avons également affiché la courbe théorique des vitesses projetées sur l'axe d'orientation de l'ADCP.

5.2.1 Simulation delta P horizontal

Cette simulation représente l'écoulement théoriquement obtenu après une seconde lors de l'ouverture de la vanne durant les expériences I, II et III. La simulation nous a montré qu'à cet instant, le régime permanent était déjà atteint. La Figure 35 représente le profil des vitesses dans le plan XY obtenu.

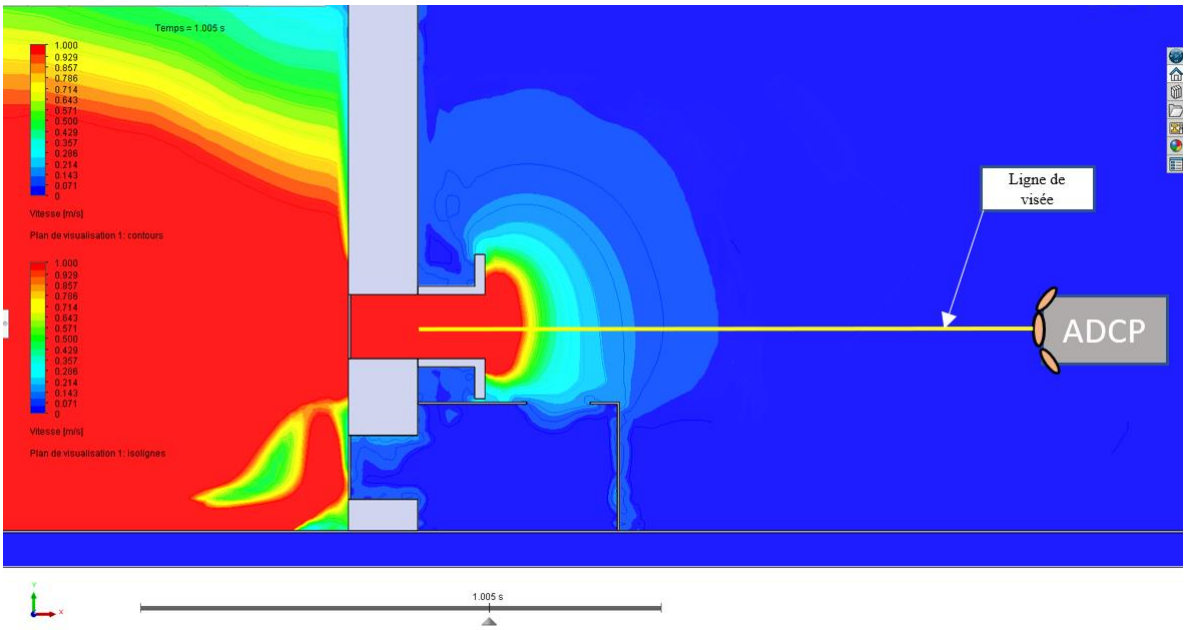


Figure 35 : Profil de vitesse obtenu par simulation de l'écoulement dû au delta P circulaire horizontal 1,5 s après l'ouverture de la vanne

On retrouve bel et bien un écoulement très localisé autour de l'embouchure du delta P horizontal. Le profil dans le plan indique qu'il n'y a théoriquement presque aucun mouvement dans la zone où l'ADCP est plongé. Les isolignes ont également une forme circulaire, rendant directement compte de la théorie de la demi-sphère développée dans la section 1.3.3.

La vitesse associée à l'écoulement selon l'axe d'orientation de l'ADCP dans le cas de l'expérience I est affichée ci-dessous. Elle représente la vitesse du fluide projetée sur l'axe d'orientation de l'ADCP utilisé dans l'expérience I en fonction de la distance par rapport à l'ADCP. Le mur est positionné à 230 cm (dernier point sur la courbe) et le centre du delta P est positionné à 200 cm environ (maximum de la vitesse sur la figure). La vitesse est négative car il s'agit d'une vitesse projetée sur l'axe d'orientation de l'ADCP. Ceci indique que le fluide s'éloigne bien de l'ADCP en passant de la zone amont vers la zone aval du barrage.

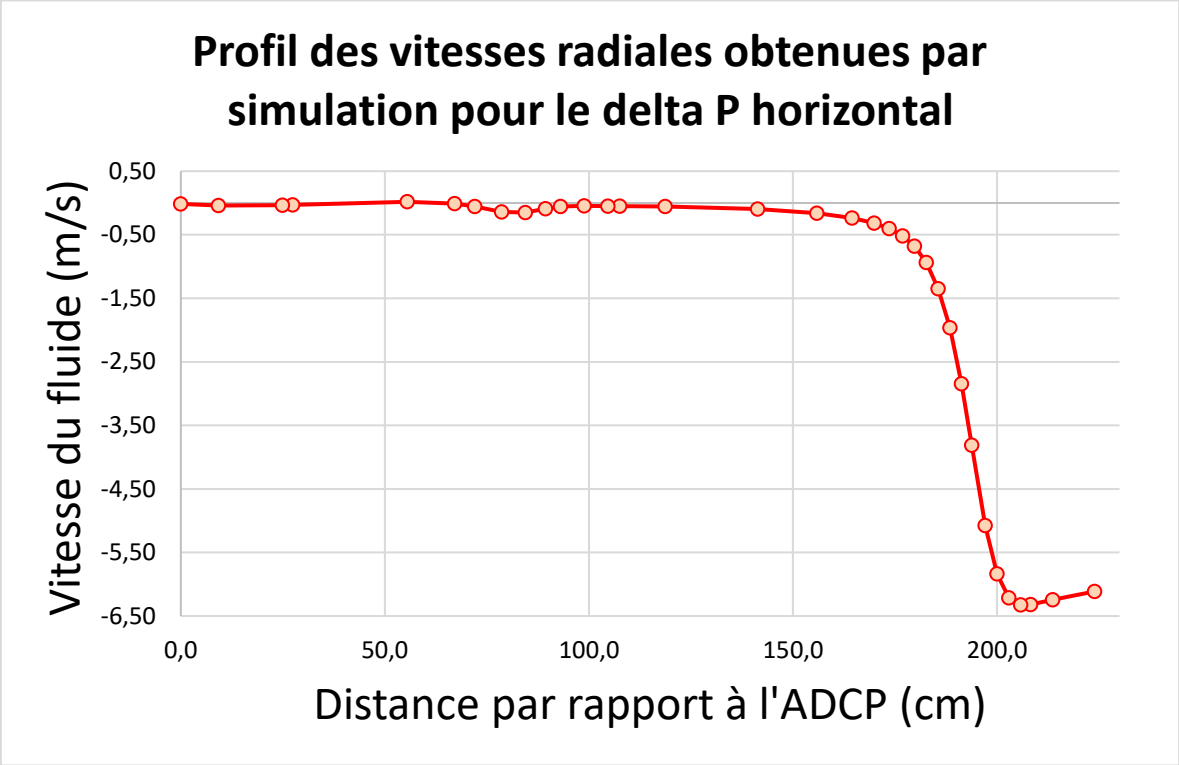


Figure 36 : Évolution théorique de la vitesse radiale sur l'axe d'orientation de l'ADCP dans l'expérience I obtenue par simulation

On retrouve bel et bien une augmentation rapide de vitesse en s'approchant du delta P. Celle-ci a lieu à environ 170 cm de l'ADCP, soit au sein de la cellule 4.

En s'éloignant du delta P on retrouve bel et bien une vitesse qui tend vers 0. Les résultats obtenus dans l'expérience I selon les 3 premières cellules vont dans ce sens, en obtenant des vitesses moyennes du même ordre de grandeur.

Concernant les cellules 4 et 5, à l'instant t=1s, nous obtenons théoriquement les vitesses moyennes respectives de -1,5 m/s et de -6,1 m/s. De plus, la vitesse du fluide affichée ci-haut est valable uniquement au temps t=1 seconde. Au fur et à mesure, la différence de hauteur d'eau diminue, et la vitesse résultante sur toute la ligne de projection diminue également au

fil du temps. Celle-ci diminue linéairement, jusqu'à la vitesse nulle, c'est-à-dire jusqu'à l'équilibre hauteur d'eau entre la zone amont et celle de la zone aval. La vitesse maximale notamment obtenue à la distance x=200 cm décroît linéairement selon l'allure suivante (Figure 37) :

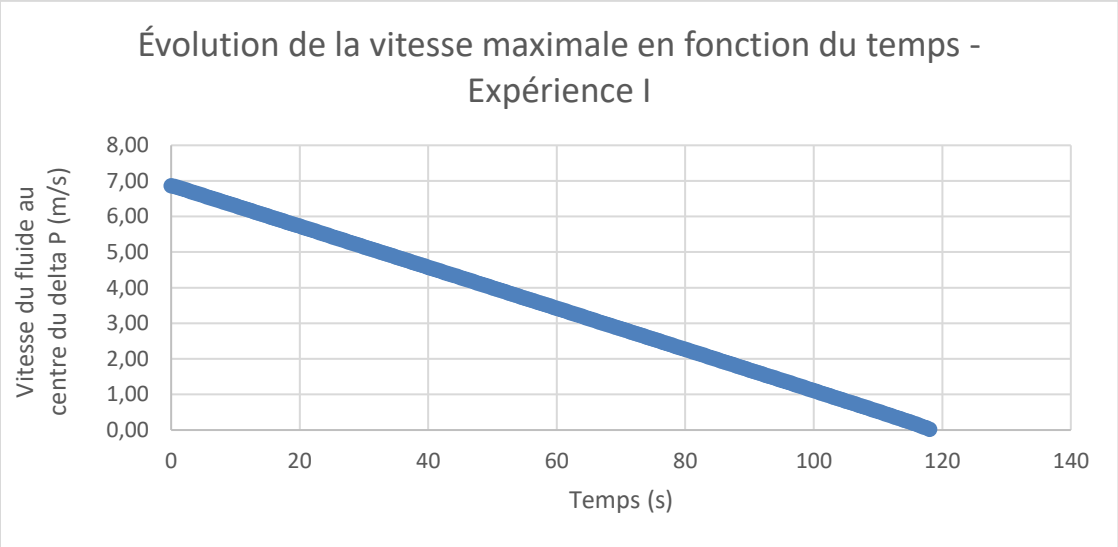


Figure 37 : Évolution théorique de la vitesse maximale en fonction du temps suite à la diminution de la différence de hauteur d'eau

Nous pouvions donc nous attendre à observer dans les cellules 4 et 5 une diminution progressive de la vitesse en fonction du temps. Or, les extrema obtenus dans l'expérience I ont été obtenus seulement 55 secondes environ après l'ouverture de la vanne, contre une seule seconde dans le cas de la simulation. En d'autres termes, nous avons observé dans l'expérience I une évolution de la vitesse assez progressive, alors qu'elle aurait dû être très brutale dans un premier temps, puis diminuer progressivement dans un second temps. À ceci, nous pouvons ajouter que les vitesses obtenues par l'ADCP dans les cellules 4 et 5 sont surprenantes et que les extrema obtenus sont nettement inférieurs aux extrema obtenus par simulation.

5.2.2 Simulation delta P vertical

De la même manière, le profil de la vitesse du delta P vertical est visualisable sur la Figure 38.

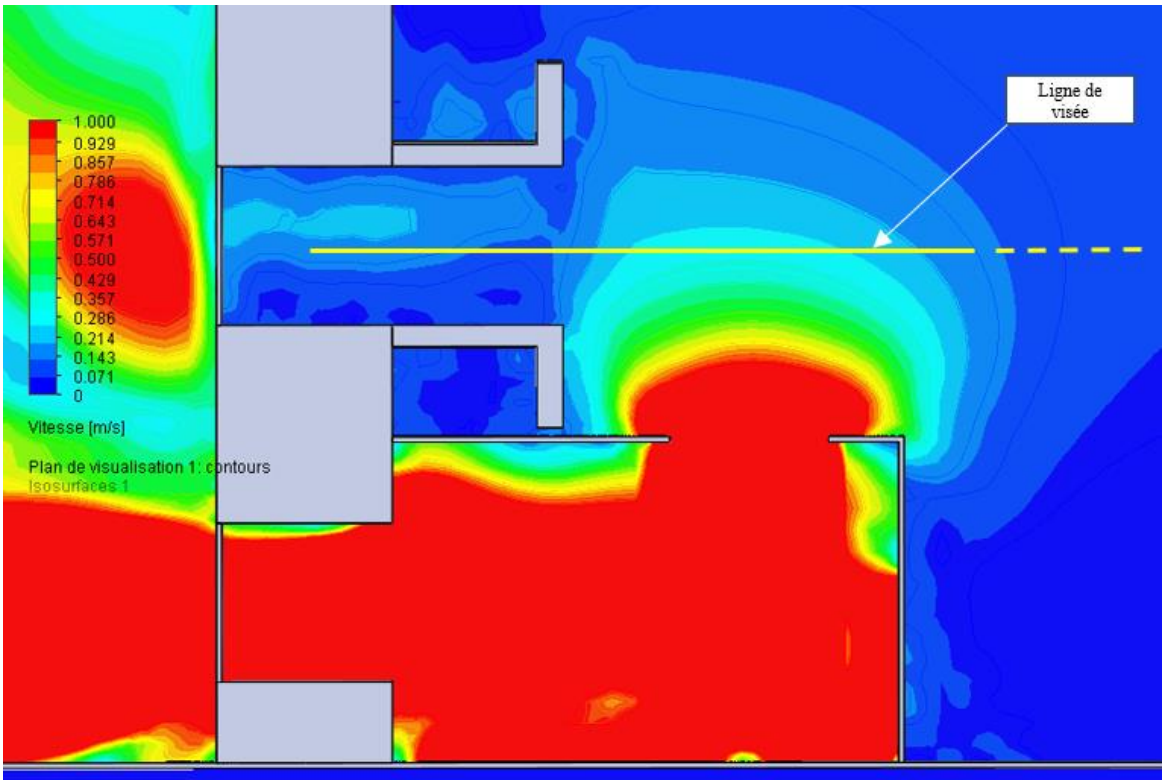


Figure 38 : Profil de vitesse obtenu par simulation de l'écoulement dû au delta P circulaire vertical 1,5 s après l'ouverture de la vanne

On retrouve une nouvelle fois un écoulement très localisé autour de l'embouchure du delta P vertical. Le profil dans le plan indique qu'il n'y a théoriquement presque aucun mouvement dans la zone où l'ADCP est plongé. Les isolignes ont de nouveau une forme circulaire, rendant directement compte de la théorie de la demi-sphère développée dans la section 1.3.3.

La vitesse associée à l'écoulement selon l'axe d'orientation de l'ADCP dans le cas de l'expérience IV.A est affichée ci-dessous. Elle représente la vitesse du fluide projeté sur l'axe d'orientation de l'ADCP utilisé dans l'expérience IV.A en fonction de la distance par rapport à l'ADCP. Le mur est positionné à 230 cm (dernier point sur la courbe) et le centre du delta P est positionné à 160 cm environ (maximum de la vitesse sur la figure).

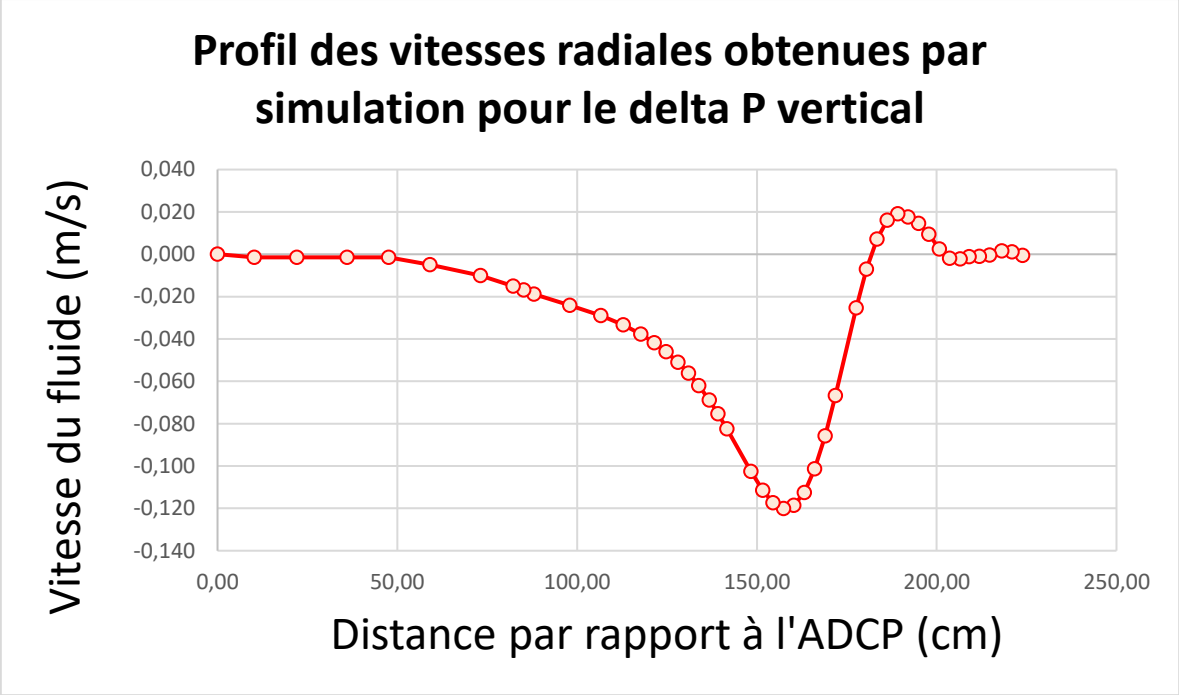


Figure 39 : Évolution théorique de la vitesse radiale sur l'axe d'orientation de l'ADCP dans l'expérience IV.A obtenue par simulation

Les vitesses théoriquement obtenues sont beaucoup plus faibles car la ligne du faisceau était centrée par rapport au diamètre du delta P horizontal (module du dessus sur le profil). L'ADCP n'était plus positionné de manière idéale. Nous pouvions nous attendre à obtenir plus de difficulté pour percevoir une évolution de vitesse dans les cellules 4 et 5 par rapport à l'expérience I. Il est intéressant d'observer que la cellule 3 (100 cm à 150 cm) fait partie de la zone d'évolution de la vitesse. Les résultats de la mesure effectuée par l'appareil V50 au

sein de cette cellule sont observables dans l'Annexe III et nous en parlerons dans la partie 5.5.4. La cellule 5 quant à elle n'est pas censée observer de vitesse très élevée. Or nous avons pu retrouver des vitesses de l'ordre de 10 cm/s.

5.2.3 Simulation delta P rectangulaire

Enfin, l'écoulement dans le cas du delta P rectangulaire peut être visualisé sur la Figure 40.

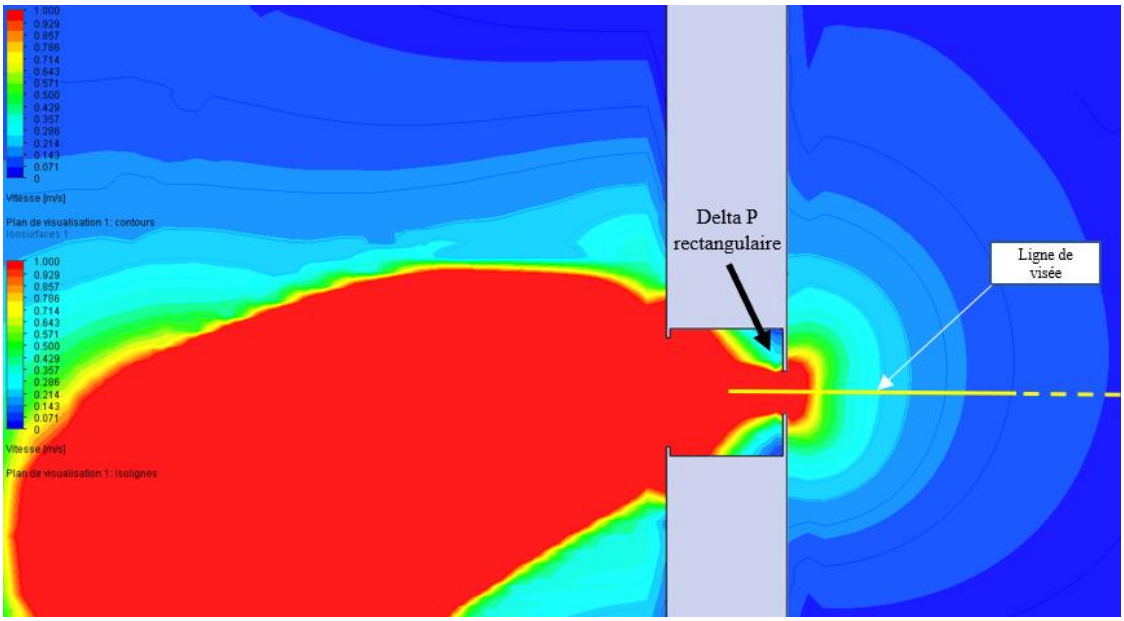


Figure 40 : Profil de vitesse obtenu par simulation de l'écoulement dû au delta P rectangulaire 1,5 s après l'ouverture de la vanne

L'embouchure étant cette fois rectangulaire, le profil des vitesses diffère légèrement de ceux précédemment exposés. L'isosurface d'une vitesse de 0,5 m/s est affichée sur la Figure 41.

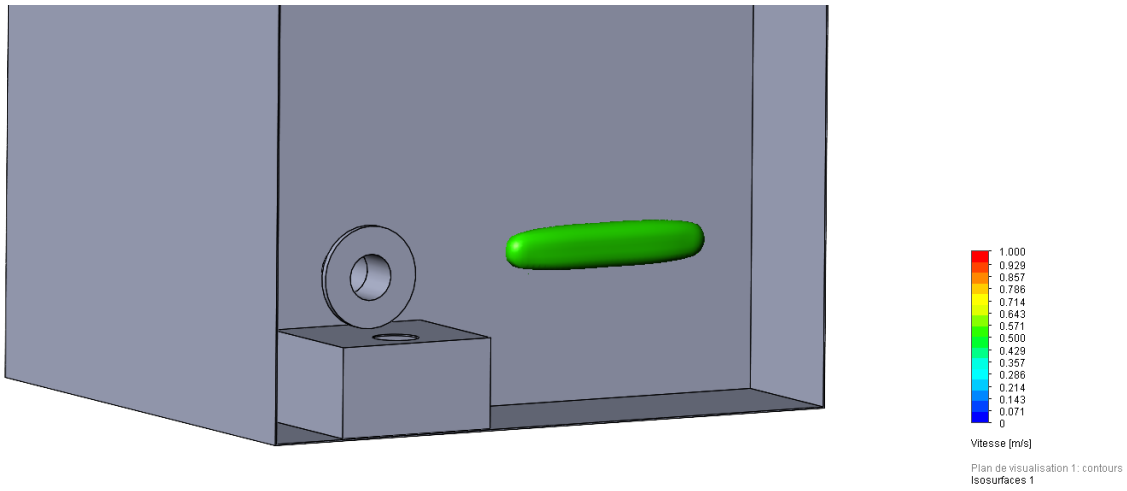


Figure 41 : Isosurface 0,5 m/s du delta P rectangulaire

On remarque que la théorie de la demi-sphère n'est plus vraiment valable dans ce cas. L'écoulement est étendu sur toute la longueur de l'ouverture.

Dans ce cas, la courbe théorique des vitesses obtenue en la projetant sur l'axe d'orientation du faisceau vertical pour l'expérience IV.B est affiché sur la Figure 42.

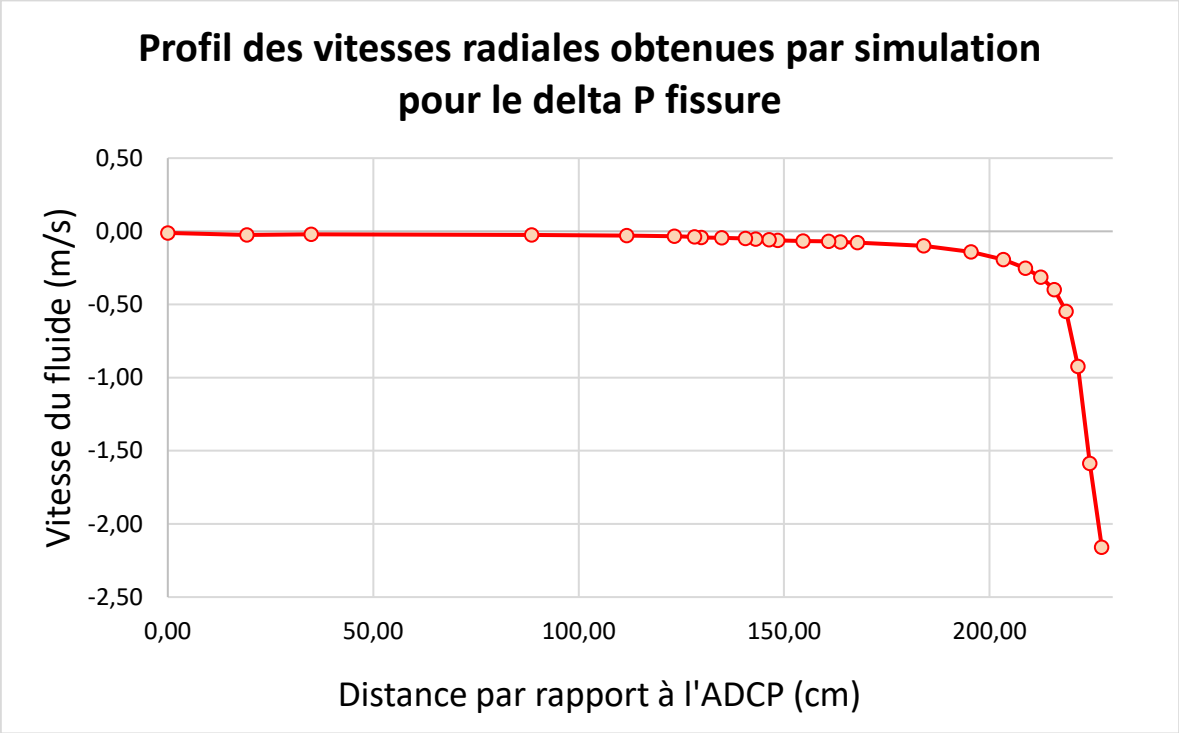


Figure 42 : Évolution théorique de la vitesse radiale sur l'axe d'orientation de l'ADCP dans l'expérience IV.B obtenue par simulation

Cette fois, l'augmentation brutale de la vitesse se déroule dans la cellule 5. Pour cette raison, nous devrions avoir plus de difficulté à détecter le delta P dans la cellule 4. Les courbes de la cellule 4 vont globalement dans ce sens, avec des variations minimes de vitesses. En revanche, on retrouve des variations de vitesse dans la cellule 5 aux allures et aux vitesses résultantes globalement surprenantes.

5.2.4 Comparaison avec les résultats de l'ADCP

En comparant les courbes jusqu'ici obtenues par rapport aux simulations, nous pouvons retenir les points suivants :

i. Dans les cellules 4 et 5, lors d'une détection théorique de variation de vitesse, nous devrions observer une élévation brutale de la vitesse, puis une diminution progressive (linéaire) vers sa vitesse de repos. Nous n'avons pas observé ce phénomène.

ii. Les vitesses résultantes sont très différentes de celles obtenues par simulation. Les extrema sont généralement très inférieurs à ceux obtenus par simulation.

iii. Dans les expériences I, II, III et IV.B, il est normal de ne détecter aucun courant dans cellule 1, 2 et 3. Dans l'expérience IV.A, il est normal que les cellules 1 et 2 ne détectent aucun courant. La cellule 5 ne devrait en revanche pas détecter de grandes variations de vitesse dans ce dernier cas.

La suite du chapitre vise à répondre à ces problématiques.

5.3 PROBLÈME I : INCERTITUDES DES VITESSES RELATIVES DANS LES CELLULES 4 ET 5

Dans la revue de littérature, notamment le sous-chapitre 1.5.9, nous avons pu voir qu'il est normal d'obtenir des grands écarts de vitesses lors de l'étude des mesures sans moyennages, notamment à cause des erreurs aléatoires. Cependant, un moyennage permet d'éliminer ces erreurs et de converger vers la vitesse réelle, lorsque l'ADCP n'est pas biaisé par des contaminations extérieures.

Dans nos différentes expériences (CHAPITRE 4), nous avons pu voir qu'en moyenne, nous obtenons des grands écarts de vitesses par rapport à ce que nous pouvions attendre. Par exemple, dans l'expérience I (Tableau 3), les 2 premiers essais mesurent une vitesse moyenne de 20,2 cm/s et de 8,8 cm/s respectivement au sein de la cellule 4, alors que le bassin est au repos. L'objectif de ce sous-chapitre est donc de discuter des biais de mesures pouvant avoir contaminé l'appareil Sentinel V50 durant les essais.

Pour étudier ce phénomène, nous nous intéresserons à quatre paramètres pouvant influencer les mesures de vitesses :

i. La précision de mesure de l'appareil Sentinel V50 (5.3.1)

ii. Les mouvements résiduels du fluide (5.3.2)

iii. Les particules flottantes pouvant encore être en mouvement alors que le fluide est au repos (5.3.3)

iv. L'interférence des émissions secondaires (5.3.4)

5.3.1 Précision de mesure du Sentinel V50

D'après les spécifications disponibles en Annexe I, l'appareil V50 a une précision de 0,3% de la valeur de vitesse ou bien +/- 0,3 cm/s, il faut retenir la valeur la plus élevée.

Dans le cas d'un fluide au repos, la spécification nous indique donc un écart de vitesse de plus ou moins 0,3 cm/s. Or, dans de nombreux cas, comme l'essai 1 de l'expérience I (Tableau 3), nous dépassons largement les 0,3 cm/s.

Même si nous admettions qu'il existe de faibles courants résiduels à la suite de l'allumage du système de pompage et des remous qu'engendre le delta P. Il est évident que la vitesse ne peut atteindre celle de 20 cm/s. Par conséquent, les spécifications ne peuvent être la cause principale d'un tel écart.

5.3.2 Mouvements résiduels du fluide

Dans cette hypothèse, nous nous sommes intéressés à l'écoulement du fluide après l'obtention de l'équilibre visuel.

Pour chaque essai, nous avons mesuré les 20 minutes qui suivaient l'obtention de l'équilibre visuel. Cependant, il est possible que le temps choisi ne soit pas assez long afin d'obtenir un fluide complètement au repos.

Pour ce faire, nous avons réalisé une prise de mesure sur 10 heures. Celle-ci a débuté après avoir laissé le bassin au repos une nuit complète. Ensuite nous avons activé le delta P en suivant le scénario de l'expérience I (3.5.1). Après l'équilibre visuel obtenu, nous avons laissé l'ADCP effectuer ses mesures pour le reste de la journée. De cette manière, nous avons pu observer son comportement et nous étions aussi certains qu'en fin de journée le fluide était bel et bien au repos. La courbe associée à cet essai est disponible en Annexe IV .

Nous pouvons observer qu'après l'obtention de l'équilibre visuel les mesures n'ont pas évolué vers la vitesse nulle et sont restées oscillantes autour d'une valeur moyenne de 8 cm/s et 30 cm/s pour les cellules 4 et 5 respectivement.

On rejette donc l'hypothèse que les écarts de vitesses obtenus puissent être causés par la présence de courants résiduels.

5.3.3 Particules flottantes toujours en mouvement

Pour rappel, l'ADCP mesure la vitesse des particules flottantes dans le fluide. C'est la réflexion des ondes sur les particules flottantes qui permet d'estimer la vitesse du fluide en assumant l'hypothèse qu'ils ont la même vitesse 1.4.3.

Par conséquent, les vitesses obtenues pourraient être dues aux particules qui sont toujours en mouvements, alors que le fluide n'est animé d'aucun mouvement. Le mouvement des particules pourrait notamment être dû aux particules tombant au fond du bassin sous l'effet de la gravité une fois l'équilibre obtenu.

Si ce phénomène en était la cause, nous devrions également trouver des vitesses similaires au sein des cellules 1, 2 et 3. Or, ces cellules renvoient des vitesses nulles en moyenne. De plus l'essai sur 10 heures (Annexe III) aurait également dû converger vers la vitesse nulle au cours du temps si les particules en étaient la cause.

Ce phénomène ne peut expliquer les incertitudes de vitesses obtenues dans nos expériences.

5.3.4 Interférence des émissions secondaires

Les effets des émissions secondaires sont développés dans le paragraphe 1.5.4. L'ADCP est normalement muni d'un système permettant d'éliminer au maximum les effets des ondes secondaires. Cependant comme développé dans la sous-section 1.5.4, l'ADCP n'arrive actuellement pas à tout éliminer, et des biais de mesures dus aux émissions secondaires peuvent apparaitre. Le bassin n'est pas un environnement optimal pour l'ADCP, les ondes peuvent rebondir très rapidement et dans de multiples directions ce qui peut entrainer très facilement des biais de vitesses élevés dus aux émissions secondaires (Teledyne RDI, échange courriel, 2021).

Pour vérifier l'hypothèse que les cellules 4 et 5 sont biaisées par ce phénomène, nous avons comparé l'intensité de la réception des faisceaux obtenue au sein de ces cellules par rapport aux intensités des faisceaux reçus dans les cellules 1, 2 et 3. L'intensité des faisceaux est quantifiée dans chaque cellule grâce à un indicateur d'intensité du signal reçu (RSSI).

Nous nous sommes aperçus que l'indicateur est maximal pour les cellules 4 et 5, et ce dans la totalité des expériences. Concernant les cellules 1, 2 et 3, l'indicateur du signal est bien en dessous.

Pour comprendre ce résultat, nous avons réalisé un schéma sur la position théorique des cellules dans le bassin, disponible sur la Figure 43. Pour rappel, le traitement de données pour approximer les vitesses est présenté dans la section 1.5.8.

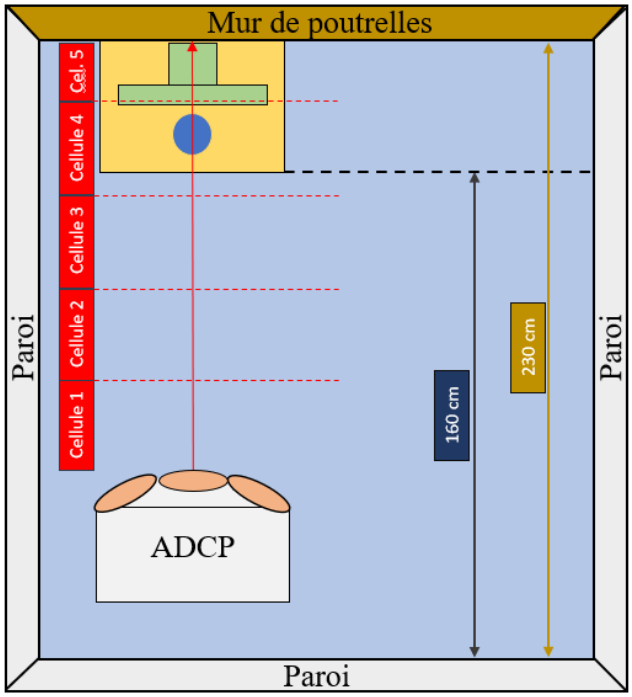


Figure 43 : Vu de haut de la position de l'ADCP dans le bassin et des cellules de mesures correspondantes

L'ADCP est positionné à 2,30m du mur de poutrelles. La cellule 5, qui représente théoriquement la cellule de 2 à 2,5 mètres sera nécessairement biaisée à cause des ondes secondaires qui rentrent en contact avec le mur de poutrelles. Nous pouvions donc nous attendre à ce constat concernant cette cellule.

En revanche, rien n'était certain concernant la cellule 4. Celle-ci n'est pas en contact avec le mur de poutrelles. Cependant, le module du delta P vertical (Figure 28) est positionné à 160 cm du delta P, mais 30 cm en dessous de l'axe du 5^{e} faisceau. Il ne figure théoriquement pas dans la zone de mesures, mais comme les transducteurs envoient des ondes se propageant

sous la forme d'un cône (Figure 13), il est alors fortement possible que la cellule soit biaisée à cause de celui-ci dans le cas des expériences I, III et IV.A. Ceci pourrait notamment expliquer les différences d'allures de courbes obtenues dans la cellule 4 lorsque l'ADCP est dans cette position (expérience I, III et IV.A) contre celles obtenues lorsque l'ADCP est dans d'autres positions (expérience II et IV.B). À ceci, nous pouvons ajouter le phénomène de chevauchement des cellules (1.5.8), signifiant qu'une partie des mesures de la cellule 4 provient de données issues de la cellule 5.

Ajoutons finalement les émissions secondaires pouvant provenir des parois du bassin et de la surface de l'eau.

D'après la littérature, il est difficile de prévoir et de quantifier l'influence des ondes secondaires sur la qualité des données. La contamination associée pouvant entrainer des erreurs de vitesses de plusieurs dizaines de centimètres par secondes. Pour ces raisons, les cellules contaminées sont généralement exclues des études en océanographie (1.5.4).

En tout cas, le RSSI confirme que les mesures des cellules 4 et 5 sont biaisées à cause des émissions secondaires et que les erreurs associées peuvent entrainer de grands écarts de vitesses.

5.3.5 Synthèse des paramètres contaminant les vitesses

Dans notre étude, les émissions secondaires sont la cause principale des écarts de vitesses obtenues dans les cellules 4 et 5, notamment à cause de l'environnement utilisé, où celles-ci peuvent se refléter sur l'ensemble des parois, de la surface de l'eau, du module ou encore du mur de poutrelles.

À ceci, nous pouvons ajouter des biais de mesures dues aux mouvements résiduels du fluide, des particules encore en mouvement ou bien de la capacité de précision de l'ADCP.

Néanmoins, les biais pouvant être engendrés par ces trois paramètres sont bien inférieurs à ceux dus aux émissions secondaires.

Pour la suite de l'étude, il faut donc garder à l'esprit que les cellules 4 et 5 sont biaisées à cause du phénomène expliqué. Et par conséquent les vitesses retenues sont forcément biaisées.

5.4 PROBLÈMES II : FACTEURS FAVORISANT L'INTERFÉRENCE DES ÉMISSIONS SECONDAIRES

Le sous-chapitre précédent a permis de mettre en évidence que les vitesses du fluide mesurées ne sont pas fidèles à la réalité, notamment à cause des émissions secondaires qu'on observe proche des structures solides. Ce sous-chapitre vise à comprendre et expliquer dans un second temps pourquoi nous pouvons observer des mesures de vitesses différentes dans des conditions quasi-similaires.

Même si effectivement les émissions secondaires viennent perturber la vitesse obtenue, nous pouvons nous attendre à ce que la contamination induite soit identique lorsque les essais sont similaires. Par extension, nous pouvons nous attendre à obtenir des vitesses similaires lorsque les conditions d'utilisation sont rigoureusement identiques.

Or, toujours dans le cas de l'expérience I (Tableau 3), on observe pour des essais similaires des mesures de vitesses différentes. Par exemple, les vitesses moyennes obtenues après l'équilibre visuel sont toutes différentes, pourtant le bassin est dans un même état.

De plus, les vitesses obtenues avant ouverture de la vanne et après l'équilibre sont également parfois différentes. Les écarts sont significatifs et ne peuvent pas être expliqués par les biais naturels de mesures que nous avons pu énoncer à la section précédente.

L'objectif de ce sous-chapitre est de discuter des deux problématiques soulevées :

i. Pourquoi la vitesse du fluide obtenue avant l'ouverture de la vanne est-elle souvent différente de la vitesse du fluide obtenue après l'ouverture de la vanne ?

ii. Pourquoi les vitesses du fluide obtenues avant l'ouverture de la vanne (ou après l'équilibre visuel) sont-elles souvent différentes pour des essais similaires ?

Premièrement, la différence majeure entre la phase de préouverture et la phase d'équilibre est la hauteur d'eau. Nous étudierons donc en premier lieu si cette hauteur d'eau peut entraîner des conséquences sur la mesure de vitesse, notamment dues une nouvelle fois aux émissions secondaires sur la surface de l'eau.

En second lieu, nous nous intéresserons à la position et l'orientation de l'ADCP durant les essais. Ceci modifie effectivement l'angle de réflexion des émissions secondaires et donc potentiellement leurs effets sur les mesures de vitesses retenues par l'ADCP.

5.4.1 Influence de la hauteur d'eau sur les mesures

Pour répondre à cette problématique, nous avons étudié le comportement de l'ADCP lors du remplissage du bassin. L'ADCP était positionné comme dans l'expérience I. Les courbes obtenues selon la cellule 4 et la cellule 5 sont disponibles en Annexe IV .

Dans la cellule 4, nous pouvons constater que le remplissage du bassin provoque une variation des vitesses obtenues. Dès l'allumage du système de pompage, on remarque une tendance d'évolution de la vitesse moyenne. Elle semble augmenter ou diminuer de manière linéaire. Les vitesses obtenues avant le remplissage et après le remplissage sont finalement différentes.

Dans la cellule 5, on remarque également que le remplissage de la partie amont provoque une évolution dans la mesure de vitesse obtenue, pouvant amener à une mesure de vitesses différente avant et après le remplissage.

En somme, l'augmentation de la hauteur d'eau est venue modifier les mesures de vitesses obtenues dans les cellules 4 et 5 avec l'appareil V50 dans cette position. Nous retrouverons des variations similaires dans les expériences où l'ADCP est dans cette position (Expérience I, III et IV.A) lors de l'ouverture de la vanne et donc de la diminution de la hauteur d'eau.

En revanche, ce phénomène dépend de la position de l'ADCP. Dans le cas des expériences II et IV.B, nous n'obtenons plus de variations de vitesse dues à l'augmentation ou à la diminution de la hauteur d'eau dans la cellule 4. Ainsi, ce phénomène semble être dépendant de la position de l'ADCP dans le bassin.

Ce phénomène dans notre cas vient évidemment compliquer l'analyse des données. Elle vient s'additionner à l'écoulement dû au delta P qui se déroule en parallèle. Durant les différentes expériences, il faudra donc garder à l'esprit qu'en parallèle de l'écoulement localisé, la diminution de la hauteur d'eau peut provoquer également une variation de la vitesse obtenue.

5.4.2 Orientation de l'ADCP durant le test

Nous avons vu que la hauteur d'eau peut influencer les mesures de vitesses dues aux ondes secondaires qui varient à cause de l'évolution de celle-ci. Cependant, au sein de chaque expérience, les hauteurs d'eau avant ouverture de la vanne et après l'équilibre visuel sont toujours identiques. Or, d'après le Tableau 3 (expérience I-cellule 4), les vitesses moyennes obtenues après l'équilibre visuel sont toutes différentes. D'après le Tableau 7 (expérience III-cellule 4), on remarque dans ce cas que les vitesses obtenues après la phase de delta P sont ici du même ordre de grandeur (environ - 45 cm/s).

Afin d'expliquer ce phénomène, nous avons cherché les différences que nous pouvions observer entre l'expérience I et l'expérience IV.

Pour ce faire les Figure 44 et Figure 45 affichent les courbes de l'angle de tangage de l'ADCP durant les deux essais respectifs. La Figure 50 (Annexe I) illustre les axes de l'ADCP d'après le manuel d'utilisation (TeledyneRDI, 2012).

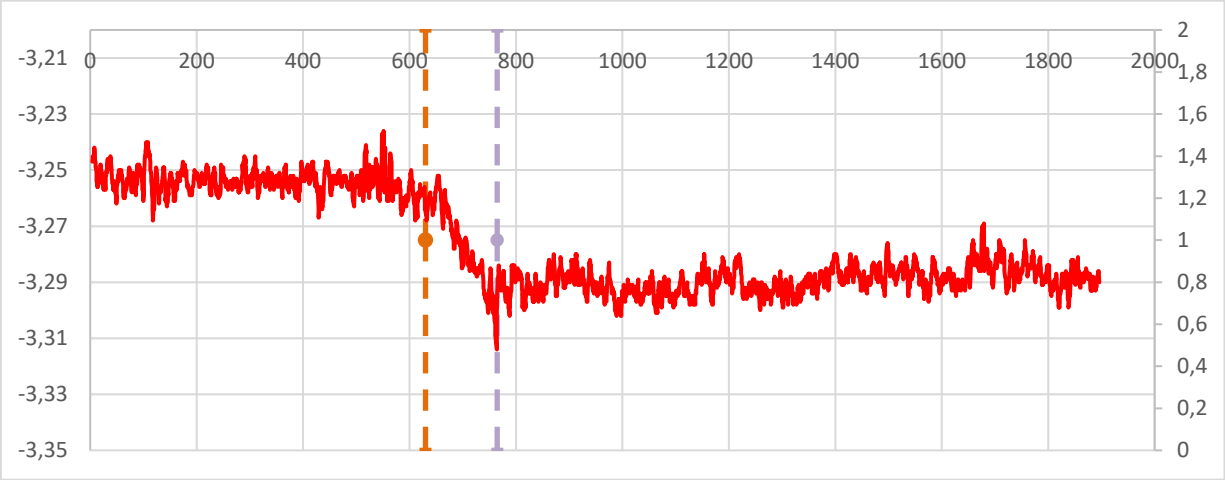


Figure 44 : Angle de tangage durant l'essai 2 de l'expérience I

Figure 45 : Angle de tangage durant l'essai 4 de l'expérience III

On remarque que sur la première courbe l'angle de tangage a été modifié durant la phase de delta P. Le courant induit a modifié l'angle de tangage, ce qui semble avoir été

suffisant pour modifier la réflexion des ondes dans l'environnement et provoquer des mesures de vitesses différentes.

Dans la seconde expérience, l'ADCP n'a pas bougé dans l'intégralité des essais. De cette manière, l'orientation de l'appareil V50 était identique et nous avons pu obtenir des vitesses comparables durant les différentes phases des essais.

5.4.3 Conclusion

Dans le premier cas, nous obtenons des vitesses différentes avant et après la phase de delta P en grande partie à cause de la différence de hauteur d'eau qui diminue durant l'essai. De ce fait, les ondes secondaires qui se réfléchissent sur la surface de l'eau viennent perturber les mesures.

Dans le second cas, nous avons pu obtenir des vitesses différentes au sein d'une même phase (avant le delta P ou après le delta P) en partie parce que l'ADCP a bougé durant la phase de delta P. Ce mouvement a modifié la réflexion des ondes dans l'ensemble du bassin (parois, mur de poutrelles, modules et surface de l'eau), provoquant une modification de la vitesse mesurée.

En conclusion de ce sous-chapitre, nous pouvons dire que l'origine des erreurs de vitesses est due une nouvelle fois à la réflexion des ondes secondaires dans le bassin. Dans le premier cas à cause de la diminution de la hauteur d'eau et dans le second cas à cause du mouvement de l'ADCP dans le milieu.

5.5 RÉSULTATS DES EXPÉRIENCES

Dans ce sous-chapitre, nous revenons sur chacune des expériences afin de conclure sur les résultats obtenus.

5.5.1 Expérience I – Comportement de l'ADCP dans des conditions optimales d'utilisation - Test de répétabilité

Les résultats de l'expérience I sont affichés dans le Tableau 3 pour la cellule 4 et le Tableau 4 pour la cellule 5. Le profil d'écoulement est consultable dans le paragraphe 5.2.1.

Nous pouvons observer une variation de vitesse dans les cellules 4 et 5 lors de l'ouverture de la vanne. Cependant, l'ouverture de la vanne provoque une diminution de la hauteur d'eau. Et dans cette position, la vitesse mesurée est influencée par la diminution de la hauteur d'eau. Par conséquent, une partie de la variation de la vitesse est due à la diminution de la hauteur d'eau, et non à l'ouverture de la vanne.

Cependant, on observe un pic de vitesse dans la cellule 4 que nous n'obtenons pas lors du remplissage du bassin. Dans ce contexte, le pic de vitesse obtenu sur l'allure des courbes du Tableau 3 est encourageant. L'intégralité des essais renvoie ce même phénomène, c'est-à-dire une diminution de la vitesse jusqu'à un extremum puis une augmentation jusqu'à l'équilibre visuel.

La cellule 5 capte en premier lieu une chute brutale de vitesse qui pourrait être causée par le delta P. En tout cas, la vitesse induite par le delta P est rapidement écrasée par la diminution de la hauteur d'eau (phénomène d'oscillations) nous empêchant dans ce cas de conclure sur la détection du delta P. Nous pouvons néanmoins remarquer que les extrema obtenus pendant la phase de delta P semblent plus élevés que durant le remplissage, dépendant uniquement de la hauteur d'eau.

Nous pouvons toutefois souligner la ressemblance des courbes tout au long des essais malgré les différentes contaminations subies. Ceci permet tout de même de valider la répétabilité des essais, c'est-à-dire que l'allure d'un essai à l'autre ne change pas drastiquement. La vitesse obtenue est en revanche à considérer avec beaucoup de recul.

5.5.2 Expérience II – Influence de la position de l'ADCP

Les résultats de l'expérience II sont affichés dans le Tableau 5 pour la cellule 4 et dans le Tableau 6 pour la cellule 5.

Concernant la cellule 4, nous pouvons souligner que dès le premier essai nous n'obtenons plus de variation de vitesse durant la phase de delta P. Ceci signifie que dans la position utilisée, l'ADCP ne capte ni la vitesse due à l'ouverture de la vanne ni la diminution de la hauteur d'eau. Le premier point pouvait être prévisible au regard des simulations et de l'évolution de la vitesse. En revanche, nous pouvions nous attendre à obtenir de plus en plus de contamination à cause de la surface de l'eau puisque l'ADCP s'en rapproche.

Ce dernier point peut tout d'abord provenir du fait que la cellule 4 ne rentre plus en contact avec le module inférieur du delta P vertical (Figure 28). Ce qui diminue de surcroit les biais de mesures dus à celui-ci. Ou bien ceci peut être dû aux faisceaux qui ne rebondissent plus de la même manière sur les parois et donc les biais de mesures induits par les émissions secondaires sur le bassin sont différents et la hauteur d'eau ne modifie plus les mesures de vitesses comme dans la première expérience.

Une chose est certaine, c'est que la position de l'ADCP a une influence directe sur les mesures obtenues notamment à cause des émissions secondaires dans le bassin. Le problème que nous pouvons relever est l'imprévisibilité du phénomène, rendant impossible d'anticiper l'influence que celui-ci peut avoir dans l'environnement. Ceci complique de surcroit notre capacité à déterminer si la vitesse recueillie est due au delta P, ou bien à un autre paramètre influent sur les valeurs de vitesses.

Ce dernier point peut être illustré à partir des essais 3 et 5 (Tableau 5) : On observe selon leur allure une augmentation de la vitesse lors de l'ouverture du delta P par rapport aux

3 autres essais. Cependant, on remarque aussi que ce sont les deux seuls essais où la vitesse avant ouverture de la vanne était bien inférieure à 0 cm/s.

Dans la cellule 5 (Tableau 6), qui reste contaminée par le mur de poutrelle dans l'ensemble des essais, on retrouve un comportement cohérent avec les essais du remplissage de l'Annexe IV . On remarque effectivement un changement d'allure lors de l'ouverture de la vanne se traduisant par des mesures de vitesses oscillantes avec une amplitude assez élevée durant la période de delta P. Ces oscillations traduisent la diminution de la hauteur d'eau durant la période de delta P. Néanmoins, on remarque une certaine tendance entre les différents essais. Plus l'ADCP s'éloigne du delta P et moins les oscillations ont des amplitudes élevées. On remarque même sur les deux derniers essais que l'amplitude des oscillations dans la zone de delta P est semblable à celle après la zone de delta P. Celles-ci traduisant les remous restant le temps que le fluide redevienne dans un état de repos.

Ce phénomène nous permet de distinguer visuellement la zone de delta P puisque les amplitudes des oscillations sont bien plus élevées que durant les zones de préouverture et d'équilibre. À partir du troisième essai, on se rend compte qu'il est plus difficile de distinguer la zone de delta P par rapport à la zone d'équilibre. Sur les deux derniers essais, nous ne sommes plus capables visuellement de distinguer la zone de delta P par rapport à la zone d'équilibre visuel.

Ainsi, nous pouvons dire que dans le cas de la cellule 5, nous avons été capables de détecter des vitesses plus élevées sur les deux premiers essais, c'est-à-dire lorsque l'ADCP était situé à 30 cm et 60 cm au-dessus du delta P. Ensuite, l'ADCP est trop loin de la zone de dangerosité et ne repère plus d'augmentation de vitesse par rapport aux remous engendrés.

5.5.3 Expérience III – Diminution de la zone de dangerosité

Les résultats de l'expérience III sont affichés dans le Tableau 7 pour la cellule 4 et dans le Tableau 8 pour la cellule 5.

L'objectif de cette expérience est d'observer le comportement de l'ADCP avec une diminution du delta P en jouant sur l'ouverture de la vanne.

La Figure 46 montre l'évolution théorique de la vitesse sur 50 cm devant le delta P avec une ouverture de vanne de 15°, 30°, 45°, 60° et 75°.

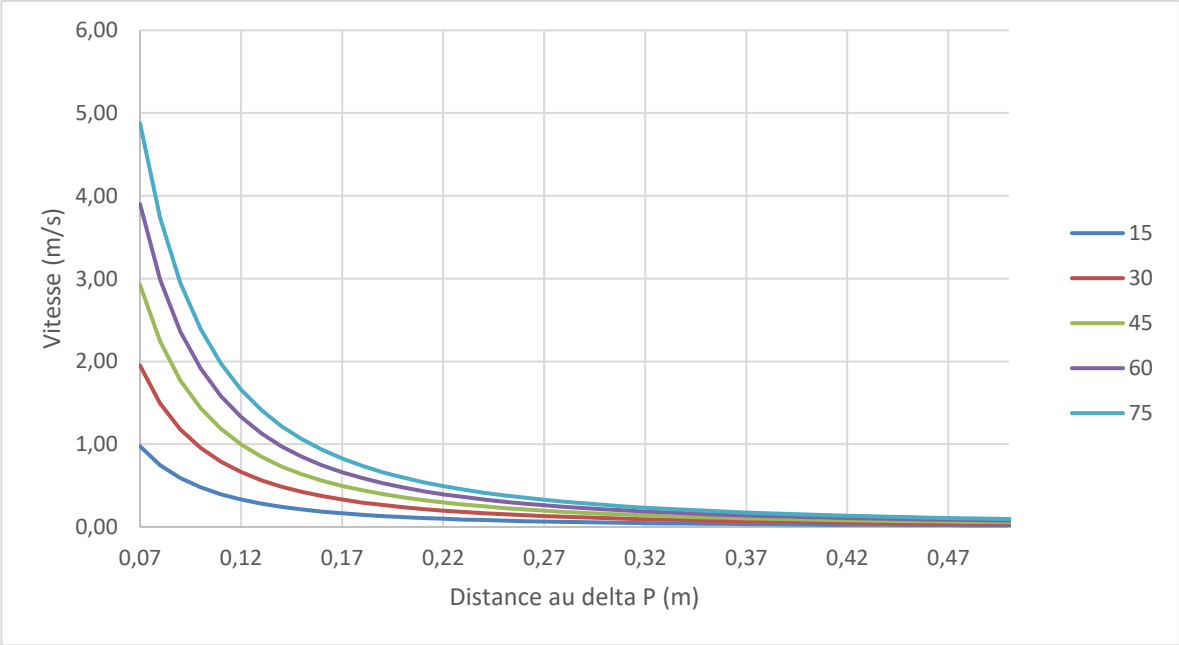


Figure 46 : Courbes des vitesses théoriques au moment d'ouvrir la vanne selon l'angle d'ouverture de la vanne

Dans cette expérience, plus l'ouverture de la vanne est grande et plus la cellule 4 devrait être capable de détecter une augmentation de la vitesse du fluide. Or, à première vue (Tableau 7), on constate sensiblement la même allure de courbe dans l'ensemble des 5 essais.

Dès l'ouverture de la vanne, on remarque une augmentation de vitesse. Plus l'ouverture est élevée et plus la pente d'évolution de la courbe est intense. Ce phénomène est surement dû en grande partie à la diminution de la hauteur d'eau et non au delta P. Nous obtenons effectivement la même allure dès les premiers essais (ouverture de 15° et 30° par exemple). Or, lors de ces essais, le débit est tellement minime que la cellule 4 ne devrait pas capter de variation de vitesse de plus de quelques centimètres par seconde. De plus, au cours des essais, nous aurions dû obtenir une différence flagrante sur l'allure de la courbe, à l'image des courbes théoriques de la Figure 46. Constat que nous ne pouvons observer.

Cela étant dit, nous pouvons observer davantage le moment exact où la vanne a été ouverte. Le Tableau 19 représente un grossissement des courbes de la cellule 4 au moment de l'ouverture de la vanne. Pour diminuer l'effet des biais de mesures hasardeux, la courbe affiche les mesures en ayant moyenné les vitesses à partir de 5 mesures (1.5.9).

Tableau 19 : Influence de l'ouverture de la vanne – Expérience III - Cellule 4

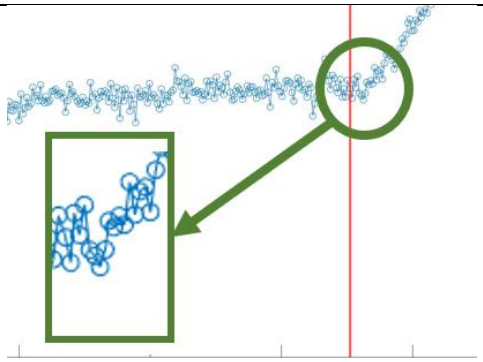
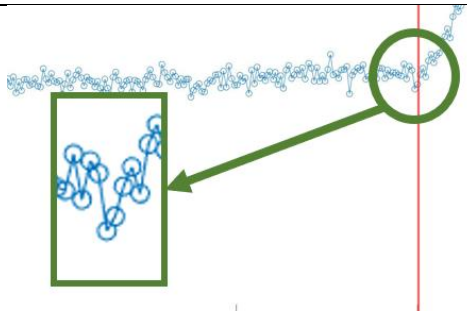
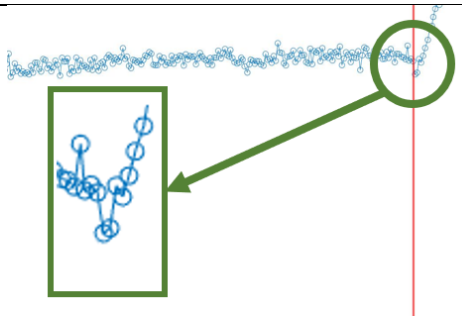
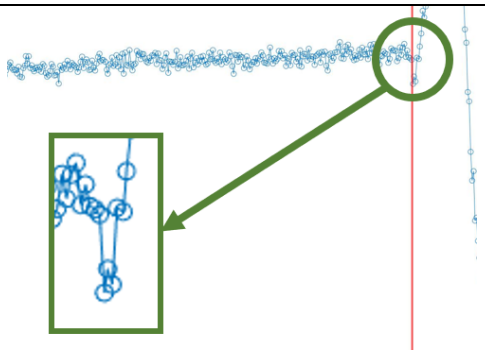
(19.A) Essai 2 Ouverture 30°	
(19.B) Essai 3 Ouverture 45°	

Tableau 19 : Influence de l'ouverture de la vanne – Expérience III - Cellule 4 (suite)

(19.C) Essai 4 Ouverture 60°	
(19.D) Essai 5 Ouverture 75°	

Nous pouvons cette fois observer une chute de vitesse dès l'ouverture de la vanne. Ce qui semble intéressant, c'est que plus la vanne est ouverte et plus le pic de vitesse est marqué. Lors du deuxième essai, nous ne discernons pas de chute de vitesse. Lors du troisième essai, nous pouvons détecter un très faible pic. En revanche, dès l'essai 4, nous pouvons observer une chute de vitesses qui se distingue par rapport aux vitesses de préouverture. L'essai 5 continue dans ce sens avec une chute de vitesse d'autant plus marquante visuellement.

Ce phénomène qui apparait brutalement lors de l'ouverture de la vanne semble être le résultat de l'écoulement provoqué par le delta P puisqu'il ne se reproduit pas dans tous les essais. De plus, la chute de vitesse est négative (la vitesse diminue), ce qui se traduit par un éloignement du fluide par rapport à l'ADCP, soit le phénomène attendu.

Ceci vient confirmer que l'ADCP détecte d'une certaine manière l'écoulement dû au delta P, mais qu'il est largement écrasé et contaminé par l'influence des émissions secondaires, compliquant la détection du delta P dans notre situation.

Dans l'expérience I, nous aurions dû observer ce même phénomène. Cependant, dans cette première expérience, il semblerait que la diminution de la hauteur d'eau entraine une diminution de la vitesse. Par conséquent, l'ouverture de la vanne est venue s'ajouter aux effets de la diminution de la hauteur d'eau dans l'expérience I, alors qu'elle serait venue se soustraire aux effets dans le cas de l'expérience III.

Concernant la cellule 5, nous pouvons également remarquer l'influence de la diminution de la hauteur d'eau durant le delta P. On remarque effectivement 3 pics durant l'écoulement du fluide dans tous les essais, correspondant aux émissions secondaires sur la surface de l'eau due à la position de l'ADCP dans cette expérience. Dans ces essais, les oscillations ne permettent pas d'approfondir l'analyse et d'essayer de détecter une zone de plus forte intensité, comme nous l'avons fait dans la cellule 4.

5.5.4 Expérience IV.A – Delta P Vertical

Les résultats de l'expérience IV – Delta P Vertical sont affichés dans le

Tableau 9 pour la cellule 4 et dans le Tableau 10 pour la cellule 5.

L'objectif de cette expérience est d'observer le comportement de l'ADCP face à un delta P différent. Ici, un delta P vertical. Au vu de sa forme et d'après les simulations, le delta P vertical obtient un écoulement relativement similaire vis-à-vis du delta P horizontal. La seule différence étant que l'ADCP ne vise plus rigoureusement le centre du delta P, la ligne directrice traverse la zone de dangerosité 30 cm au-dessus du module vertical.

D’après les résultats, les profils obtenus selon les cellules 4 et 5 sont très similaires à ceux obtenus dans les expériences I et III. Au vu de l’écoulement quasi-similaire ceci était attendu et vient donc confirmer notre hypothèse de répétabilité. Les contaminations potentielles sont également semblables à celles vues dans les sections précédentes (5.5.1 et 5.5.3).

De plus, le module du delta P vertical est légèrement plus proche de l’ADCP que les autres delta P. En observant les courbes et la simulation (5.2.2), nous avons vu que la cellule 3 détecte dans ce cas précis une variation de vitesse. Les courbes de détections sont affichées dans l’Annexe IV .

Dans cette cellule, on remarque une diminution brutale de la vitesse mesurée dès l’ouverture de la vanne, notamment dans le deuxième essai. S’en suivent une période assez stable puis une diminution progressive de la vitesse jusqu’à un retour de vitesse quasi nul, rendant compte du delta P. En comparaison par rapport aux vitesses attendues d’après la simulation (5.2.2), on remarque que les vitesses sont ici généralement supérieures. Ceci n’est pas tant étonnant compte tenu des incertitudes pouvant apparaitre en l’absence d’un long moyennage (1.5.9). On note également certains phénomènes causés par les émissions secondaires (stabilisation légèrement supérieure à 0 cm/s dans la phase de préouverture dans l’essai 2 par exemple). Ceci peut provenir du phénomène de chevauchement avec la cellule 4 lors du traitement des données.

Cette analyse lors de cet essai vient néanmoins confirmer la détection de l’écoulement dû au delta P. Malheureusement, la contamination due aux émissions secondaires rend l’exercice très compliqué dans les cellules 4 et 5.

5.5.5 Expérience IV.B – Delta P rectangulaire

Les résultats de l'expérience IV – Delta P rectangulaire sont affichés dans le Tableau 11 pour la cellule 4 et le

Tableau 12 pour la cellule 5.

Cette forme de delta P vient représenter ceux de bas de portes ou de fissures dans les barrages. Le profil d'écoulement pour cette forme de delta P est présenté dans la section simulation au paragraphe 5.2.3.

Il est à noter que l'ADCP a été déplacé et vise cette fois le delta P rectangulaire, qui est positionné à 2,30 m du mur de poutrelles. L'appareil V50 n'a pas de module devant soit contrairement aux cas de figure des expériences I, III et IV.A. On s'attend donc à des résultats se rapprochant de l'expérience II.

D'après les résultats de la cellule 4, on remarque dans cette configuration de légères fluctuations dans la zone de delta P. Cependant, les fluctuations ne se distinguent pas de celles obtenues durant la phase d'équilibre. Ceci laisse penser qu'il s'agit bel et bien des remous engendrés par le delta P qui ont été détectés. Ainsi, la cellule 4 est plutôt cohérente par rapport aux attentes. La courbe obtenue ressemble de très près à celles obtenues durant l'expérience II. En outre, on ne note pas l'influence que pouvait avoir la diminution de la hauteur d'eau sur la prise de mesure. Ceci laisse de nouveau penser que ce phénomène était obtenu à cause du module vertical qui empiétait physiquement dans la zone de mesure de la cellule 4.

Constat relativement similaire pour la cellule 5 qui se rapproche des mesures obtenues dans l'expérience II. On remarque une nouvelle fois des oscillations de vitesses de certaines amplitudes. Les amplitudes sont de nouveau plus importantes durant la zone de delta P que durant la zone d'équilibre visuel.

5.5.6 Conclusion des expériences

Les émissions secondaires compliquent grandement la détection des delta P, au point de ne pas être capables de différencier la partie induite par ceux-ci, des mesures induites par le delta P uniquement (5.3.4).

La position de l'ADCP semble être un des facteurs les plus importants dans ce contexte. Tout d'abord, en fonction de son placement dans le bassin, nous avons pu remarquer que les mesures pouvaient être dépendantes de la hauteur d'eau par l'intermédiaire des émissions secondaires (5.4.1) :

- L'ADCP dans expérience I, III et IV.A est positionné face au module vertical. Dans cette configuration, le module vertical pénètre légèrement dans la zone de mesure théorique de la cellule 4. Au sein de cette cellule et dans cette position, les mesures obtenues sont alors dépendantes de la hauteur d'eau de la partie amont.

- On ne retrouve pas ce phénomène lorsque l'ADCP est plus éloigné du module vertical (expérience II et IV.B). Dans celles-ci, l'ADCP n'est théoriquement pas entravé par une structure solide et la cellule 4 n'est plus influencée par la hauteur d'eau.

La 5^{e} cellule est quant à elle biaisée en permanence par le mur de poutrelles et la hauteur d'eau a toujours influencé les mesures de vitesses, quelles que soient les expériences.

De plus, en fonction de l'orientation de l'ADCP, les vitesses mesurées pouvaient être différentes. C'est notamment le cas lorsque l'appareil bougeait durant l'essai, entrainant ainsi une variation de la vitesse dans les deux cellules (5.4.2). En ce sens, dans les zones d'émissions secondaires, la position et l'orientation entrainent une nouvelle fois un caractère imprévisible des mesures obtenues.

Malgré les contaminations induites, nous avons pu remarquer une certaine répétabilité des expériences. Bien que les vitesses soient faussées, nous avons pu obtenir des allures de courbes similaires, pour des expériences similaires, laissant entrevoir une détection d'un delta P basé sur ce principe.

L'expérience II nous a montré que les amplitudes des mesures de vitesses de la cellule 5 durant la zone de delta P sont de plus en plus faibles au fur et à mesure de l'éloignement de l'ADCP. Nous avons retrouvé ce phénomène dans l'expérience IV.B. Nous pouvions retrouver ce phénomène dans les expériences I, III et IV.A, cependant, la position de l'ADCP était différente et l'influence des émissions secondaires nous empêche d'obtenir le même constat.

Dans l'expérience III, nous avons pu détecter une diminution brutale de la vitesse dans la cellule 4 lors de l'ouverture de la vanne. La diminution brutale de vitesse rend compte de l'écoulement du delta P, mais est très rapidement écrasée par l'influence de la hauteur d'eau sur les mesures. Nous avons pu mettre en évidence que la vitesse induite par l'écoulement du delta P venait se déduire de la vitesse induite par la diminution de la hauteur d'eau. C'est notamment le cas lorsque la cellule 4 détecte la vitesse induite par le delta P, et lorsque la hauteur d'eau a une influence sur les mesures obtenues (expériences I, III et IV.A). Dans l'expérience II, la cellule 4 ne mesure aucune variation de vitesse due à son éloignement. Dans l'expérience IV.B, des variations de vitesse ont été mesurées, mais représentent les remous engendrés par le delta P.

Dans l'expérience IV.B, la cellule 3 a permis de mettre en évidence la détection du delta P. Mais nous n'avons pas été capables de retrouver cette détection dans les autres expériences. Les cellules 4 et 5 étant contaminées en permanence.

Finalement, les résultats obtenus dépendent principalement de la position de l'ADCP, plutôt que de la forme du delta P (expérience IV.A et IV.B).

Dans cette configuration particulière (utilisation du bassin et de l'appareil V50), nous pouvons néanmoins noter qu'un grand nombre d'essais a permis de détecter l'ouverture de la vanne, notamment par le biais de la diminution de la hauteur d'eau et de l'écoulement du delta P simultanément.

5.6 DÉTECTION DES DELTA P – TESTS D'HYPOTHÈSE

Dans ce sous-chapitre, nous discuterons de l'application des trois tests d'hypothèse présentés dans la section 3.6.

Une introduction permet de faire le lien entre les mesures de vitesses obtenues jusqu'ici et l'application des tests d'hypothèse (5.6.1).

Ensuite nous discuterons de l'application des tests au regard des résultats de vitesse obtenus. Il s'agira dans un premier temps de vérifier le critère de distribution normale nécessaire au test (5.6.2) et ensuite, de discuter du comportement de chaque test (section 5.6.3, 5.6.4 et 5.6.5 pour les tests respectifs 1, 2 et 3).

Enfin, nous discuterons de la méthode utilisée pour les trois tests et confronterons les résultats (5.6.6).

5.6.1 Introduction

Compte tenu des précédentes expériences, nous avons vu que les mesures de vitesses obtenues dans la zone de delta P sont issues de l'écoulement dû au delta P et souvent des émissions secondaires également. Ceci est notamment dû à l'utilisation du Sentinel V50 dans le bassin. Ce point complique évidemment le travail de détection du delta P à partir des tests d'hypothèse dans notre étude.

L’application des tests s’appuie effectivement sur les mesures de vitesses obtenues sans distinction des deux phénomènes. Cependant, dans notre cas de figure, cette conclusion pourrait soit provenir de l’écoulement dû au delta P (ce que nous recherchons), soit de la variation des mesures due aux émissions secondaires (diminution de la hauteur d’eau) ou encore des deux phénomènes. Les mesures ne nous permettront pas de conclure si le test a bel et bien décidé de la présence du delta P dû à l’écoulement uniquement. Dans notre étude, les décisions des tests permettront plutôt d’observer s’ils détectent effectivement la zone entre l’ouverture de la vanne et l’équilibre visuel.

Dans le cas où les mesures de vitesses issues de l’écoulement du delta P auraient des allures similaires à celles présentées dans l’expérience III (4.4), avec notamment une variation de la mesure de vitesse distincte durant la phase de delta P, les résultats obtenus sur la détection serait alors totalement applicable.

Cela étant dit, l’étude des trois tests d’hypothèse permet d’observer leur comportement vis-à-vis des incertitudes de mesures obtenues. Les incertitudes seraient présentes lors d’un déploiement en espace naturel et ce sous-chapitre permet donc d’obtenir une première approche sur leur comportement.

Dans ce contexte, nous discuterons donc du comportement des trois tests vis-à-vis des mesures obtenues, mais également de l’influence de certains paramètres des tests vis-à-vis des incertitudes de mesures de l’ADCP.

5.6.2 Vérification de la distribution normale des vitesses

Comme mentionné dans la partie méthodologie, les tests d’hypothèse se basent sur un échantillon dont la variable aléatoire suit théoriquement une loi normale. Au vu des expériences et des contaminations engendrées, nous avons vérifié cette hypothèse. La Figure

47 présente la distribution des vitesses de la cellule 4 de l'essai 4 de l'expérience III durant la phase de préouverture.

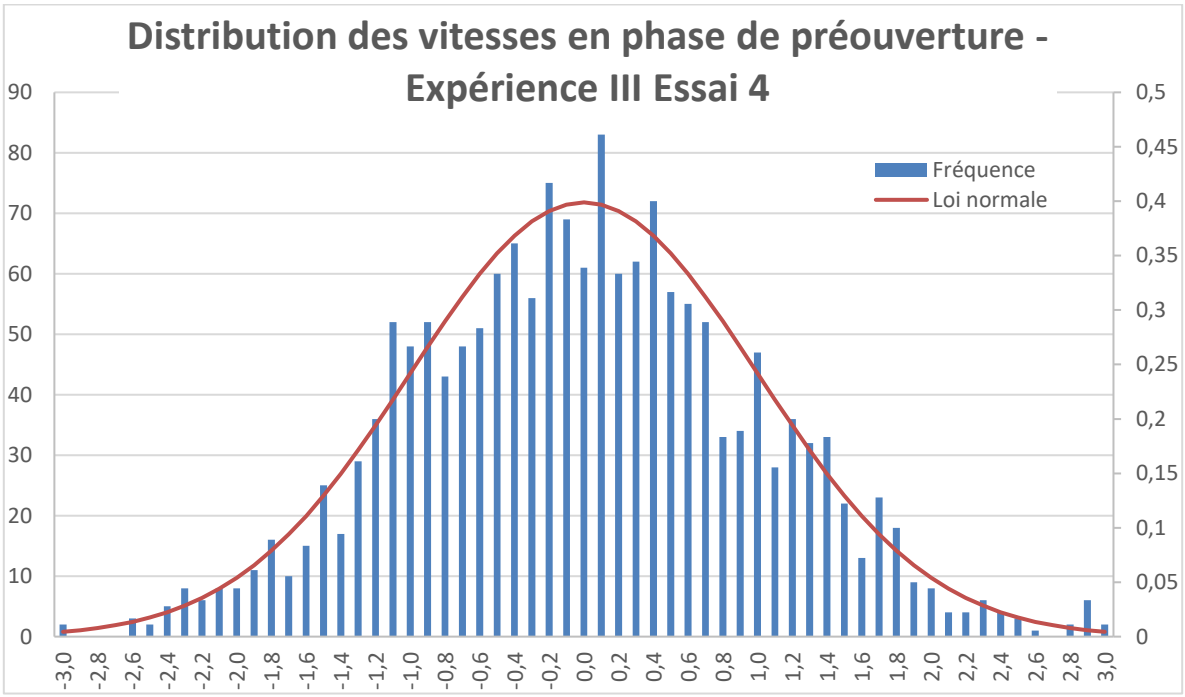


Figure 47 : Distribution des vitesses en phase de préouverture - Expérience III – Essai 4

La courbe de densité de probabilité de la loi normale centrée réduite (courbe rouge) correspond aux distributions obtenues expérimentalement dans les différents essais. Ceci permet en premier lieu de confirmer que la distribution des vitesses suit une loi normale, et ce, même si dans notre cas les mesures de vitesses sont biaisées à cause des conditions d'utilisation. Ce constat nous permet d'utiliser convenablement les trois tests d'hypothèse présentés dans le sous-chapitre 3.6.

Nous pouvons également faire le lien avec la section (1.5.9) mettant en évidence les incertitudes à courts et longs termes. La distribution ci-haut met en évidence les erreurs à court terme pouvant être obtenues sur les parties extrêmes de la courbe (biais hasardeux). Un

moyennage permet de converger théoriquement vers la valeur centrale, qui elle permet d'obtenir la vitesse biaisée due aux incertitudes à long terme (émissions secondaires principalement).

Deuxièmement, nous rappelons qu'afin de respecter le critère des grands nombres nécessaire aux tests, ceux-ci seront réalisés avec des échantillons de 30 mesures, ce qui correspond à un temps d'échantillonnage de 17 secondes.

5.6.3 Comportement du test 1 – Test paramétrique sur la moyenne

Les résultats du test 1 selon les cellules 4 et 5 sont respectivement affichés dans les Tableau 13 et Tableau 14.

Selon la cellule 4, nous pouvons tout d'abord observer durant la phase de préouverture que l'intervalle d'acceptation parvient à suivre l'évolution naturelle de la vitesse. De même durant la phase d'équilibre, où nous pouvons voir le phénomène de remous provoquer des variations de vitesse plus intenses. Il existe cependant quelques erreurs de première espèce. Ces erreurs sont notamment causées par les biais hasardeux qui, parfois, provoquent une sortie de la vitesse de l'intervalle d'acceptation.

Afin d'éliminer les biais hasardeux, la première idée serait d'augmenter le moyennage en augmentant le nombre de valeurs pris dans l'échantillon $N_{éch}$. Ceci permet effectivement de lisser davantage les courbes et de s'affranchir davantage des biais hasardeux. Cependant, comme l'indique l'équation (21). Une augmentation de $N_{éch}$ entraine une diminution de la largeur de l'intervalle d'acceptation. Dans notre cas précis, une augmentation de $N_{éch}$ nous permet donc de lisser effectivement la courbe, mais diminue dans le même temps la largeur de l'intervalle, ne permettant par conséquent pas de diminuer systématiquement les erreurs de première espèce. Ceci dépendra surtout des mesures obtenues.

La meilleure solution pour diminuer les erreurs de première espèce dans notre cas est encore de décider d'un seuil de risque α_{seuil} plus faible (par exemple un seuil de risque de 1% au lieu de 5%), ce qui permettra d'augmenter la valeur du quantile choisi et donc d'élargir la largeur de l'intervalle.

Un des avantages du test est la prise en compte de l'écart-type $\sigma_{éch}$ dans le calcul de l'intervalle. Nous voyons effectivement que la largeur de l'intervalle dans la phase de remous est plus grande que dans la zone de préouverture. C'est grâce à la prise en compte de l'écart-type. Ce caractère est particulièrement intéressant, car la largeur de l'intervalle a pu s'adapter aux variations naturelles du fluide dues aux remous dans la zone d'équilibre.

Concernant la cellule 5, l'intervalle a également tendance à suivre l'évolution naturelle du fluide. Dans les phases de préouverture et d'équilibre, on peut noter davantage d'erreurs de première espèce. Celles-ci semblent majoritairement dues une nouvelle fois aux biais hasardeux. Il serait intéressant une nouvelle fois de décider d'un seuil de risque plus faible pour les diminuer.

Cependant, durant la phase de delta P, les oscillations de vitesses provoquées par la diminution de la hauteur d'eau peuvent entrainer des erreurs de seconde espèce. On voit effectivement que la courbe des vitesses traverse de manière successive l'intervalle de décision. Dans notre cas, le test n'a réalisé qu'une seule erreur de seconde espèce, surement grâce au pas de temps choisi. Ceci est la conséquence de l'allure des vitesses obtenue dans la cellule 5 et aucun paramètre de notre test ne pourra éliminer ce phénomène.

Finalement, nous pouvons souligner que durant les phases d'absences de delta P nous obtenons des erreurs de première espèce très brèves. Nous observons uniquement des pics de delta P successifs, mais nous n'obtenons pas de paliers de delta P. Ces derniers sont en revanche observable durant les phases de delta P. Une vérification pourrait alors être mise en place afin de valider la présence ou non du delta P.

5.6.4 Comportement du test 2 – Comparaison de moyennes

Les résultats du test 2 selon les cellules 4 et 5 sont respectivement affichés dans les Tableau 15 et Tableau 16.

Pour ce test, le seuil de rejet dépend du degré de liberté υ calculé à partir de l'équation (23). Or, celui-ci évolue en fonction du temps et il est difficile de décider d'un seuil variable au cours des essais. Dans le cas où les $N_{éch}$ sont supérieurs à 30 (ce qui est notre cas) et où les variances sont proches, notre variable aléatoire se rapproche d'une loi normale centrée réduite (Ruch, 2012). Par conséquent, et comme première approche, nous avons simplifié le problème en choisissant un critère de décision basé sur la loi normale centrée réduite. Comme précédemment, nous avons alors choisi un seuil de risque α_{seuil}=5% et on prendra donc comme critère de décision $t_{1-\frac{\alpha_{seuil}}{2}}(\upsilon) = 1{,}96$.

En observant les valeurs de la variable de décision de la cellule 4, on voit que les valeurs durant la phase de préouverture sont en moyennes plus basses que celle du seuil. Comme précédemment, des valeurs plus élevées sont obtenues notamment à cause de biais hasardeux. De même, on obtient des erreurs de première espèce successive durant cette phase, jamais de paliers de delta P, laissant une nouvelle fois penser qu'une vérification pourrait être intéressante.

De même, durant la phase d'équilibre où il existe des remous, on remarque que les valeurs de la variable de décision sont bien en dessous du seuil. Celles-ci sont même bien plus basses que durant la phase de préouverture. Ceci est dû au fait que le test est moins sensible aux grands écarts durant la phase de remous que durant la phase de préouverture, car la variable de décision (voir équation 22) prend en compte les écarts-types des échantillons de référence et de l'échantillon testé.

Le test 1 montrait certaines valeurs limite durant la phase d'équilibre, alors que le test 2 ne s'est pas approché dangereusement du seuil critique. Le test 2 semble alors mieux réagir durant cette phase.

Durant la phase de delta P, on remarque des valeurs de décision assez élevée, caractérisant l'augmentation brutale de la vitesse. La moyenne de l'échantillon augmente considérablement par rapport à la moyenne de référence. En revanche, lors de l'inversion du pic de vitesse, on voit que la valeur de décision diminue et s'est approchée dangereusement du seuil. Ceci est causé par l'inversion de la tendance de la vitesse mesurée, ce qui provoque un équilibrage des deux moyennes à un moment donné (t=850s dans notre cas). Ceci est notamment dû à l'échantillon de référence choisi, qui dans notre cas évolue dans le temps. Ce phénomène souligne l'importance de $I_{réf}$.

Concernant la cellule 5, on obtient des valeurs peu stables causées par l'instabilité même des valeurs de vitesses mesurées. La variable de décision dépasse successivement le seuil de décision, et ce durant les 3 phases. Le test 2, comme le test 1, ne s'avère pas très performant dans ce cas de figure.

Cependant, on remarque que la variable de décision est en général bien plus élevée durant la phase de delta P que durant les deux autres phases. Nous pouvons imaginer qu'avec un seuil plus élevé, les erreurs de premières espèces auraient considérablement diminué.

Nous pourrions également augmenter la valeur de $N_{éch}$ choisie dans l'échantillon (ou de diminuer $N_{réf}$) afin d'augmenter la stabilité des moyennes obtenues. Ceci permettrait d'obtenir un intervalle $I_{éch}$ davantage similaire à l'intervalle $I_{réf}$ et ainsi de diminuer la sensibilité du test vis-à-vis des variations aléatoires de vitesses (on rappelle que si $N_{éch}= N_{réf}$ on a $I_{éch}=I_{réf}$). Cependant, ceci viendrait augmenter les risques de seconde espèce, pouvant être très dangereux. De plus, ceci pourrait également faire baisser la détection obtenue dans la cellule 4. Un paramétrage adapté suivant chaque cellule pourrait alors être plus performant.

5.6.5 Comportement du test 3 – Comparaison de variances

Le test 3 diffère des deux premiers car son principe ne s'appuie plus sur la moyenne obtenue, mais sur la variance obtenue. Les résultats du test 2 selon les cellules 4 et 5 sont respectivement affichés dans les Tableau 17 et Tableau 18.

Concernant la cellule 4, cette fois-ci, le test semble avoir perdu en efficacité puisque les remous dans la zone d'équilibre nous donnent des valeurs de décision du même ordre de grandeur que celle située durant le delta P, si l'on écarte l'extremum obtenu à t=900s.

Dans la phase de préouverture, le fluide est plutôt stable et on retrouve la stabilité avec ce test en obtenant une valeur de décision très basse durant la totalité de la phase d'ouverture. La courbe du delta P indique une seule erreur de première espèce, notamment parce que la variable de décision est passée en dessous du seuil minimal. Le seuil minimal pourrait d'ailleurs être retiré au regard de l'évolution de la courbe durant le test. Il n'a apporté que des erreurs de première espèce.

Dès l'ouverture de la vanne, la variance augmente et les valeurs de décisions dépassent le seuil, permettant de conclure la présence d'un delta P. Cependant, les variances obtenues semblent similaires à celles obtenues durant la phase d'équilibre. De ce fait, le test conclut qu'il y a présence de delta P durant les phases de delta P et d'équilibre.

Pour tenter d'observer une différence, il peut être intéressant de calculer la variance à partir d'un échantillon pré-moyenné. Le sous-chapitre 1.5.9 mentionne les biais hasardeux et explique qu'un moyennage permet très rapidement de réduire leurs impacts. Nous nous baserions sur ce principe ici. Effectuer un pré-moyennage avant le calcul de la variance (par exemple, calcul de la variance de l'échantillon avec un pré-moyennage sur 5 valeurs) aurait pour conséquence de diminuer l'effet des biais hasardeux et aussi des remous. Ainsi, le test

serait davantage sensible à la tendance d'évolution de la vitesse plutôt qu'aux grands écarts de vitesses pouvant être obtenues à un seul instant.

Dans la cellule 5, les valeurs de la variable de décision obtenues dans la zone de préouverture et d'équilibre sont légèrement oscillantes. Dans la phase de préouverture, elles le sont généralement autour du seuil maximal de décision. Dans la phase d'équilibre, elles le sont autour du seuil minimal. Le seuil minimal n'a d'ailleurs de nouveau entrainé que des erreurs de première espèce, comme pour la cellule 4. Il serait intéressant de retirer ce seuil compte tenu de l'allure de la variable de décision durant la phase de delta P. Le seuil maximal pourrait également être augmenté afin de diminuer les erreurs de premières espèces associées, notamment durant la phase de préouverture. Cela étant dit, les écarts de vitesses sont une nouvelle fois la conséquence de biais hasardeux pouvant provoquer de grandes variances dans un échantillon.

Dès l'ouverture de la vanne, les grandes variations de vitesse permettent d'obtenir une augmentation de la variance. La variable de décision augmente considérablement et permet de décider de la présence du delta P.

De la même manière qu'exposé précédemment, il peut être intéressant dans la cellule 5 d'instaurer un pré-moyennage pour le calcul de la variance de l'échantillon. Ceci permettrait notablement d'éliminer une variance élevée causée par les biais hasardeux et d'augmenter la sensibilité du test à la tendance d'évolution de la vitesse.

Les mesures de vitesses obtenues entre la cellule 4 et la cellule 5 étant relativement différentes, un couplage différent sur le pré-moyennage pourrait s'avérer être très performant.

5.6.6 Comparaison des trois tests

Nous avons pu voir que les deux premiers tests se comportent de manières assez similaires et permettent d'obtenir des résultats similaires assez satisfaisants. Le test de

comparaison de la moyenne présente néanmoins l'avantage d'avoir une valeur décisionnelle définie. Le seul calcul de cette valeur de décision permet d'accepter ou de rejeter l'hypothèse nulle à partir du seuil.

Le test 3 est quant à lui encourageant dans la détection des delta P. Nous avons pu voir que la valeur de décision obtenue dans les cellules 4 et 5 est relativement plus élevée durant la phase de delta P que durant les autres phases, laissant entrevoir un potentiel dans la détection des delta P. Cependant, il serait très intéressant d'instaurer un pré-moyennage avant le calcul des variances afin de diminuer grandement l'influence des biais hasardeux sur la valeur de la variance obtenue. Ceci aura pour conséquence d'améliorer la sensibilité du test à la tendance d'évolution, plutôt qu'aux valeurs extrêmes pouvant être obtenues dues aux biais hasardeux.

Nous pourrions imaginer une décision basée sur les tests 2 et 3 afin de conclure sur la présence ou non du delta P. Ils pourraient travailler en parallèle et une vérification s'appuyant sur les deux tests pourrait être intéressante afin d'augmenter la puissance du test et de diminuer les potentielles erreurs de première espèce. Un paramétrage adapté selon les cellules pourrait également être intéressant, car les vitesses obtenues dépendamment de la contamination peuvent être différentes.

Enfin, nous pouvons rappeler que les tests 1 et 2 ont nécessité un intervalle de référence pour leur fonctionnement. Cet intervalle de référence nécessite un nombre de valeurs de vitesses $N_{réf}$ suffisamment grand pour se distinguer de $I_{éch}$. Mais il devait également être suffisamment faible pour continuer de s'adapter aux changements naturels du fluide. Le test 3 présente l'avantage de ne pas en être dépendant car nous avons pu fixer une variance de référence constante. Nous ne pouvions le faire pour les deux autres tests car ceux-ci ont besoin de s'adapter à l'évolution de la vitesse moyenne du fluide.

Finalement, les tests ont nécessité un échantillon d'au moins 30 valeurs, ce qui nécessite au moins 17 secondes à l'ADCP pour les obtenir. Ce temps est relativement long et il serait nécessaire de le diminuer afin de converger vers une décision en temps réel, idéalement. Pour ce faire, il serait intéressant de diminuer ce nombre de valeurs pris dans l'échantillon afin de diminuer le délai pour obtenir une décision, mais ceci vient évidemment diminuer la puissance des tests.

5.7 CONCLUSION DE LA DISCUSSION

De manière générale, nous avons pu voir que l'ADCP semble toujours réagir à l'ouverture de la vanne dans les cas de delta P. Cependant, les interférences des émissions secondaires engendrées notamment par la position de l'ADCP dans le bassin contaminent grandement les mesures obtenues. Dépendamment de la position de l'ADCP, la hauteur d'eau a une influence sur les mesures de vitesses obtenues.

Le réel problème réside également dans l'incapacité de prévoir et de quantifier l'influence de ce phénomène sur les mesures. Même si nous avons pu relever des paramètres sur les courbes permettant de distinguer la présence du delta P, ceux-ci étaient rapidement écrasés par l'influence des émissions secondaires. Nous avons pu effectivement jouer sur les amplitudes observées durant la phase de delta P dans la cellule 5 ou encore sur les variations brutales de vitesses.

Le bassin n'est absolument pas optimal pour la prise de mesure puisqu'il favorise la réflexion des émissions secondaires dans l'ensemble des directions, sur les parois, le fond du bassin et la surface de l'eau.

Les tests quant à eux semblent être de bons outils pour décider de la présence ou non des delta P. Cependant, ceux-ci nécessitent un nombre minimal de mesures nécessitant une quinzaine de secondes de traitement.

CONCLUSION GÉNÉRALE

La dangerosité d'un delta P réside premièrement dans sa capacité à générer un courant fort et localisé, capable d'emporter un plongeur en intervention. Mais elle réside également dans sa capacité à surprendre le plongeur puisque l'évolution de la vitesse proche d'un delta P se fait très subitement.

Trois instruments à effet Doppler utilisés en océanographie admettent théoriquement un potentiel de détection des delta P. On retrouve le Vélocimètre Acoustique à Effet Doppler (ADV), le Courantomètre Acoustique à une seule cellule et le Profileur Acoustique à Effet Doppler (ADCP). Le premier admet l'avantage d'être plus précis et moins limité par les limites naturelles de l'Effet Doppler. Mais il nécessite que les plongeurs s'approchent dangereusement de la zone d'intervention pour effectuer la mesure. C'est notamment le cas des actuelles méthodes de détection. Le courantomètre et notamment l'ADCP présentent l'avantage d'effectuer une mesure de la vitesse du fluide loin de la zone de dangerosité. Le plongeur n'a alors pas besoin de se mettre en danger pour effectuer la mesure. Les mesures obtenues avec ces deux instruments sont théoriquement moins précises, mais permettent théoriquement d'augmenter considérablement la sécurité du plongeur.

En pratique, seule l'application de l'ADCP a été étudiée au cours du mémoire à partir de l'appareil Sentinel V50 de Teledyne RDI. Tout d'abord, les limites du bassin utilisé ont empêché d'utiliser le plein potentiel que propose théoriquement l'ADCP. Le bassin favorise la réflexion des ondes dans n'importe quelles directions ce qui n'a pas permis d'utiliser les faisceaux convexes. Par extension l'approximation de la vitesse tridimensionnelle n'a pas pu être obtenue. Seule la vitesse radiale du 5^{e} faisceau a pu être étudiée dans des cas de delta P.

Deuxièmement l'ADCP utilisé permet d'obtenir une épaisseur de cellule de 50 cm, ce qui est très élevée afin de permettre la détection des delta P et leur courant induit. L'utilisation d'un ADCP à très haute fréquence permettrait d'obtenir une épaisseur de cellule d'une dizaine de centimètres, ce qui serait préférable.

Ensuite, la zone de dangerosité des delta P à détecter se trouve proche des structures solides. Les vitesses dangereuses à mesurer se trouvent alors proches des structures et dans ce contexte, l'ADCP présente des difficultés pour détecter des variations de vitesse. Des émissions secondaires dues à la réflexion des ondes sur la structure solide en question peuvent apparaitre.

La grande difficulté des émissions secondaires réside dans l'incapacité d'anticiper les conséquences du phénomène. Il est actuellement impossible de les prévoir et de les quantifier. Il est uniquement possible de savoir quelles cellules sont contaminées. Les ondes peuvent se réfléchir différemment dans différentes configurations menant à des mesures de vitesses différentes. Actuellement, le traitement de données interne à l'ADCP n'est pas capable de les éliminer à tel point que la zone de contamination n'est en général pas étudiée en océanographie. Les mesures de vitesses obtenues sont alors faussées.

La position de l'ADCP joue également un rôle majeur dans l'obtention des mesures de vitesses. Dépendamment de sa position dans le bassin, nous avons pu voir que la hauteur d'eau pouvait influencer les valeurs de vitesses obtenues. Dans d'autres configurations, nous ne le voyons pas. C'est également une conséquence des émissions secondaires, cette fois provoquée par la position de l'appareil V50 dans le bassin.

Cela étant dit, le courant dangereux induit par le delta P a pu être détecté dans différentes situations. Nous avons pu effectivement jouer sur les amplitudes observées durant le delta P ou encore sur les variations brutales de vitesses observées. Cependant, ces phénomènes se sont rapidement fait écraser par l'influence des émissions secondaires, et

notamment la diminution de la hauteur d'eau dans nos essais, qui a provoqué à elle seule une variation de la mesure de vitesse obtenue.

Nous pouvons néanmoins souligner que nous avons pu détecter dans tous nos essais l'ouverture de la vanne. Cette détection étant le résultat du courant induit par le delta P et parfois de la diminution de la hauteur d'eau.

Cette réflexion mène une nouvelle fois aux limites induites par l'utilisation du bassin. Celui-ci est venu favoriser la réflexion des ondes dans de multiples directions et ainsi contaminer les mesures de vitesses. Mais celui-ci mène également à une diminution de la hauteur d'eau durant la phase de delta P.

Il serait intéressant d'étudier le phénomène en milieu permanent, c'est-à-dire dans un milieu où la hauteur d'eau de la partie amont n'évolue pas au cours du temps. Ceci pourrait permettre d'observer uniquement le courant induit par le delta P. Idéalement, il faudrait étudier le phénomène en milieu naturel. Les tests pourraient également être effectués à partir d'un ADCP plus adapté. Comme mentionné précédemment, une épaisseur de cellule d'une dizaine de centimètres serait idéale. Ceci augmenterait théoriquement la précision de la mesure. De plus, certaines cellules pourraient potentiellement détecter le delta P sans être biaisées par les émissions secondaires.

Enfin, les tests d'hypothèse présentent un potentiel encourageant pour décider de la présence ou non du delta P. Que ce soient les tests d'hypothèse s'appuyant sur la moyenne ou bien sur la variance, ils ont montré une certaine sensibilité à détecter le delta P lorsque les mesures de vitesses s'accompagnaient d'une variation rapide. Il est à noter que ceux-ci s'appliquent sans nécessiter d'obtenir des vitesses fiables et représentatives de la réalité.

Cependant, les tests ont été effectués et paramétrés en respectant les critères mathématiques de base pour leur construction. Ainsi, les tests ont utilisé 30 mesures de vitesses pour chaque échantillon. Ceci représente un temps de traitement de 17 secondes (0,6

seconde environ pour une mesure de vitesse). Une inspection avant une plongée pourrait être envisagée puisque le temps de traitement ne semble pas être une limite dans ce contexte. Cependant, une détection en temps réel et en intervention subaquatique serait difficile d'être envisagée. Il serait intéressant de tenter de diminuer le temps de traitement afin de permettre de décider de la présence ou non du delta P en quelques secondes maximum.

À terme, l'ADCP pourrait par exemple être couplé avec un système inertiel permettant de prendre en compte la vitesse de l'ADCP et de détecter les delta P en accompagnant le plongeur. C'est d'ailleurs de cette manière que le profil des vitesses est généralement réalisé en océanographie, l'ADCP étant fixé à la coque d'un bateau mobile (Simpson, 2001).

ANNEXES

ANNEXE I : PARAMÈTRES DU SENTINEL V50 DE TELEDYNE RDI

Cette annexe présente des informations complémentaires sur le Sentinel V50. La Figure 48 présente les paramètres expérimentaux choisis pour les essais en bassin. La Figure 49 présente l'ensemble des spécifications relatives au V50. Enfin la Figure 50 présente les axes de l'ADCP.

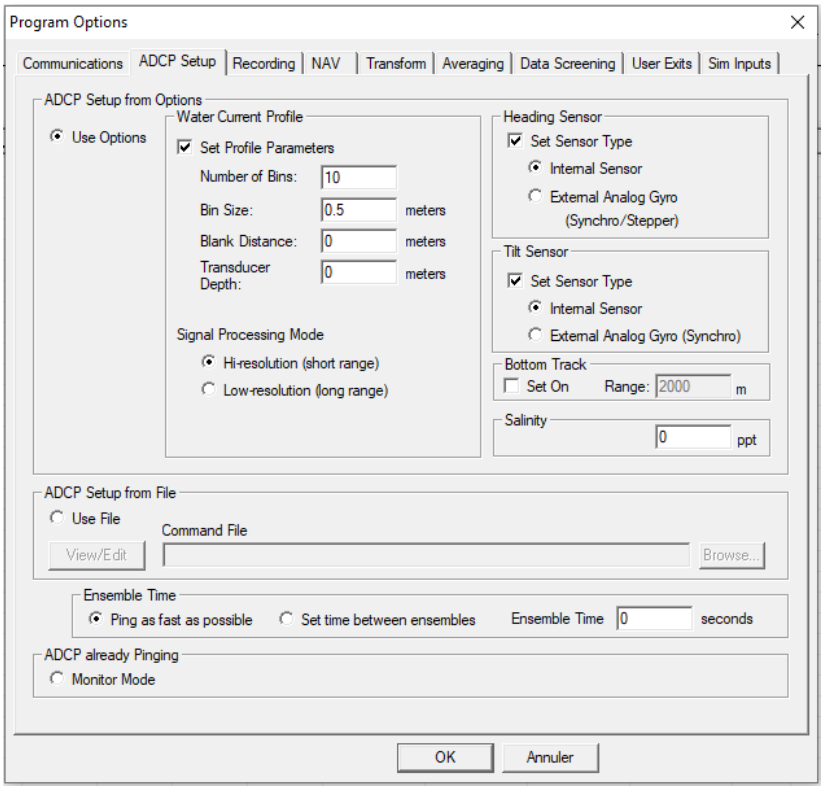
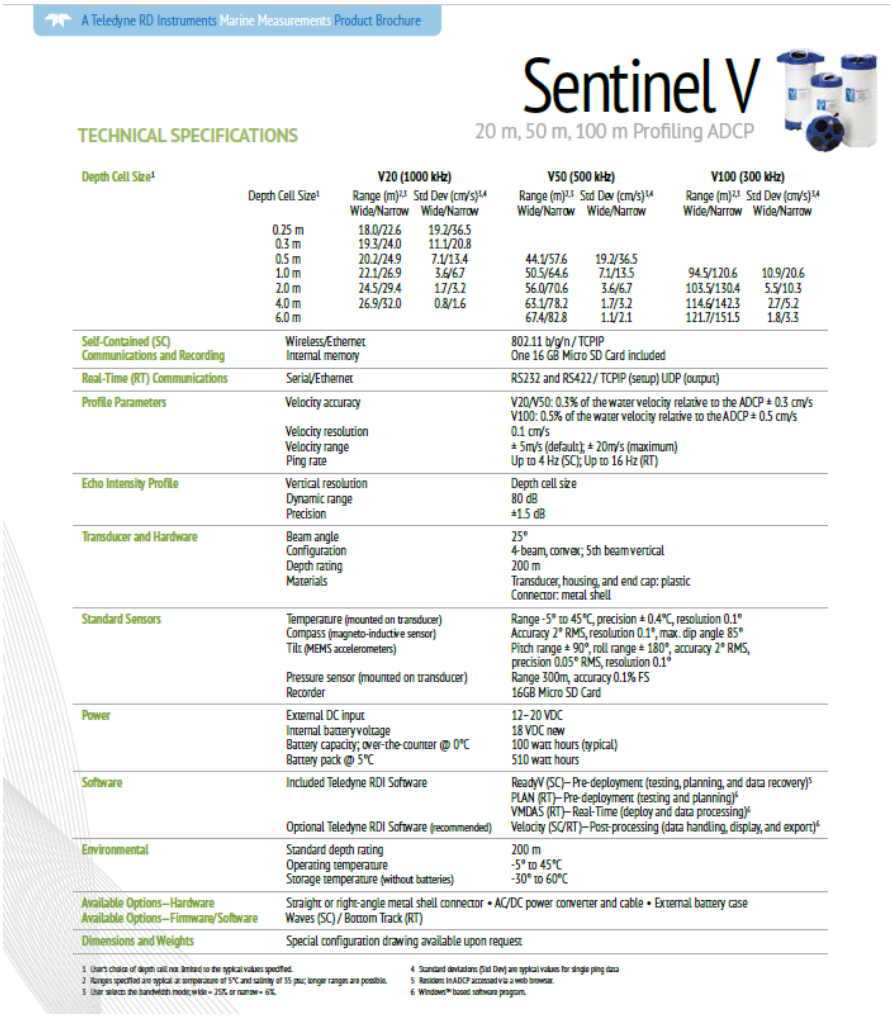


Figure 48 : Configuration du V50 utilisée pour les expériences

On retrouve une épaisseur de cellule choisie de 50 cm, avec une prise de données effectuée sur 10 cellules. C'est en post-traitement avec Matlab que nous récupérons seulement les données sur les 5 premières cellules. Nous avons également choisi d'émettre les ondes le plus rapidement possible afin de diminuer le temps d'obtention des échantillons nécessaires aux tests d'hypothèse.



A Teledyne RD Instruments Marine Measurements Product Brochure

Sentinel V

20 m, 50 m, 100 m Profiling ADCP

TECHNICAL SPECIFICATIONS

		V20 (1000 kHz)		V50 (500 kHz)		V100 (300 kHz)	
Depth Cell Size[1]	Depth Cell Size[1]	Range (m)[2,3] Wide/Narrow	Std Dev (cm/s)[3,4] Wide/Narrow	Range (m)[2,3] Wide/Narrow	Std Dev (cm/s)[3,4] Wide/Narrow	Range (m)[2,3] Wide/Narrow	Std Dev (cm/s)[3,4] Wide/Narrow
	0.25 m	18.0/22.6	19.2/36.5				
	0.3 m	19.3/24.0	11.1/20.8				
	0.5 m	20.2/24.9	7.1/13.4	44.1/57.6	19.2/36.5		
	1.0 m	22.1/26.9	3.6/6.7	50.5/64.6	7.1/13.5	94.5/120.6	10.9/20.6
	2.0 m	24.5/29.4	1.7/3.2	56.0/70.6	3.6/6.7	103.5/130.4	5.5/10.3
	4.0 m	26.9/32.0	0.8/1.6	63.1/78.2	1.7/3.2	114.6/142.3	2.7/5.2
	6.0 m			67.4/82.8	1.1/2.1	121.7/151.5	1.8/3.3

Self-Contained (SC) Communications and Recording	Wireless/Ethernet Internal memory	802.11 b/g/n / TCPIP One 16 GB Micro SD Card included
Real-Time (RT) Communications	Serial/Ethernet	RS232 and RS422 / TCPIP (setup) UDP (output)
Profile Parameters	Velocity accuracy Velocity resolution Velocity range Ping rate	V20/V50: 0.3% of the water velocity relative to the ADCP ± 0.3 cm/s V100: 0.5% of the water velocity relative to the ADCP ± 0.5 cm/s 0.1 cm/s ± 5m/s (default); ± 20m/s (maximum) Up to 4 Hz (SC); Up to 16 Hz (RT)
Echo Intensity Profile	Vertical resolution Dynamic range Precision	Depth cell size 80 dB ±1.5 dB
Transducer and Hardware	Beam angle Configuration Depth rating Materials	25° 4-beam, convex; 5th beam vertical 200 m Transducer, housing, and end cap: plastic Connector: metal shell
Standard Sensors	Temperature (mounted on transducer) Compass (magneto-inductive sensor) Tilt (MEMS accelerometers) Pressure sensor (mounted on transducer) Recorder	Range -5° to 45°C, precision ± 0.4°C, resolution 0.1° Accuracy 2° RMS, resolution 0.1°, max. dip angle 85° Pitch range ± 90°, roll range ± 180°, accuracy 2° RMS, precision 0.05° RMS, resolution 0.1° Range 300m, accuracy 0.1% FS 16GB Micro SD Card
Power	External DC input Internal battery voltage Battery capacity; over-the-counter @ 0°C Battery pack @ 5°C	12–20 VDC 18 VDC new 100 watt hours (typical) 510 watt hours
Software	Included Teledyne RDI Software Optional Teledyne RDI Software (recommended)	ReadyV (SC)—Pre-deployment (testing, planning, and data recovery)[5] PLAN (RT)—Pre-deployment (testing and planning)[6] VMDAS (RT)—Real-Time (deploy and data processing)[6] Velocity (SC/RT)—Post-processing (data handling, display, and export)[6]
Environmental	Standard depth rating Operating temperature Storage temperature (without batteries)	200 m -5° to 45°C -30° to 60°C
Available Options—Hardware **Available Options—Firmware/Software**	Straight or right-angle metal shell connector • AC/DC power converter and cable • External battery case Waves (SC) / Bottom Track (RT)	
Dimensions and Weights	Special configuration drawing available upon request	

1 User's choice of depth cell not limited to the typical values specified.
2 Ranges specified are typical at temperature of 5°C and salinity of 35 psu; longer ranges are possible.
3 User selects the bandwidth mode: wide = 25%, or narrow = 6%.
4 Standard deviations (Std Dev) are typical values for single ping data
5 Resident in ADCP accessed via a web browser.
6 Windows® based software program.

Figure 49 : Spécifications techniques du Sentinel V50

La figure ci-dessous présente les axes associés au système interne de l'ADCP.

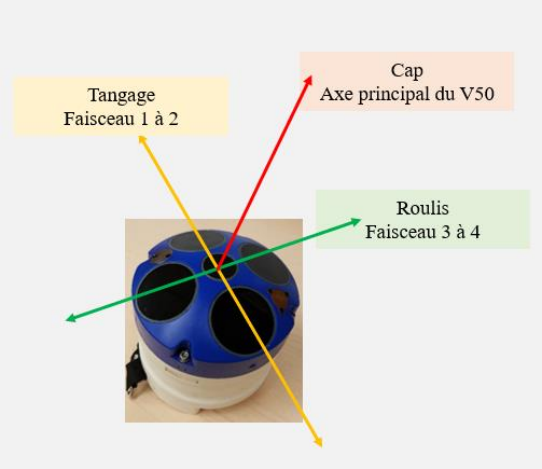


Figure 50 : Axes de l'ADCP

ANNEXE II : MISES EN PLAN DE LA STRUCTURE PORTANTE

Les Figure 51 et Figure 52 présentent les mises en plan de la structure portante utilisée dans le positionnement de l'ADCP dans le bassin.

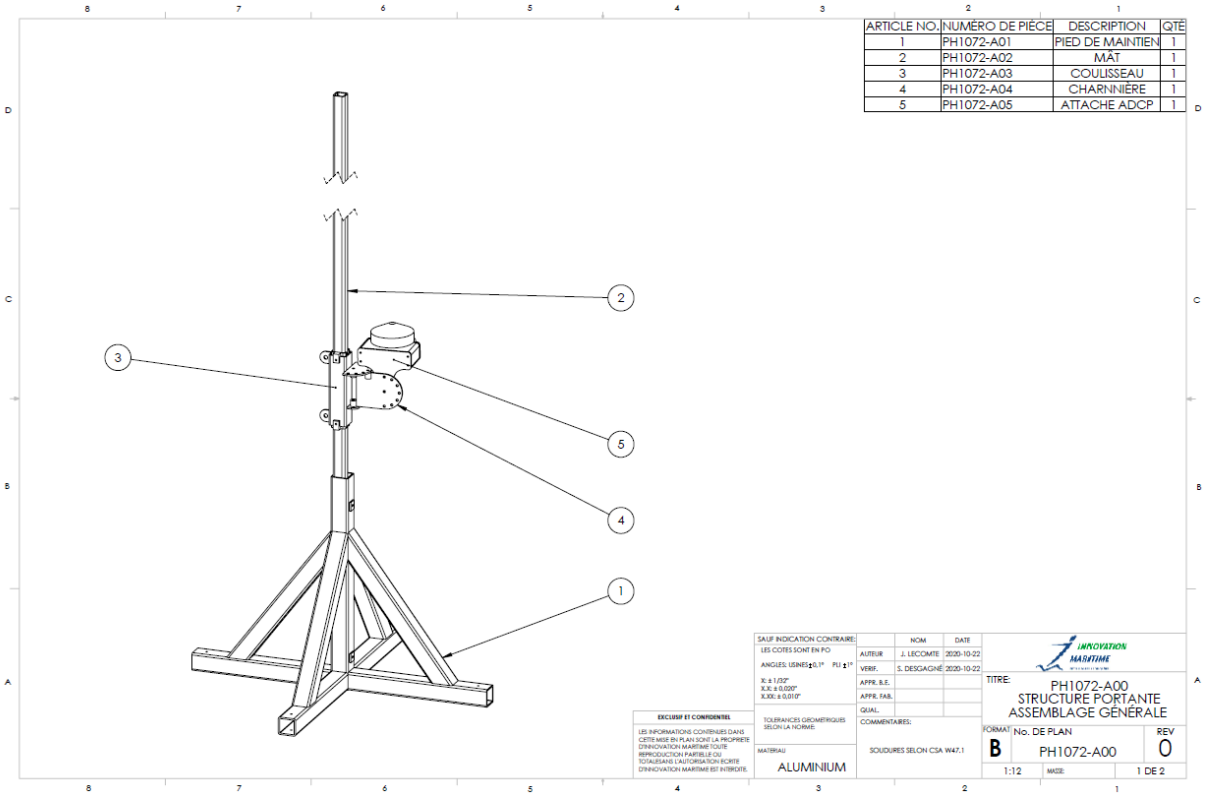


Figure 51 : Structure portante - Assemblage Général

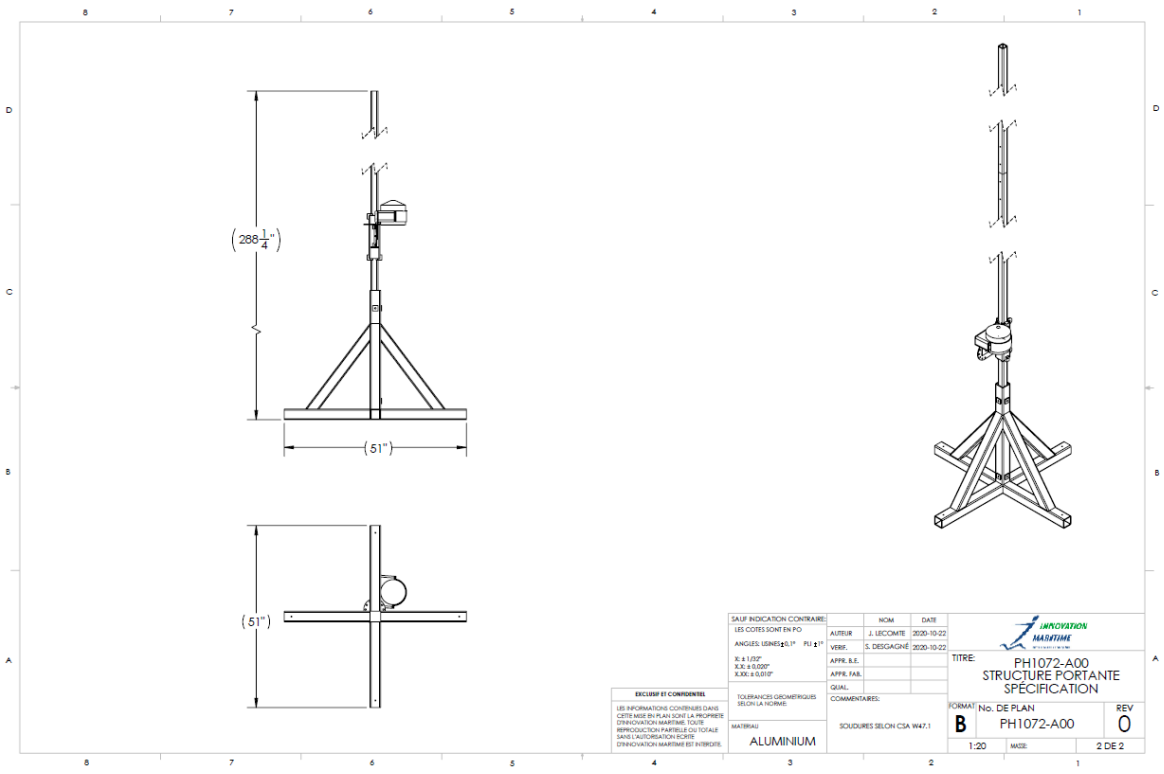


Figure 52 : Structure portante – Spécifications

ANNEXE III : MODÉLISATION D'UN DELTA P SUR SOLIDWORKS FLOWSIMULATION

Cette annexe détail la modélisation effectuée sur Solidworks Flowsimulation. Les résultats obtenus sont affichés et discutés dans le sous-chapitre 5.2.

Dans nos expériences, le fluide s'écoule dès l'ouverture de la vanne sous l'effet de son propre poids dû à la différence de hauteur d'eau. Nous avons donc réalisé une analyse en régime transitoire de type externe dans le bassin en tenant compte de la gravité.

Pour ce faire nous avons considéré la partie amont du bassin rempli d'un volume d'eau et la partie aval du bassin rempli d'air. En fonction du delta P utilisé, nous avons joué avec

la hauteur du volume d'eau permettant d'obtenir un différentiel de hauteur équivalent de 2,4 m conformément à celui obtenu dans nos expériences. La modélisation est illustrée dans la Figure 53 ci-dessous.

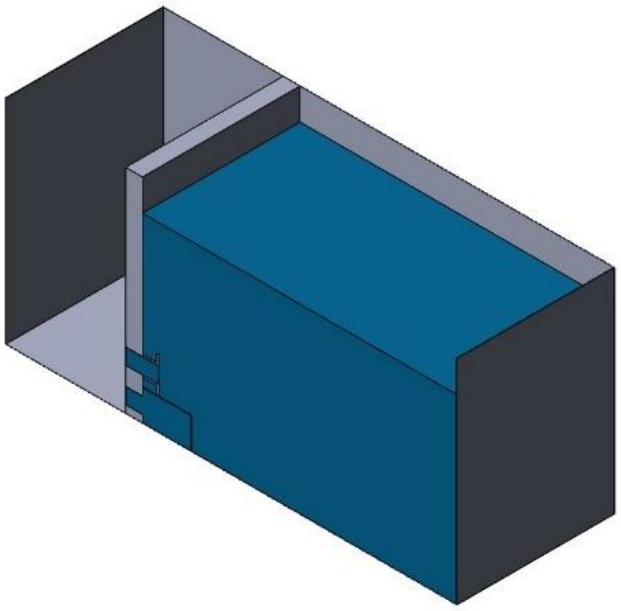


Figure 53 : Modélisation de la différence de hauteur d'eau de 2,4 m dans la zone amont du bassin (partie bleue) – la zone aval est vide et considérée remplie d'air ambiante

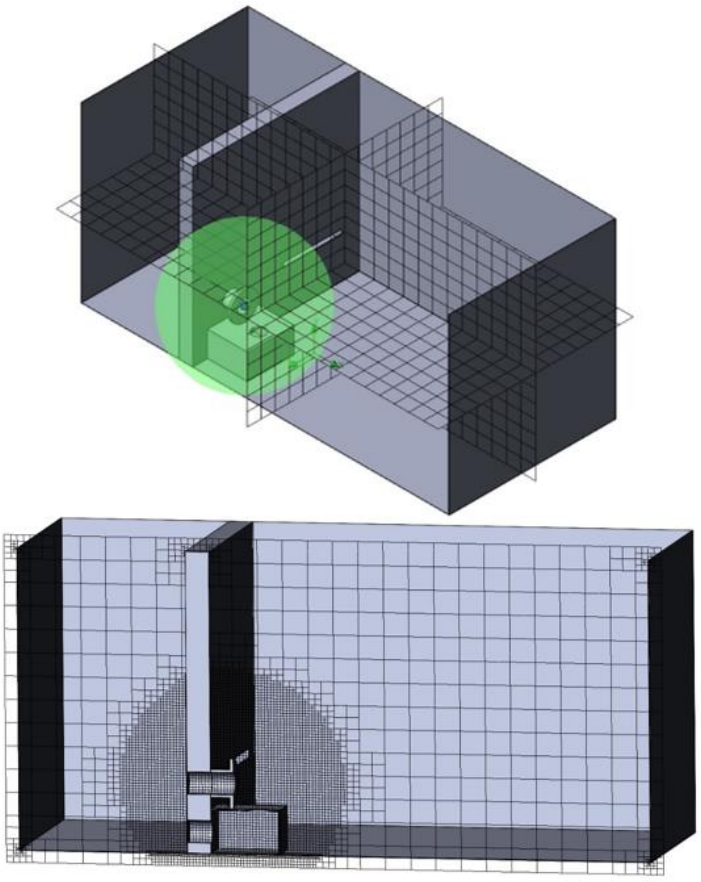
Le fluide est considéré comme Newtonien et incompressible. Le gaz est l'air ambiante. La pression atmosphérique est fixée à 101 325 Pa et la température ambiante est de 20 °C. La résolution est faite par la méthode des volumes finies en considérant un écoulement laminaire et turbulent. Le pas de temps utilisé est fixé à 0,05 s.

Nous savons que l'écoulement dû au delta P est très localisé et prend théoriquement la forme d'une demi-sphère proche de la parois (1.3.3). Afin d'améliorer la précision de la simulation et d'optimiser le temps de calcul, nous avons décidé d'effectuer un maillage local

raffiné sous la forme d'une sphère autour du delta P considéré. Le maillage ainsi obtenu est visualisable sur la Figure 54 ci-dessous.

(A)

(B)



(A) Vue isométrique du maillage, la sphère verte montre la zone où le maillage a été affiné
(B) Vue 2D du maillage obtenu

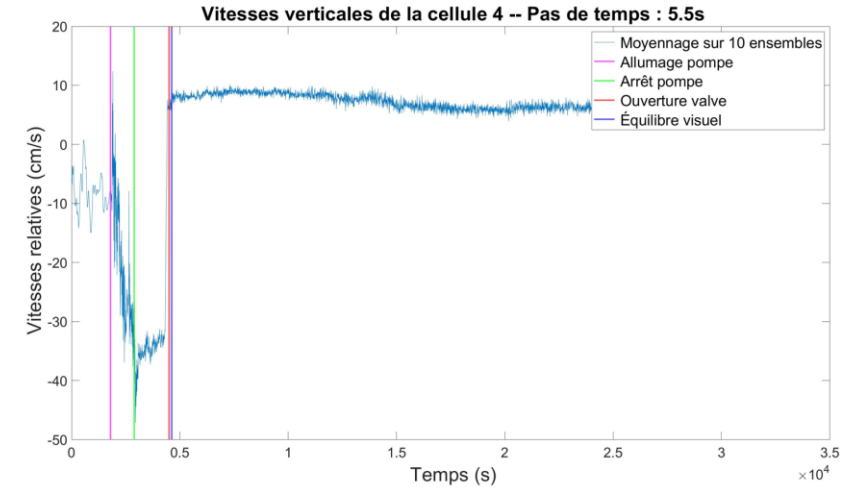
Figure 54 : Illustration du maillage utilisé pour le du delta P horizontal

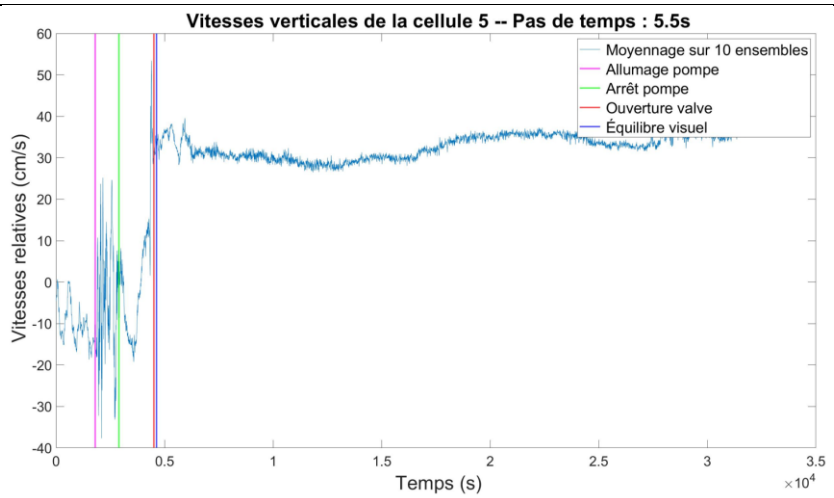
ANNEXE IV : COURBES COMPLÉMENTAIRES

Cette annexe présente des courbes complémentaires utiles à la discussion. L'Étude i présente la courbe de vitesse obtenue lors d'un essai sur 10 heures de temps dans le but d'observer l'évolution de la vitesse mesurée sur une très longue durée. L'Étude ii présente les courbes obtenues lors de l'allumage de la pompe quand l'ADCP est positionné face au module vertical. C'est la position utilisée dans les expériences I, III et IV.A. Enfin, l'Étude iii présente les courbes de vitesses obtenues dans le cas de la cellule 3 de l'expérience IV.A.

Étude i : Évolution des vitesses sur un essai de 10 heures

Tableau 20 : Résultats des vitesses au sein des cellules 4 et 5 sur l'essai de 10 heures

(i.1)	

I(.2)	

Les courbes du tableau ci-dessus présentent les résultats obtenus sur une prise de mesures sur 10 heures. Celle-ci a débuté après avoir laissé le bassin au repos une nuit complète. Ensuite nous avons activé le delta P en suivant le scénario de l'expérience I (3.5.1). Les droites verticales observables sur les courbes représentent les étapes suivantes :

- Allumage de la pompe (courbe magenta), la partie amont se remplit créant des remous et une mise en circulation du fluide

- Arrêt du système de pompage (courbe verte), le différentiel de hauteur d'eau est créé. Le bassin est laissé au repos 30 minutes.

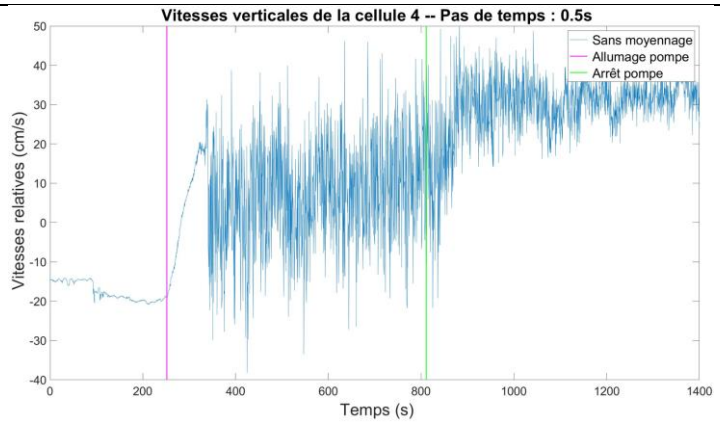
- Ouverture de la vanne (courbe rouge), la vanne est entièrement ouverte.

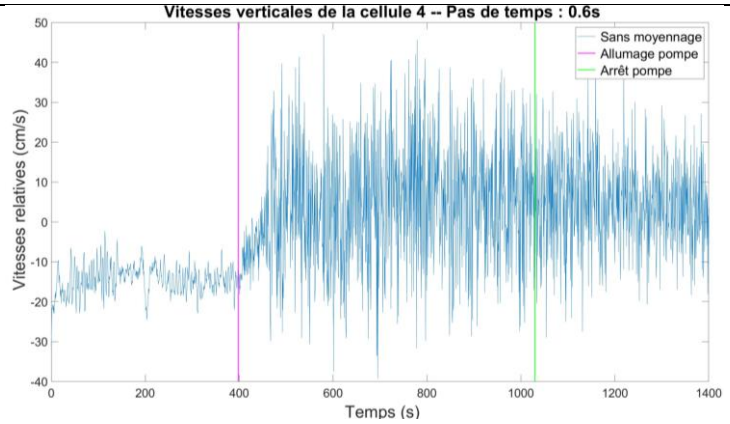
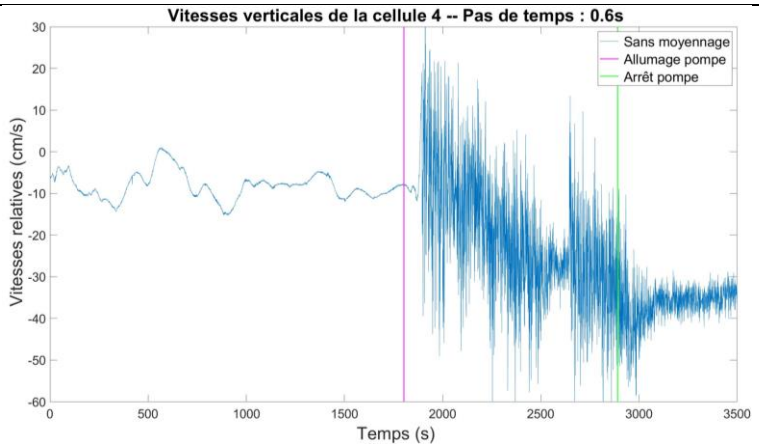
- Équilibre visuel (courbe bleue), les hauteurs d'eau de la partie amont et de la partie aval sont équilibrées. On laisse ensuite l'ADCP effectuer ses mesures pour le reste de la journée de manière à observer l'évolution de la vitesse durant la phase d'équilibre. De cette manière, nous étions certains qu'en fin de journée le fluide était bel et bien au repos.

Nous pouvons observer qu'après l'obtention de l'équilibre visuel les mesures n'ont pas évolué vers la vitesse nulle et sont restées oscillantes autour d'une valeur moyenne de 8 cm/s et 30 cm/s pour les cellules 4 et 5 respectivement.

Étude ii : Courbes des vitesses lors de l'allumage de la pompe

Tableau 21 : Évolution de la vitesse dans la cellule 4 lors de l'allumage des pompes

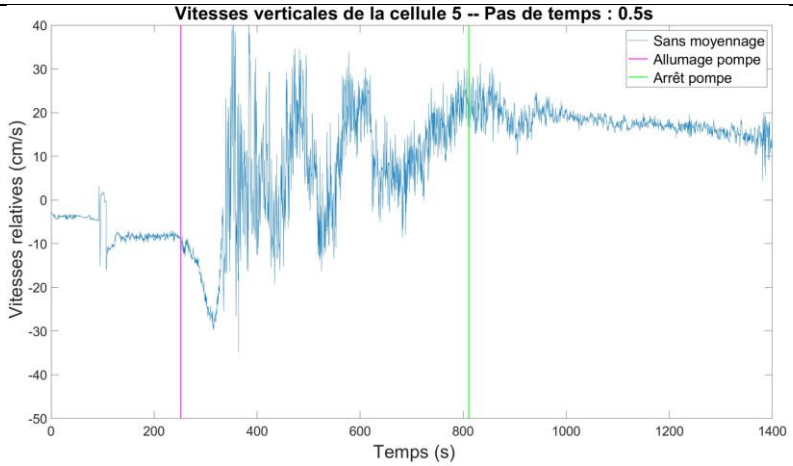
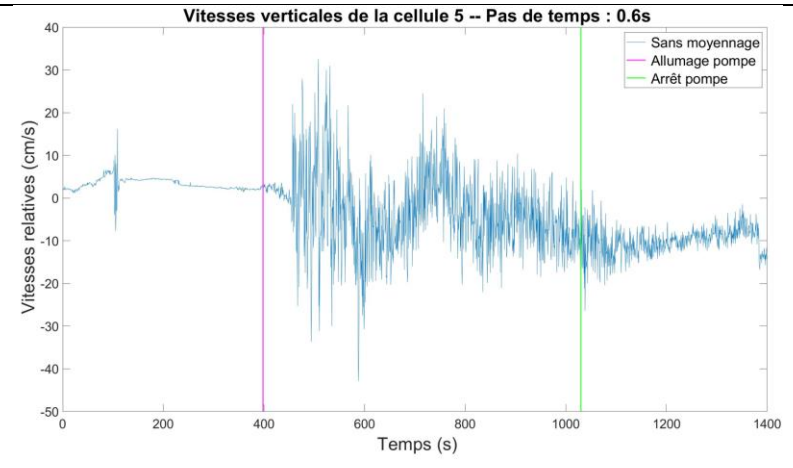
(ii.1) Essai 1	

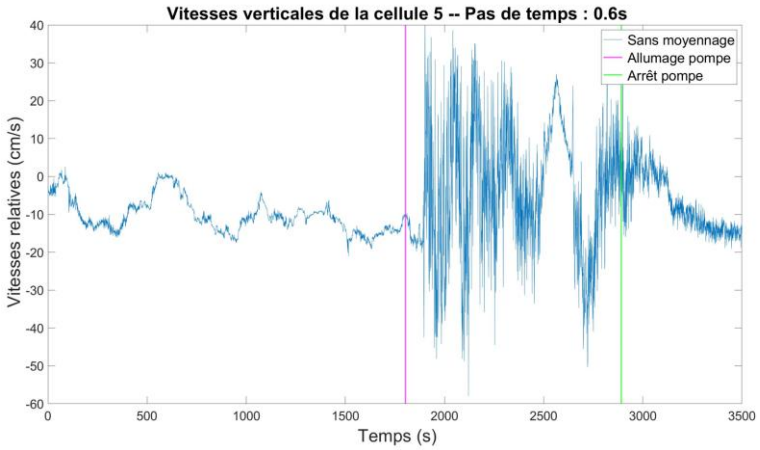
(ii.2)	
(ii. 3)	

L'ADCP était positionné face au module vertical (position utilisée dans les expériences I, III et IV.A). Dans la cellule 4, nous pouvons constater que le remplissage du bassin provoque une variation des mesures de vitesses obtenues. Avant le remplissage, les vitesses sont stables autour d'une certaine valeur, propre à chaque essai. Dès l'allumage du système de pompage, on remarque une tendance d'évolution de la vitesse moyenne. Dans l'essai 1 et 2, la vitesse moyenne augmente de manière linéaire. Dans l'essai 3, elle diminue de manière linéaire. Pendant le remplissage, on remarque également sur l'essai 1 et 2 que la vitesse s'est stabilisée après un certain temps, et que le phénomène d'évolution de la vitesse de manière linéaire s'est arrêté. Comme si la hauteur d'eau obtenue était suffisamment élevée pour ne plus contaminer la cellule 4.

Les résultats de la cellule 5 sont disponibles dans le Tableau 22. Dans la cellule 5, on remarque également que le remplissage de la partie amont provoque une évolution dans la mesure de vitesse obtenue. On remarque cette fois des oscillations de fortes amplitudes tout au long du remplissage. Une fois le remplissage arrêté, on voit dans l'essai 1 que la vitesse moyenne est plus élevée qu'avant le remplissage, dans l'essai 2 qu'elle plus faible et dans l'essai 3 qu'elle est à peu près du même ordre de grandeur. Il n'y a donc pas de tendance à relever dans ce cas-ci.

Tableau 22 : Évolution de la vitesse dans la cellule 5 lors de l'allumage des pompes

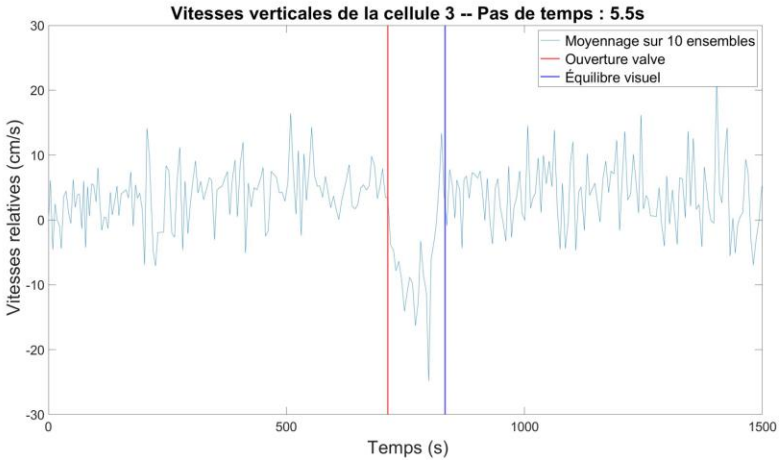
(ii.1) Essai 1	
(ii.2)	

(ii. 3)	

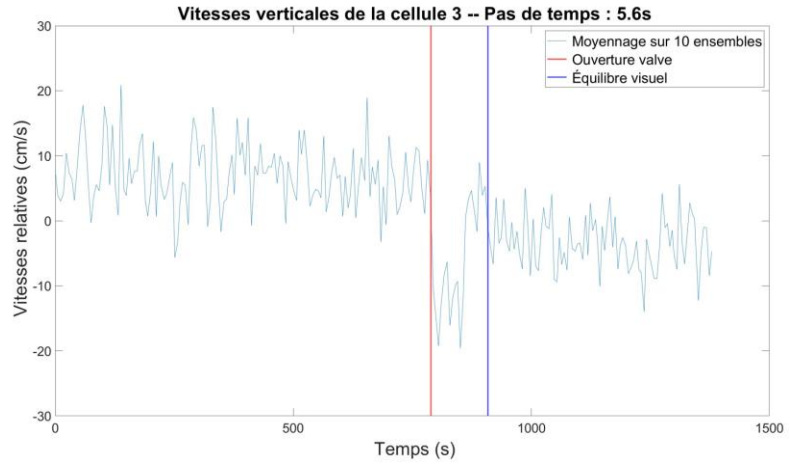
Étude iii : Courbes des vitesses de la cellule 3 – Expérience IV.A

Les courbes du Tableau 23 sont affichées avec un moyennage de 10 ensembles afin de diminuer l'effet des biais hasardeux et d'observer davantage la tendance.

Tableau 23 : Résultats de l'expérience IV – Delta P vertical - Cellule 3

(23.1)		M_AO **3,7** **cm/s** ET_AO **4,3** **cm/s** M_AE **3,5** **cm/s** ET_AE **5,2** **cm/s** Vmin : **-24,8** **cm/s** Vmax : **22,2** **cm/s**

(23.2)



M_AO	**6,9**	**cm/s**
ET_AO	**4,9**	**cm/s**
M_AE	**-3,4**	**cm/s**
ET_AE	**4,1**	**cm/s**
Vmin :	**-19,6**	**cm/s**
Vmax :	**20,9**	**cm/s**

Contrairement aux cellules 4 et 5, on peut ici observer une diminution rapide de la vitesse dès l'ouverture de la vanne. Ceci rend compte de l'écoulement engendré par le delta P et permet de détecter la zone associée. On remarque ensuite une augmentation de la vitesse puis une stabilisation dès l'équilibre visuel atteint.

En comparaison par rapport aux vitesses attendues d'après la simulation (5.2.2), on remarque que les vitesses sont ici généralement supérieures. Ceci peut provenir du phénomène de chevauchement lors du traitement des données. De même on remarque certains phénomènes causés par les émissions secondaires. Ceci peut provenir une nouvelle fois du chevauchement qui peut avoir sur la cellule 4, qui elle est biaisée.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Barré, P. (2010). Etude sur 1692 plongeurs mention A surveillés au centre médical subaquatique depuis 1991. *DOCPLAYER*, 12.

Bevan, J. (2011). *The professional diver's handbook*. Submex.

CCPC. (2021). Une carrières en plongée. Repéré à https://www.divercertification.com/fr/more-info/careers-in-diving/

Dantan, J.-Y., & Homri, L. (2018). *Probabilités et Statistiques*.

Desodt, C., & Horsin-Molinaro, H. (2016). Phénomènes de boulance et d'érosion régressive (renard hydraulique) dans les barrages. *EDUSCOL-STI*, 11.

Fisher, A. S., Gilbert, M. J., & Anthony, T. G. (2009). *Differential pressure hazards in diving*. Health and Safety Executive Repéré à https://www.hse.gov.uk/research/rrpdf/rr761.pdf.

Fortenbery, C., & Smith, P. (2014). Expanded Approach to Calculating the Effects of Differential Pressure (Delta P) on Working Divers. Dans A. o. D. C. International (Éd.). Association of Diving Contractors International. Repéré à https://videos.adc-int.org/expanded-approach-to-calculating-the-effects-of-differential-pressure-delta-p-on-working-divers?fbclid=IwAR1DOPh-ibNfmD4d8iaq7NdOOKV_v142rMh16uRK8BybzV_H62WKaDtvmoI

Foucart, T. (2000). Tests sur la Moyenne et la Variance. Repéré à http://foucart.thierry.free.fr/StatPC/resumes/chapitre_6_tests_sur_la_moyenne_et_la_variance.htm

Gaudet, M., & Lê, D.-K. (2002). *Rapport d'enquête d'accident mortel survenu à une scaphandrière le 30 novembre 2000 vers 12h05 au barrage de la Centrale Hull 2 d'Hydro-Québec à Hull*. (I502485). CNESST Repéré à https://www.csst.qc.ca/prevention/enquetes_rapports/Pages/rapports_enquete.aspx.

Gotvald, A. J., & Oberg, K. A. (2009). *Acoustic Doppler current profiler applications used in rivers and estuaries by the US Geological Survey* (n° 2008-3096). doi: https://doi.org/10.3133/fs20083096

Hermans, F. (2016). Etude et Analyse des Accidents Mortels Dans le Secteur de La Plongée Commerciale. *Academia.Edu*, 42.

Hermans, F. (2017). Les Deltas P en plongée Risques et Prévention. *Academia.Edu*, 88.

HSE. (2010). *Diving Health and Safety Strategy to 2010*. Repéré à https://www.hse.gov.uk/diving/divingstrat2010.pdf.

IMAR. (2004). *Définition des mesures d'injection d'air lors de sauvetage en plongée*. Innovation Maritime.

Kleitz, O. (2008). Accident de décompression. Dans *URGENCES*. Société Française de Médecine d'Urgence. Repéré à https://www.sfmu.org/upload/70_formation/02_eformation/02_congres/Urgences/urgences2008/donnees/pdf/054_kleitz.pdf

Le Coz, J., Larrarte, F., Saysset, G., Pierrefeu, G., Brochot, J.-F., & Marchand, P. (2009). Mesures hydrologiques par profileur à effet Doppler (aDcp) en France: application aux cours d'eau et aux réseaux urbains. *La Houille Blanche,* (3), 115-122. doi: https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00547581/en/

Levée, V. (2019). L'eau comme milieu de travail. *Prévention au Travail*. Repéré à https://www.preventionautravail.com/reportages/766-l-eau-comme-milieu-de-travail.html

Mitchell, J., Banks, B., Bolger, R., Donovan, B., Elsey, D., Geddes, D., . . . White, S. (2011). Guideline for diving operations on dams and other worksites where DELTA-P hazards may exist. *Canadian Association of Diving Contractors*, 32. Repéré à http://www.cadc.ca/downloads/DeltaPHazards_CADC.pdf

Mueller, D. S., Wagner, C. R., Rehmel, M. S., Oberg, K. A., & Rainville, F. (2013). *Measuring discharge with acoustic Doppler current profilers from a moving boat*. US Department of the Interior, US Geological Survey Reston, Virginia (EUA). Repéré à https://dx.doi.org/10.3133/tm3A22

Muste, M., Kim, W., & Fulford, J. M. (2008). Techniques hydrométriques: perfectionnement des instruments pour la cartographie hydrodynamique des cours d'eau. *Bulletin de l'OMM, 57*(3), 163. Repéré à https://public.wmo.int/fr/bulletin/techniques-hydrom%C3%A9triques-perfectionnement-des-instruments-pour-la-cartographie

NIOSH. (2020). Commercial Diving. Repéré à https://www.cdc.gov/niosh/maritime/industries/commercial_diving.html

Nortek. (2018). *The Comprehensive Manual for ADCP's*. Repéré à https://www.nortekgroup.com/assets/software/N3015-031-ComprehensiveManual_ADCP_1118.pdf

Nortek. (2019). *Catalogue des produits*. Repéré à https://www.nortekgroup.com/assets/documents/Nortek_Productcatalogue_2018-2019_FR_web.pdf

Ruch, J.-J. (2012). *Statistique : tests d'hypotheses*. doi: https://www.math.u-bordeaux.fr/~mchabano/Agreg/ProbaAgreg1213-COURS3-Stat2.pdf

Savard, C. (2004). *Accident Mortel Survenu le 1er juin 2004 lors de travaux de plongée à la mini-centrale Chute-Blanche à Ste-Jeanne-d'Arc au lac-St-Jean* (EN003481). Repéré à https://www.centredoc.cnesst.gouv.qc.ca/.

Simpson, M. R. (2001). *Discharge measurements using a broad-band acoustic Doppler current profiler*. US Department of the Interior, US Geological Survey Reston. Repéré à https://pubs.usgs.gov/of/2001/ofr0101/text.pdf

SonTek. (2017). Acoustic Doppler Velocimeters Ultra-Precise-3-D Velocity Measurement.

TeledyneRDI. (2011). Acoustic Doppler current profiler principles of operation: A practical primer *Teledyne RD Instruments*.

TeledyneRDI. (2012). Sentinel V Operation Manual.

TeledyneRDI. (2017). Sentinel V. doi: http://www.teledynemarine.com/sentinel-v-adcp

Watkins, J. C. (2019). An introduction to the science of statistics: From theory to implementation. *Preliminary Edition*. Repéré à https://www.math.arizona.edu/~jwatkins/statbook.pdf