

Rapport de stage Clémence Brochard

4^{ème} année

***Elaboration d'un protocole d'étude des
courants de densité par traitement optique.***

CNR
2, rue André Bonin 69004 Lyon
CESAME (Centre d'Essais, de Surveillance,
d'Analyse et de Mesure pour l'Exploitation)



Tuteur entreprise :
Hanna Haddad
Ingénieur en hydraulique et transport sédimentaire

Clémence Brochard
IMA
2024-2025

Tuteur académique :
Stéphane Rodrigues

Table des matières :

Introduction.....	4
1. Présentation de l'organisme d'accueil.....	4
1.1. Présentation CNR.....	4
1.2. Présentation CESAME :.....	4
2. Contexte de l'étude.....	5
2.1. Etude d'optimisation des écluses du Panama :.....	5
2.2. Modèle physique du CESAME :.....	6
3. Etude des courants de densité.....	6
3.1. Présentation courant de densité :.....	6
3.2. Objectifs du stage :.....	6
1. Instrumentation du banc d'essai.....	8
1.1. Objectifs.....	8
1.2. Sondes de salinité.....	8
1.2.1. Etalonnage des sondes.....	8
1.2.2. Positionnement des sondes.....	8
1.2.3. Temps de réponse et précision.....	10
1.3. Capteurs optiques et logiciel d'acquisition.....	10
1.3.1. Vérification de la distance des capteurs optiques.....	11
1.3.2. Paramétrage des caméras.....	11
1.4. ADCP.....	13
1.4.1. Paramétrage de l'ADCP.....	14
1.4.2. Estimation de vitesse des courants de densité.....	14
1.5. Conclusion de la partie.....	15
2. Préparation des solutions salées pour l'étude des courants de densité.....	15
2.1. Notions et objectifs.....	15
2.2. Protocoles expérimentaux.....	16
2.2.1. Vérification de la compensation thermique.....	16
2.2.2. Influence de l'humidité du sel.....	17
2.2.3. Courbe expérimentale Salinité/Masse volumique.....	18
2.3. Conclusion de la partie.....	19
3. Acquisition et traitement photo des courants de densité.....	19
3.3. Objectifs.....	19
3.4. Conditions extérieures.....	20
3.5. Post-traitement.....	21
3.6. Méthode de calibration de la salinité à partir des photos.....	21
3.7. Paramètres de calibration.....	24

3.8.	Conclusion de la partie.....	24
4.	Conclusion.....	25
5.	Bibliographie.....	25
6.	Table des figures.....	25
	Annexes.....	27

Introduction

1. Présentation de l'organisme d'accueil

1.1. Présentation CNR

La Compagnie Nationale du Rhône (CNR) est le concessionnaire du Rhône pour la production d'hydroélectricité, le transport fluvial, les usages agricoles et, plus largement, pour le développement des énergies renouvelables. Premier producteur français d'énergie exclusivement renouvelable, CNR est également un aménageur des territoires.

Créée en 1933, CNR s'est vu confier dès 1934 la concession du Rhône, aujourd'hui renouvelée jusqu'en 2041, avec pour mission d'aménager et de valoriser le fleuve selon trois fonctions :

- La production d'électricité,
- La navigation,
- L'irrigation des terres agricoles.

Pour ce faire, CNR a conçu et construit 19 centrales hydroélectriques, 19 barrages et 14 écluses, et a aménagé plus de 330km de voie navigable entre Lyon et la Méditerranée.

CNR est une société anonyme d'intérêt général, un modèle d'entreprise à capital équilibré entre public et privé. L'actionnariat est majoritairement public (50,03 %) avec le Groupe Caisse des Dépôts (33,2 %) et les collectivités locales (16,83 %). La part du privé est couverte par le groupe Engie, acteur mondial de l'énergie, à hauteur de 49,97 %. (*CNR. Carte d'identité*)

1.2. Présentation CESAME :

Le CESAME (Centre d'Essais, de Surveillance, d'Analyses et de Mesures pour l'Exploitation) est une entité de la CNR spécialisée dans la maîtrise des risques hydrauliques. Il regroupe deux laboratoires et environ 100 experts répartis selon plusieurs spécialités :

- Hydrométrie
- Modélisation hydraulique
- Mesures hydrauliques de performance
- Mesures de surveillance génie civil
- Ingénierie des matériaux
- Contrôle et surveillance des ouvrages hydrauliques
- Gestion sédimentaire

Parmi ses missions : la conception de modèles physiques réduits pour l'étude hydraulique, le contrôle d'ouvrages du Rhône, ou encore la participation à des projets internationaux.

Son activité se répartit selon sept axes structurants :

- Concevoir des projets hydrauliques complexes à l'aide de modèles réduits physiques
- Mesurer les débits et les apports en sédiments
- Surveiller les évolutions morphologiques du Rhône et de ses affluents
- Gérer la dynamique sédimentaire du fleuve et des retenues
- Évaluer la qualité et le vieillissement des matériaux de structures
- Contrôler le comportement des ouvrages hydrauliques
- Innover au service des projets, de l'exploitation et de la sûreté

(CNR. Le CESAME, centre d'expertise en modélisation physique et ouvrages hydrauliques)

2. Contexte de l'étude

2.1. Etude d'optimisation des écluses du Panama :

L'étude s'inscrit dans un projet confié à CNR par l'Autorité du Canal De Panama (ACP) et porte sur les écluses historiques mises en service il y a plus de 110ans. L'objectif principal est de modéliser le fonctionnement actuel et d'intégrer ça dans des outils numériques, qui à leur tour vont permettre de faire un état des lieux sur le fonctionnement actuel des écluses centenaires. Dans un deuxième temps, ces outils permettront de voir si des optimisations éventuelles sont possibles. Une étude qui s'inscrit dans la continuité des missions effectuées par CNR pour l'ACP depuis plus de 20 ans, en effet CNR avait déjà conçu en partie les nouvelles écluses du Canal de Panama entre 2002 et 2008.

Pour rappel le canal du Panama situé en Amérique centrale, reliant l'océan Pacifique et l'océan Atlantique, représente un passage de plus de 80 km à travers le lac Alajuela. Sa construction en 1914 a permis de réduire les distances et le temps de transit en évitant aux navires de fret un long détour jusqu'au cap Horn, c'est pourquoi il représente un passage essentiel pour le trafic maritime mondial. *(WIKIPEDIA. Canal de Panama)*

Cette étude sera réalisée par un consortium franco-belge emmené par CNR Ingénierie, avec le bureau d'ingénierie IMDC (International Marine & Dredging Consultant), le centre d'expertise FHR (Flanders Hydraulics Research) ainsi que l'Université de Ghent.

Les investigations à réaliser comportent deux phases :

- Évaluer les conditions actuelles de transit des bateaux dans les écluses historiques,
- Étudier et proposer des axes d'amélioration au gestionnaire afin d'optimiser le passage des bateaux le long de cet axe maritime majeur pour le commerce international.

Le projet nécessite de combiner une grande variété de modèles hydrauliques qu'ils soient numériques ou physiques. Ces simulations seront également complétées par des mesures réalisées sur site et permettront de collecter des données pour le développement d'un simulateur de navigation. À terme, ce simulateur sera utilisé par les pilotes du canal afin de tester de nouvelles manœuvres d'approche. *(OPTIMAL Consortium. OPTIMIZATION OF PANAMA CANAL MIRAFLORES LOCKS)*

2.2. Modèle physique du CESAME :

L'un de ces modèles est un modèle physique en cours de construction dans le laboratoire d'essais hydrauliques du CESAME. (*Annexe 1*) Ce modèle physique est une représentation au 1/30^{ème} de l'écluse de Miraflores, qui est l'une des écluses centenaires du canal. Ce modèle de 50m de long sur 1m de large permettra de caractériser différents phénomènes, tels que :

La mesures des performances hydrauliques du système de remplissages/vidanges (R/V) en se concentrant sur :

- La mesures des débits et vitesses dans les aqueducs et larrons du système de R/V pour différents scénarios
- La détermination des pertes de charge pour différents composants du système
- L'étalonnage des modèles CFD 1/30 et 1D qui permettront d'obtenir des débits unitaires par chaque larron du système R/V

Les forces exercées sur le bateau (efforts sur les navires) en se concentrant sur :

- Les forces hydrodynamiques longitudinales et transversales subies par le navire
- Les pentes d'eau longitudinales et transversales dans les chambres

3. Etude des courants de densité

3.1. Présentation courant de densité :

Le stage se situe dans le contexte de l'étude des phénomènes lors du transit incluant l'ensemble de échanges d'eau. Parmi ces mouvements d'eau, les courants de densité peuvent être à l'origine de courants parasites à la navigation, d'efforts additionnels sur les amarres et coques. Ces mouvements horizontaux de masses d'eau sont générés par une différence de masse volumique et application des forces de gravité. Dans le cadre du Canal de Panama, les courants de densité sont engendrés par la rencontre de l'eau salée (plus dense) des océans avec l'eau douce (moins dense) du lac au sein des écluses.

Les mouvements d'eau lors du remplissage induisent des forces dans les 3 directions de l'espace. La quantification de ces efforts sont indispensables pour l'exploitation et la maintenance des différences systèmes d'assistance au transit (tension des câbles d'amarrage sur locomotives et remorqueurs notamment). Dans le cas des écluses centenaires de Panama, les études USACE de 1910 ne permettent pas d'accéder à ces valeurs.

3.2. Objectifs du stage :

L'objectif du stage est de développer une méthodologie expérimentale complète pour capturer et analyser les effets des courants de densité sur le modèle physique.

Plusieurs aspects de l'étude seront donc abordés tels que la réalisation en laboratoire d'un mélange d'eau salée à une certaine concentration, l'instrumentalisation du modèle ou encore la méthodologie de visualisation par image des courants de densité.

Les essais seront réalisés sur un banc d'essai de 190 cm × 50 cm × 60 cm (*figure 1*). Ce banc d'essai est équipé d'un batardeau pour séparer les différents types de solutions (type eau douce/eau salée) et d'une paroi transparente pour les essais de visualisation photo.

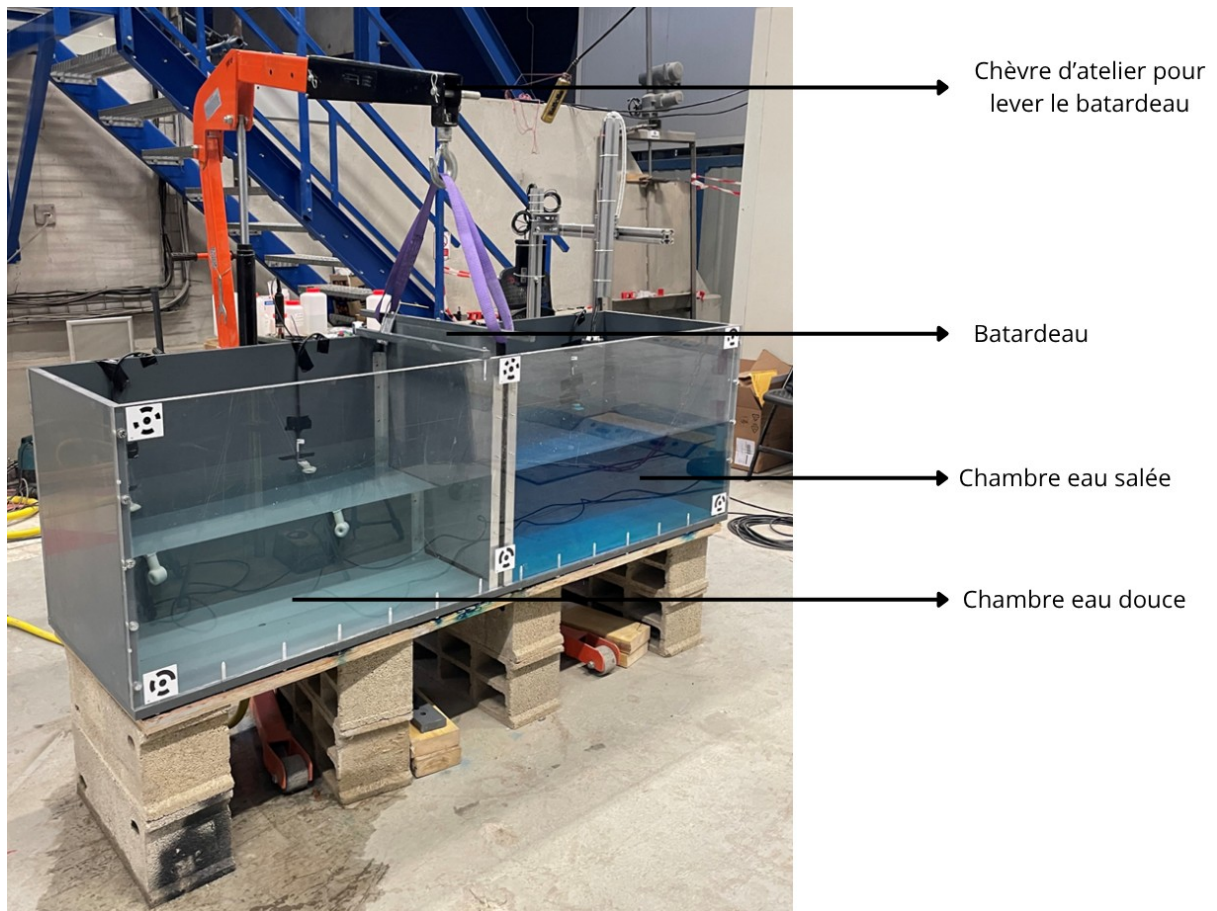


Figure 1 : Photo du banc d'essai

1. Instrumentation du banc d'essai

1.1. Objectifs

Cette phase de mon stage a eu pour but l'instrumentation du banc d'essai afin de mesurer la salinité avec précision, tout en synchronisant ces données avec un système d'acquisition photo et de mesure de vitesse de courant. Les essais visaient à comprendre le comportement des sondes HACH dans différentes conditions de température, salinité et configuration, et à analyser leur réactivité face aux courants de densité.

1.2. Sondes de salinité

Sondes 3700sc HACH :

Les sondes 3700sc de HACH sont des capteurs de conductivité inductive hautement performants. Elles couvrent une large plage de mesure allant de 200 à 2000000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ce qui permet de contrôler aussi bien des eaux ultrapures que des solutions très concentrées. (HACH. Sondes numériques de conductivité inductive 3700)



Figure 2 : Sondes 3700sc HACH

Transmetteur SC4500 HACH :

Le SC4500 est un transmetteur nouvelle génération pour instruments de mesure multi paramètres HACH. Il permet de connecter et de gérer plusieurs sondes numériques, dont les capteurs 3700sc, et permet une acquisition précise et une communication avec les systèmes de supervision. (HACH. Transmetteur SC4500)



Figure 3 : Transmetteur SC4500 HACH

1.2.1. Etalonnage des sondes

L'étalonnage est l'action de vérifier l'exactitude des indications d'un instrument de mesure en le comparant avec un étalon. Cette procédure doit être précise car conditionne toutes les mesures qui suivront. L'étalonnage se fait ici avec des solutions étalons à 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$ du fournisseur HANNA instruments.

La procédure précise de l'étalonnage est décrite en *Annexe 2*.

1.2.2. Positionnement des sondes

L'utilisation des sondes se fait normalement en vissant les sondes dans une paroi, cependant pour cette étude les sondes seront plongées dans l'eau et collées à la paroi car lorsque le bateau sera dans le modèle il n'y aura pas l'espace suffisant pour les visser perpendiculairement à la paroi. L'objectif ici est donc de tester ces positions afin de vérifier qu'elles n'aient pas d'impact sur les mesures.

Hypothèses : Il est supposé que la position des sondes dans le bassin, en contact avec les parois, influence la mesure de la salinité.

Conditions d'essai : Pour cela, quatre sondes ont été immergées dans une solution saline à 30 g/kg initialement portée à 34 °C. Les sondes 1 et 3 ont été positionnées au centre du bac, sans contact avec les parois, tandis que les sondes 2 et 4 ont été placées au fond, en contact avec le fond du bac et une paroi latérale. La salinité mesurée par chaque sonde a été suivie au cours du refroidissement progressif de la solution.

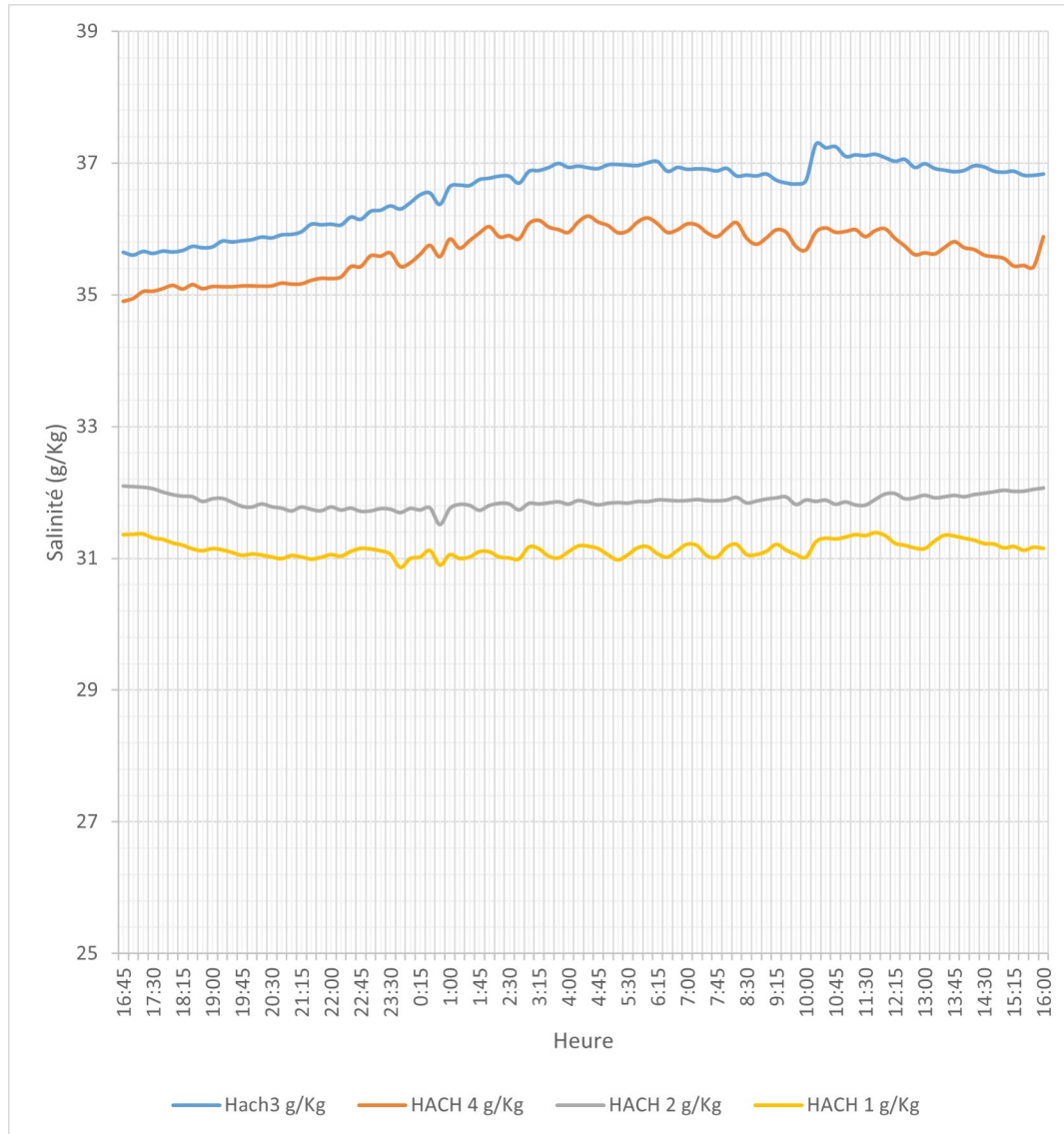


Figure 4 : Graphique du suivi en salinité de la solution en fonction de la température avec différentes positions des sondes.

Conclusion : L'analyse des courbes de salinité en fonction de la température montre que la sonde 4 présente une plus grande instabilité dans ses mesures, ce qui s'explique par de légers déplacements de sa position au cours de l'essai. Ces variations indiquent que le contact avec les parois peut perturber la mesure, notamment si la position de la sonde n'est pas parfaitement fixe. En revanche, les sondes centrées (1 et 3) offrent des mesures plus stables et cohérentes, servant ainsi de référence.



Figure 6 : Position modifiant les mesures de salinité



Figure 5 : Position ne modifiant pas les mesures de salinité

Il est donc possible d'en déduire que la proximité des parois, ainsi que la stabilité du positionnement, influencent la précision des mesures. Pour garantir la fiabilité des données lors des essais réels, il sera nécessaire de s'assurer que les sondes fixées contre les parois soient rigoureusement immobiles et bien positionnées, ou de privilégier des emplacements éloignés des parois lorsque cela est possible.

1.2.3. Temps de réponse et précision

L'objectif ici est d'obtenir des informations sur la précision d'acquisition des données des sondes de salinité.

Un premier test a été effectué pour quantifier le temps de réponse des sondes, pour ce faire des mesures chronométrées ont été fait. Ce test révèle un temps de réaction d'en moyenne 6 secondes pour chaque sonde. Ce temps de décalage est problématique et est à prendre en compte lors des acquisitions car significatif par rapport aux vitesses de courants.

Pour ce qui est de la fréquence d'acquisition, les sondes renvoient une valeur de salinité toutes les 6 secondes en moyenne. Après vérification auprès du service client de la société HACH, la fréquence de sortie de données est bien déjà au maximum. Les valeurs sont moyennées sur 6 secondes puis sorties.

1.3. Capteurs optiques et logiciel d'acquisition

BASLER A2a2840 – 14gcBAS :

La BASLER A2a2840-14gcBAS est une caméra industrielle numérique haute performance de la série Ace 2 Pro de Basler. Elle est conçue pour des applications exigeante en laboratoire où la précision est primordiale.

Pour les essais sur bancs 2 caméras sont disponibles, 6 sont prévus ultérieurement pour les essais sur le modèle physique.



Figure 7 : BASLER A2a2840 – 14gcBAS

Logiciel d'acquisition, StreamPix 10 :

StreamPix 10 est un logiciel professionnel de capture et de gestion d'images et de vidéos développé par NorPix. Il est spécialement conçu pour piloter plusieurs caméras et gérer une acquisition synchronisée en environnement scientifique ou industrielle.

1.3.1. Vérification de la distance des capteurs optiques

La position optimale des capteurs optiques sur le banc est de les placer à 150cm chacun face à une chambre, ainsi le champ couvert par un capteur est de 150cm X 150cm, ce qui permet de visualiser tout le banc avec le plus de précision possible.

Ces capteurs ne permettent pas de zoomer il faut donc les positionner le plus proche possible.

1.3.2. Paramétrage des caméras

Le réglage des caméras peut être effectué sur Pylon ou sur StreamPix. Pour régler les caméras correctement il faut suivre un ordre précis des réglages pour que le résultat soit optimal.

- **Synchronisation des caméras :**

Le premier objectif ici est de réaliser une acquisition synchronisée entre les deux caméras. Pour cela plusieurs options existent :

- Synchronisation sur StreamPix : Utiliser une option sur le logiciel StreamPix qui permet de lancer les deux acquisitions en même temps en déclarant une des deux caméras comme étant la caméra maître et l'autre la caméras esclave, ainsi lorsqu'une caméra reçoit une action la secondes reçoit la même. L'inconvénient de cette technique est le fait de créer un décalage d'environ 100ms.
- Synchronisation Hardware avec câblage
- Synchronisation PtP : Plusieurs appareils sont automatiquement synchronisés avec l'horloge la plus précise du réseau, appelée horloge maître. (Soit avec 2 cartes soit avec un switch)

Pour les acquisitions à 2 caméras la synchronisation sur logiciel est suffisante et le décalage n'est pas significatif. Il sera cependant essentiel de vérifier que le décalage n'augmente pas trop lors de l'utilisation de 6 caméras sur le modèle physique.

- **Réglage de l'image :**

Le logiciel StreamPix permet d'effectuer des réglages sur les caméras et sur leur acquisition. Ces réglages sont déterminants pour la suite et doivent être effectués dans un ordre particulier pour obtenir la meilleure qualité de photo possible.

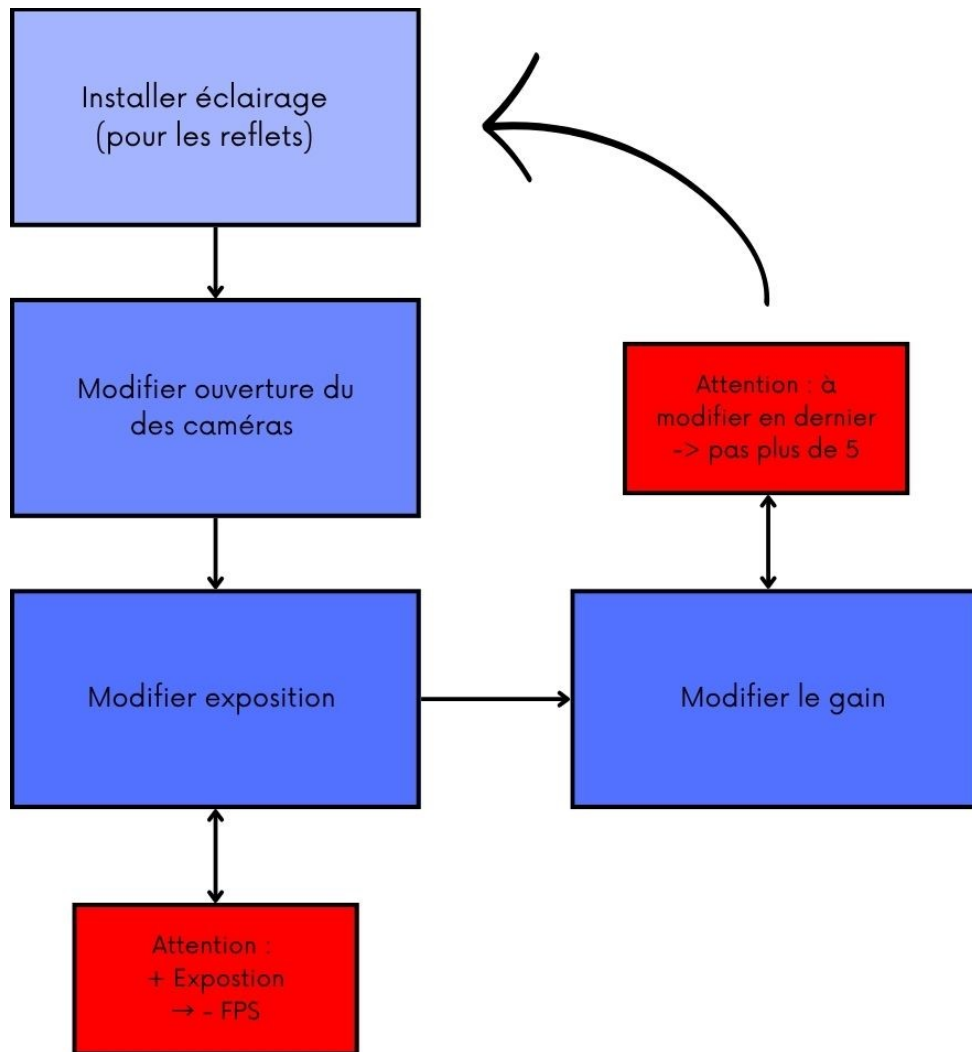


Figure 8 : Logigramme de l'ordre des réglages des capteurs optiques

Le premier paramètre à fixer est l'éclairage extérieur dans un premier objectif d'élimination des reflets et d'obtenir un éclairage homogène.

Le second réglage concerne l'ouverture des caméras qui s'adaptera à l'éclairage extérieur afin d'obtenir une photo avec une exposition convenable.

Si cela ne suffit pas il est possible de modifier l'exposition dans le logiciel, cependant il faut être vigilant à la fréquence d'acquisition qui dépend de cette exposition. En effet plus le temps d'exposition augmente, plus la fréquence d'acquisition diminue. Par exemple, avec un temps d'exposition de 100 ms, la fréquence maximale ne pourra pas dépasser 10 fps (puisque $\text{fps} \times \text{temps d'exposition} = 10 \times 100 \text{ ms} = 1 \text{ seconde}$).

En dernier recours il est possible d'ajouter du gain à l'image, le moins possible sera le mieux, le gain engendre du bruit sur l'image qui dégrade la qualité des photos.

Pour les tests les valeurs retenues sont :

- Ouverture des capteurs optique : 2.4
- Exposition : 40000
- FPS (Frame per Second) : 5
- Gain : 0

- **Fréquence d'acquisition :**

Un dernier paramètre important à considérer est le nombre d'images par seconde (fps : frames per second). Les caméras peuvent atteindre jusqu'à 14 fps, mais uniquement dans certains formats de pixel : en 8bits. En revanche, en mode YCbCr422\8 en 16 bits, la cadence maximale tombe à environ 7 fps. L'utilisation d'un mode RGB débayerisé directement dans la caméra fait chuter la vitesse à 4 fps. (BASLER. Basler Product Documentation).

Les caméras proposent des modes BayerRG X, qui permettent de réaliser la débayerisations côté PC via le logiciel Pylon. Ce traitement libère la caméra et permet d'atteindre des vitesses d'acquisition plus élevées. Cependant ces modes renvoient une photo en noir et blanc.

Bien que le mode de post traitement (noir et blanc ou couleur) ne soit pas encore déterminé, il est essentiel de pouvoir, dans un premier temps, extraire des images en couleur. Une acquisition à 5 fps soit toutes les 0,2s semble adaptée pour cette étude (Annexe 3). Les acquisitions se feront donc avec le format d'image « YCbCr422\8 ».

Comme dit précédemment il faut veiller au réglage du temp d'exposition qui a aussi un impact sur la fréquence d'acquisition.

- **Format des images :**

Des tests ont été réalisés pour comparer les valeurs d'intensité obtenue selon différents formats de photos (JPEG, TIFF et PNG). Ces tests ont montré que les mesures d'intensité sont globalement les mêmes, les différences sont de 0.005 maximum, ce qui n'est pas significatif pour le traitement. Le format JPEG, plus léger, sera donc privilégié pour les acquisitions.

1.4. ADCP

L'ADCP est un capteur courantomètres acoustiques à effet doppler, il mesure les champs de vitesse. L'objectif autour de l'ADCP lors de ce stage est de valider une procédure qui permet d'obtenir des vitesses de courants de densité afin de compléter les données obtenue grâce à l'analyse vidéo.

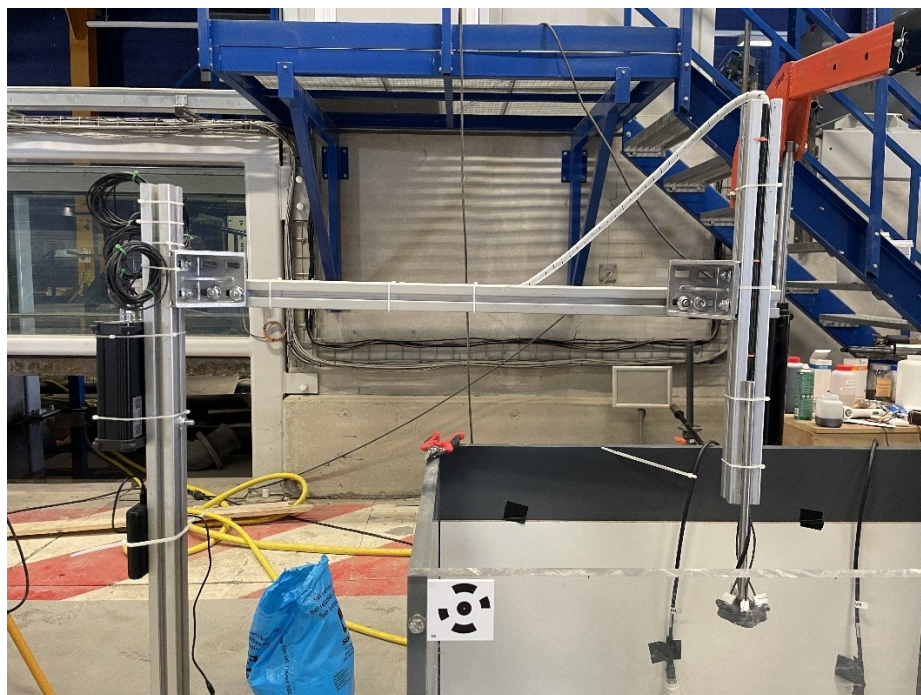


Figure 9 : Photo de l'ADCP monté sur le banc d'essai

Dans le cadre de cette étude, c'est le sel présent dans le courant de densité qui permet aux ondes d'être réfléchies.

L'utilisation d'un moulinet hydrométrique a été envisagée pour réaliser des premières mesures de vitesse de courant. Cependant ces mesures n'ont pas abouti car le moulinet à capteurs électriques/magnétiques ne peut fonctionner dans de l'eau salée. En effet l'eau salée étant conductrice, elle provoque des perturbations électromagnétiques, les mesures ne sont donc pas bien détectées ou incohérentes.

1.4.1. Paramétrage de l'ADCP

L'objectif des tests avec l'ADCP est de réaliser une première approche afin de savoir comment ajuster le paramétrage pour l'adapter par la suite sur le modèle réduit. Les tests ont montré que la procédure est une bonne base, bien que la fréquence de répétition pourrait être adaptée. Pour le moment, la meilleure fréquence de répétition utilisée est de 800 (figure 10).

1.4.2. Estimation de vitesse des courants de densité

Cependant de premières estimations de vitesses de courants de l'ADCP peuvent être comparées avec les estimations de vitesses par acquisition.

La vitesse de propagation du courant de densité dépend en partie de l'ouverture du batardeau, il faut donc comparer les vitesses sur un même essai pouvoir avoir les mêmes conditions d'ouverture.

- Estimation avec ADCP :

Un test est donc réalisé sur le banc d'essai avec l'ADCP placé au-dessus de la chambre d'eau douce afin d'estimer la vitesse du courant de densité.

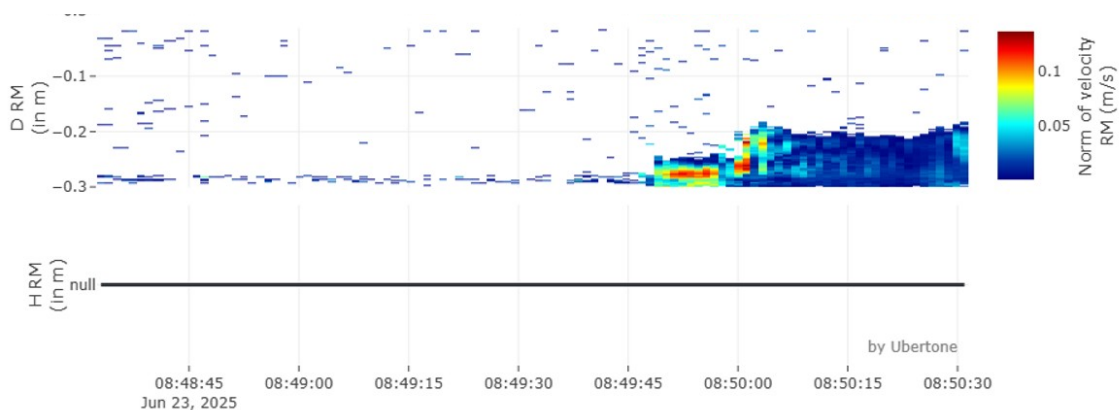


Figure 10 : Profil des vitesses des courants d'eau salée obtenue grâce à l'ADCP.

L'ouverture se fait vers 8:49:50, la première vague de courant de densité juste après ouverture du batardeau se distingue très clairement. Par lecture visuelle il est possible d'estimer la vitesse du courant à ce moment à environ 0.1m/s soit 10cm/s.

- Estimation avec les acquisitions photos :

Deux repères sont notés sur le banc et sont espacés de 50cm. (Annexe 4)

Le courant de densité juste après ouverture du batardeau atteint le premier courant à 16:33:28,165 et au deuxième repère à : 16:33:33,565. Il fait donc 50cm en 5,401s.

L'estimation de la vitesse du courant de densité par acquisition photo est de 9,26cm/s.

Ces deux estimations sont cohérentes, l'ADCP renvoie donc des valeurs correctes du même ordre de grandeur.

1.5. Conclusion de la partie

Les différents tests d'instrumentation ont permis de valider les outils et les méthodes nécessaires à la caractérisation des courants de densité sur le banc d'essai. Les sondes HACH 3700sc se sont montrées fiables avec une précision satisfaisante, l'erreur maximale observée restant inférieure à $\pm 0,5$ PSU dans les conditions expérimentales. Le temps de réponse moyen est de 6 secondes par sonde, ce qui est à prendre en compte au vu de la vitesse de propagation des courants. La fréquence d'acquisition maximale des sondes étant d'environ 6 secondes, cela limite le suivi de variations très rapides, mais reste suffisant pour les dynamiques observées. Il a été démontré que la position des sondes joue un rôle essentiel : tout contact avec les parois ou déplacement pendant les essais peut fausser les mesures.

Les capteurs optiques BASLER installées à 1,5 m du banc offrent un bon champ de vision. Une fréquence de 5 fps avec le format YCbCr422_8 (16 bits) a été retenue comme compromis optimal. La synchronisation via logiciel StreamPix est suffisante à deux caméras (décalage ~ 100 ms), mais une synchronisation matérielle ou PtP est envisagée pour une configuration à six caméras. Le format JPEG est privilégié pour les acquisitions.

Enfin, les premiers tests avec l'ADCP montrent que la procédure de paramétrage fonctionne bien et donne des résultats cohérents avec les vitesses estimées par traitement d'image.

En conclusion, cette première étape a permis de valider la faisabilité d'acquisitions synchronisées, de maîtriser les paramètres d'instrumentation et de confirmer la pertinence des outils choisis pour les essais futurs.

2. Préparation des solutions salées pour l'étude des courants de densité

2.1. Notions et objectifs

Avant de décrire les essais réalisés sur le banc, il est nécessaire de clarifier certains termes en relation avec les courants de densité et leur mesure.

- **Salinité** : La salinité est la quantité de sel dissout par kilo d'eau. Elle s'exprime en g/kg, g/L, ppt (Part Per Thousand ou $^{\circ}/^{\circ}$) ou PSU (Practical Salinity Unit). Cette grandeur ne varie pas en fonction de la température.

- **Masse Volumique** : Appelée *density* en anglais, à ne pas confondre avec la densité. La masse volumique est une grandeur physique qui définit la masse d'un matériau par unité de volume. Elle s'exprime en kg/m³ ou g/L, et dépend de la température.

- **Densité** : Appelée *specific gravity* en anglais. La densité dans ce cas est le rapport entre le poids d'un volume d'eau salée sur le poids du même volume d'eau pure. Cette grandeur est adimensionnelle (sans unité) et dépend de la température.

- **Conductivité** : La conductivité est le rapport entre le courant et la tension pour une distance donnée, et s'exprime en mS/cm. La conductivité dépend de la température et de la salinité.

L'objectif pour cette première partie est de réaliser une solution salée avec une masse volumique cible. Pour obtenir cette masse volumique, c'est la salinité qui fera office de variable.

Pour pouvoir mesurer la salinité, les sondes utilisées mesurent la conductivité de la solution avant de donner la salinité. L'objectif de cette partie est donc de réaliser une solution salée à masse volumique cible en faisant varier la salinité, tout en prenant en compte l'impact de la température de l'eau sur les mesures. Cet objectif est accompagné de la vérification de divers paramètres (humidité du sel, position

des sondes, compensation thermique des sondes, etc.), il faudra par la suite établir une courbe de référence entre la salinité, la masse volumique et la température pour guider les futurs essais.

2.2. Protocoles expérimentaux

2.2.1. Vérification de la compensation thermique

Comme expliqué précédemment, la conductivité dépend de la température, or les sondes HACH utilisées pour mesurer la salinité sont des sondes de conductivité. Il est donc possible de rentrer une loi de compensation thermique en $\%/^{\circ}\text{C}$ dans les sondes de salinités afin d'obtenir en sortie des mesures de salinités qui ne varient pas selon la température. La compensation est en général de 2 $\%/^{\circ}\text{C}$.

Lors de l'étalonnage (Annexe 2) des sondes, une « compensation de la solution étalon » est à rentrer dans le transmetteur. La solution étalon utilisée est une solution HANNA à 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et la compensation est à 1,84 $\%/^{\circ}\text{C}$. Cependant une deuxième compensation thermique peut être rentrée dans les paramétrages de la sonde.

Hypothèses : La compensation thermique est à rentrer qu'une seule fois dans le transmetteur et une compensation à 1,84 $\%/^{\circ}\text{C}$ est correcte.

Conditions d'essai : Réalisation d'une solution à 32 g/kg de sel et comparaison des lectures avec et sans compensation sur les sondes HACH. Les 4 sondes ont été étalonnées avec une compensation à 1,84 $\%/^{\circ}\text{C}$ et 2 d'entre elles (HACH 3 et 4) ont une compensation dans leurs paramètres à 2 $\%/^{\circ}\text{C}$. L'objectif est de suivre l'évolution de la salinité sur 24 h avec les variations de température de la solution induites par les variations de température entre la nuit et la journée.

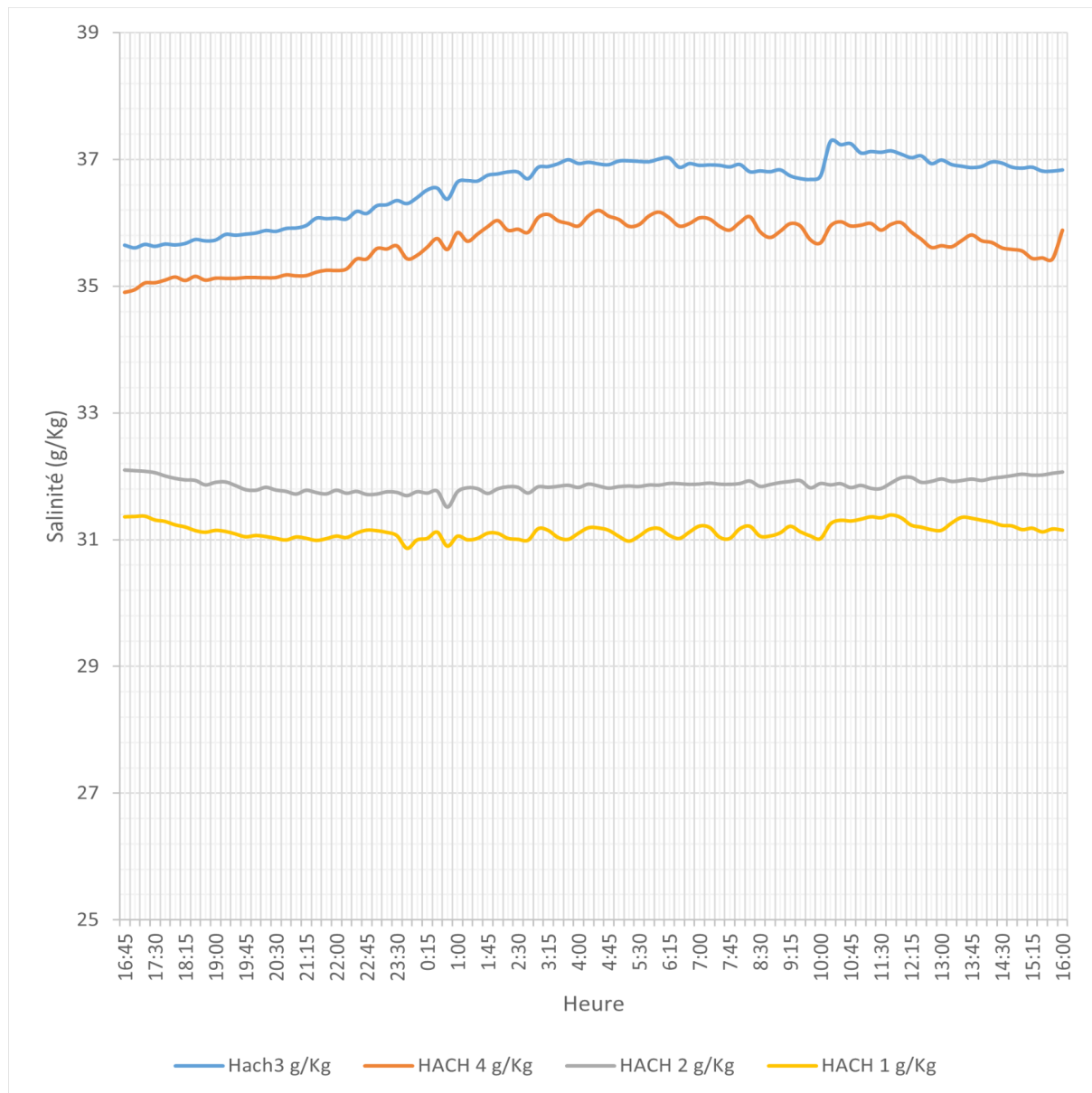


Figure 11 : Graphique du suivi en salinité pendant 24h d'une solution à 32g/kg avec plusieurs valeurs de compensation de la température.

Conclusions : Les sondes HACH 1 et 2 fournissent des valeurs plus stables et correctes d'environ 32 g/kg ce qui correspond à la salinité théorique de la solution. La loi de compensation correspondant à celle de la solution étalon HANNA à 1,84%/°C est donc satisfaisante. Cette seule loi rentrée lors de l'étalonnage suffit à compenser la température. Rajouter une loi telle que pour les sondes 3 et 4 dans leur configuration est inutile car s'additionne à la première.

2.2.2. Influence de l'humidité du sel

La quantité de sel versée est mesuré par sa masse direct, cependant si le taux d'humidité dans le sel est trop élevé, il peut y avoir une différence entre la masse versée et la masse réelle de sel.

Hypothèse : L'humidité présente dans le sel solide impact sa masse et doit donc être mesuré pour obtenir la masse de sel voulue.

Conditions d'essai : Une masse de sel de 500 g a été placée dans une étuve à 50 °C pendant 48 h. On pèse ensuite la masse de sel après le passage dans l'étuve.

Conclusion : Aucune variation de poids n'a été observée, ce qui confirme que l'humidité contenue dans les sacs de sel est négligeable juste après l'ouverture du sac de sel. Pour les tests sur le modèle physique le sel sera versé par sacs entiers, il est donc inutile de pousser les tests.

2.2.3. Courbe expérimentale Salinité/Masse volumique.

L'objectif est d'obtenir une loi entre la salinité et la masse volumique en fonction de la température afin de connaître les quantités de sels à ajouter pour obtenir une masse volumique cible. Dans un premier temps il faudra vérifier si la référence actuelle (*Gill. 1982*) est valide avec les solutions utilisées et le densimètre disponible. Puis, si elles ne correspondent pas, créer une nouvelle loi Salinité/Masse volumique.

- **Vérification de la référence :**

Hypothèse : Un abaque de référence théorique existe (*Gill. 1982*) et doit être vérifié dans les conditions expérimentales et avec l'instrumentation disponible.

Conditions d'essai : Plusieurs tests ont été réalisés à plusieurs températures différentes : Des solutions ont été réalisées dans un volume d'eau mesuré, en ajoutant des masses connues de sel (4 g/kg) pour obtenir des salinités de 0 à 32 g/kg. À chaque étape, les valeurs suivantes ont été relevées :

- température (thermomètre),
- salinité (sondes HACH),
- masse volumique (densimètre).

Conclusion :

Le densimètre présente un tube qui permet l'absorption de la solution, l'utilisation d'un tube plus petit permet de limiter la modification de la température. Le temps de remplissage du densimètre est passé en mode lent pour préciser la mesure.

Une comparaison des masses volumiques mesurées avec les valeurs théoriques issues de la loi de Gill montre des écarts faibles, Ces différences augmentent légèrement avec la salinité, mais restent toujours $< 2 \text{ kg/m}^3$.

Les résultats ne correspondant pas à la référence, il faut maintenant réaliser une nouvelle loi à l'aide de l'instrumentation disponible.

- **Création d'une nouvelle loi :**

La création d'un nouvel abaque étant nécessaire celui-ci est réalisé uniquement sur la base de mesures. Plusieurs solutions de salinité différentes sont réalisées à plusieurs températures différentes, les mesures de masse volumique sont réalisées directement à l'aide du densimètre.

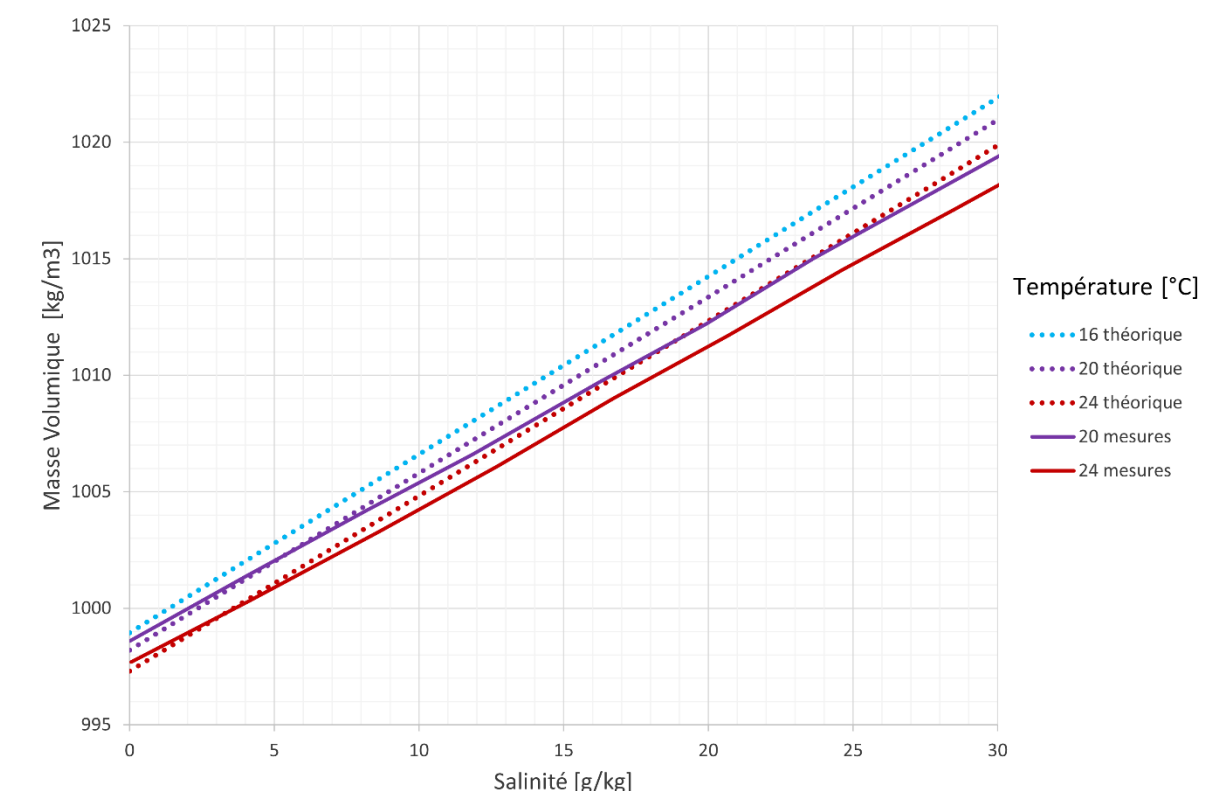


Figure 12 : Graphique de comparaison entre les valeurs théoriques de Gill et les mesures.

- **Variation de masse volumique avec température :** Pour une salinité donnée (ex. 16 g/kg), une variation de température de 24°C à 16°C entraîne une variation de densité de $\sim 2,2 \text{ kg/m}^3$. À l'échelle d'une variation diurne ($\sim 2\text{--}3^\circ\text{C}$), l'impact sur la densité est inférieur à 1 kg/m^3 .
- **Erreur en cas de mauvaise homogénéisation :** Si la salinité cible est mal respectée, en cas de mauvaise homogénéisation par exemple, de $\pm 10 \%$, cela peut entraîner une erreur de densité d'environ $\pm 1,5 \text{ kg/m}^3$ maximum.

2.3. Conclusion de la partie

Les essais réalisés autour de la préparation des solutions salées ont permis de garantir une maîtrise satisfaisante des paramètres influençant la masse volumique et la salinité. Une attention particulière a été portée à la compensation thermique des sondes HACH, qui doivent être configurées avec une correction de $1,84 \text{ }^\circ\text{C}$. Les tests sur l'humidité du sel ont montré qu'elle est négligeable immédiatement après l'ouverture des sacs, ce qui évite tout séchage préalable. Une nouvelle courbe expérimentale reliant la salinité à la masse volumique en fonction de la température a été développée, en remplacement de la loi de Gill, légèrement imprécise dans les conditions de l'étude. Cette nouvelle loi, fondée sur des mesures réelles, permet un ajustement précis des quantités de sel nécessaires pour atteindre les densités cibles.

Globalement, la méthodologie établie permet d'obtenir des solutions stables, homogènes et parfaitement adaptées aux essais sur les courants de densité. La courbe obtenue constitue désormais la référence pour les essais futurs.

3. Acquisition et traitement photo des courants de densité

3.3. Objectifs

Cette phase du projet a pour objectif de mettre en place un protocole d'acquisition d'images permettant de visualiser et quantifier les courants de densité soit estimer la salinité en tout point. Pour ce faire, un colorant est introduit et joue le rôle d'un traceur passif qui permet de différencier l'eau douce de l'eau salée. L'objectif à terme est donc de pouvoir faire le lien entre concentration en colorant qui sera évaluée visuellement par traitement optique et salinité.

Cette idée de méthodologie de traitement optique est inspirée de l'étude de Nogueira et al qui a élaboré une technique d'analyse d'image utilisée pour estimer le champ de densité instantané en deux dimensions des courants de gravité non stationnaires produits par le relâchement complet en profondeur de l'eau salée.

3.4. Post-traitement

Un post-traitement des images est mis en œuvre pour permettre l'analyse des courants de densité. Celui-ci repose sur l'extraction d'une intensité de gris normalisée entre 0 et 1, calculée en moyennant les valeurs des pixels dans une zone définie. Ce traitement est réalisé sous Python et permet de faire le lien entre l'intensité optique et la concentration en colorant, puis, indirectement, avec la salinité de la solution.

3.5. Conditions extérieures

La qualité des images est un paramètre essentiel pour la bonne visualisation des courants de densité. Les premiers tests ont été réalisés dans les conditions d'éclairage existantes, sans ajustement spécifique (*Figure 13*).

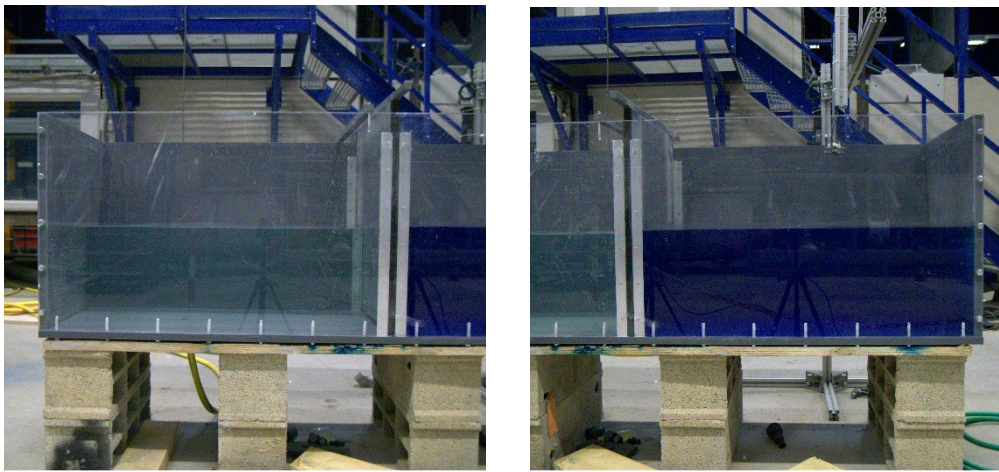


Figure 13 : Photos du banc sans mesures d'ajustement pour limiter les reflets.

Cette configuration de base présentait de nombreux reflets sur la paroi et un éclairage peu homogène, rendant difficile le traitement des photos.

Pour remédier à cela, un système d'éclairage spécifique a été mis en place : un éclairage lanterne boule en papier puissante a été installée pour fournir une lumière diffuse sur l'ensemble du banc d'essai, et un fond noir a été ajouté derrière les caméras afin de supprimer les reflets sur la paroi transparente.

Cette configuration a permis d'éviter l'usage de lentilles polarisantes. Cet éclairage a été gardé pour la totalité des tests.

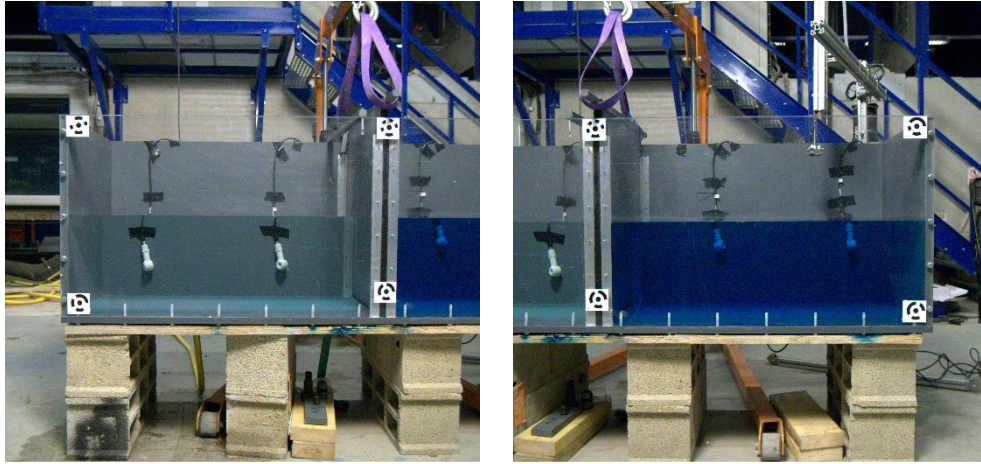


Figure 14 : Photos du banc avec éclairage et fond noir derrière les caméras.

Un éclairage par spot positionné au-dessus de la chambre a aussi été testé. Il est intéressant de comparer l'homogénéité de l'intensité des pixels par traitement optique dans une chambre :

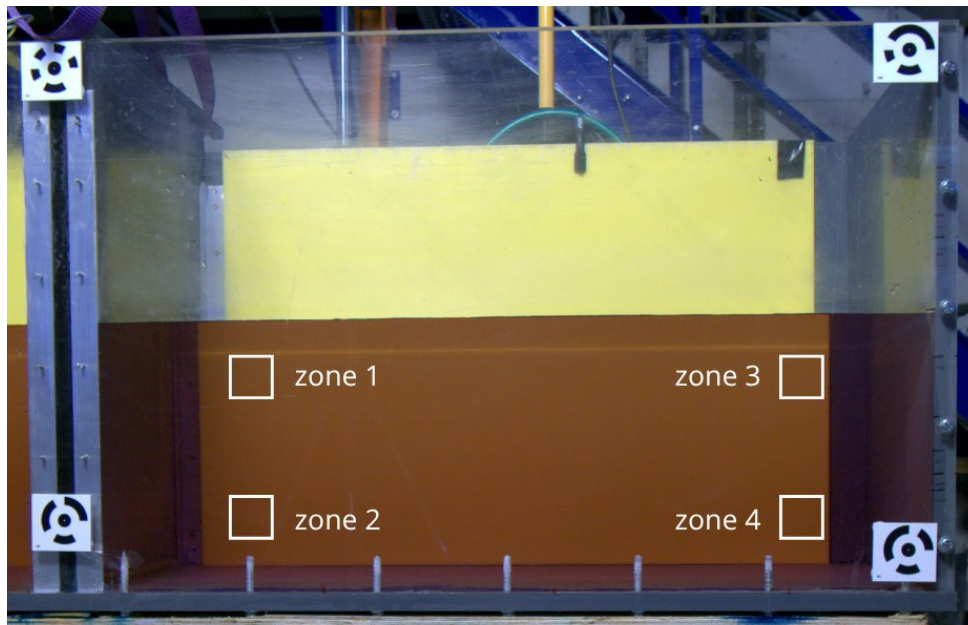


Figure 15 : Zones post-traitées pour comparer l'homogénéité de l'intensité des pixels (éclairage avec lanterne).

- Les résultats du post-traitement montrent qu'un écart significatif est présent selon la zone de traitement. Pour l'éclairage par lanterne l'écart d'intensité peut atteindre 0.073 (ici entre la zone 2 et 3), ce qui est à prendre en compte.

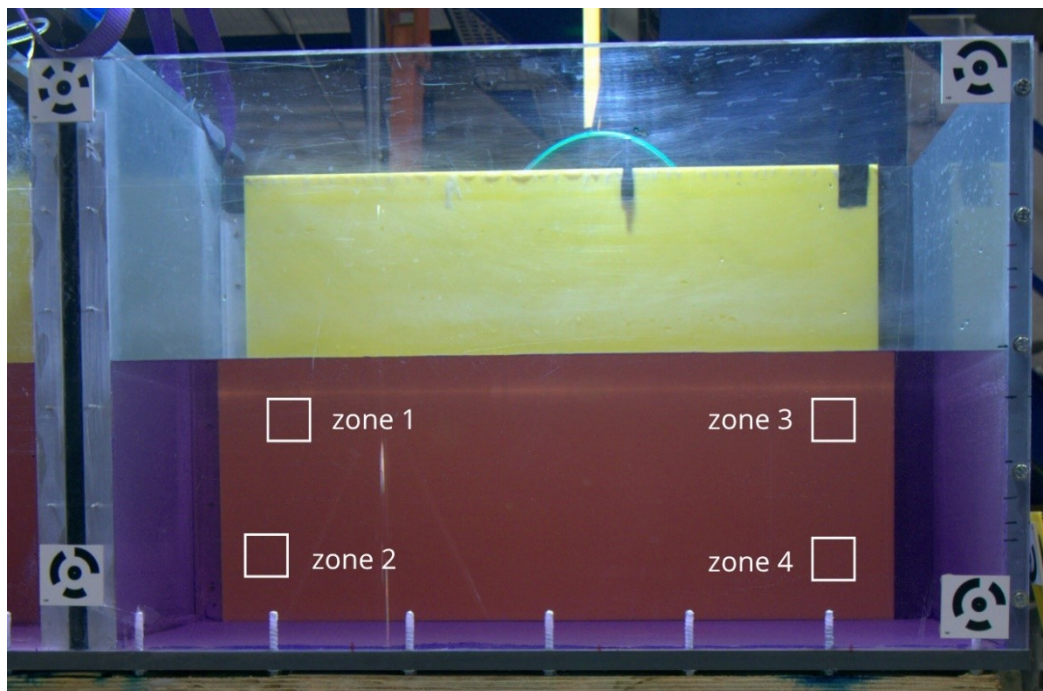


Figure 16 : Zones post-traitées pour comparer l'homogénéité de l'intensité des pixels (éclairage spot).

- En ce qui concerne les résultats de l'éclairage avec un spot lumineux placé au-dessus de la chambre l'écart maximal est de 0.047 (entre zone 2 et 3). Les résultats semblent donc privilégier l'utilisation de spot lumineux en ce qui concerne l'homogénéité de l'éclairage.

Photos	Intensité zone 1	Intensité zone 2	Intensité zone 3	Intensité zone 4
Spot	0.250088784	0.210831462	0.257359121	0.222911323
Lanterne	0.319077211	0.248500537	0.321491703	0.267682632

Tableau 1 : Synthèse des valeurs obtenues pour chaque zone

3.6. Paramètres de calibration

L'objectif de cette partie est donc de chercher les conditions optimales qui offrent le meilleur contraste est donc un meilleur traitement optique. Les premiers paramètres à définir sont : le colorant utilisé et la couleur du fond.

- **Colorant :**

Pour ce qui est du choix du colorant, deux colorants ont été testés : le bleu de méthylène et le permanganate de potassium. Le colorant testé en premier est le bleu de méthylène en raison de sa forte concentration et de sa simple utilisation (en effet le permanganate est soumis à plus de réglementation de sécurité concernant son utilisation).

- **Couleur du fond :**

Deux couleurs de fond ont été testé pour optimiser la visibilité du colorant :

- Le fond gris du PVC, couleur initiale du fond du banc d'essai.
- Le blanc, car paraît à première vue le plus adéquat pour un bon contraste.
- Le jaune, couleur de la coque du bateau qui sera utilisé dans le modèle.

- Un fond jaune placé à 3cm de la paroi transparente afin de comparer les lois de calibration sur différentes profondeurs car le bateau sera proche de la paroi lors des essais sur modèle réduit.

3.7. Méthode de calibration de la salinité à partir des photos

Objectif : Établir une relation fiable entre la concentration en colorant et l'intensité des pixels mesurée sur photo, en fonction de la salinité de l'eau. Ce calibrage permettra de traduire l'information colorimétrique en salinité locale, lors des essais de visualisation de densité.

Conditions d'essai : Cette méthodologie est ici illustrée des résultats obtenus avec le bleu de méthylène et avec plusieurs fonds de couleurs cependant elle a aussi été appliquée avec du permanganate, résultats en annexes. Pour simplifier la mise en place des essais, l'unité de la salinité est ici passé en g/L.

3.7.1. Détermination de la concentration maximale de colorant (étalonnage saturation) :

Objectif : Il s'agit ici d'identifier la concentration maximale en colorant au-delà de laquelle toute augmentation supplémentaire n'entraîne plus de variation mesurable de l'intensité sur photo. Cette concentration limite sera alors associée à la concentration maximale en sel.

Procédure :

- Ajout progressif de colorant, avec prise de photo à chaque étape
- Analyse de l'intensité de gris des pixels selon le fond (jaune et blanc). Cette intensité de pixel est extraite en faisant la moyenne de l'intensité des pixels sur une zone donnée.
- Recherche du niveau de "saturation" de colorant. Calcul de la plage d'intensité couverte théoriquement et de la sensibilité entre 25 g/L et 30 g/L de sel (zone critique)

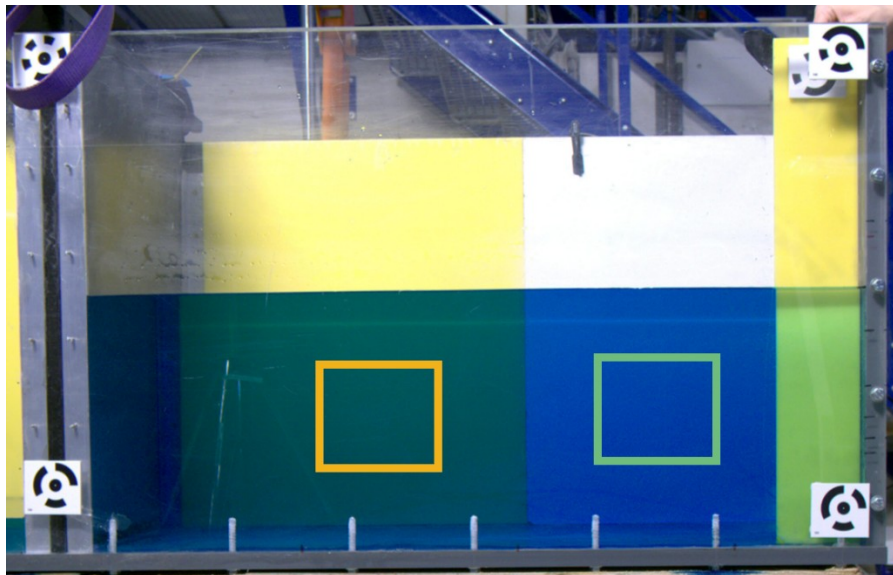


Figure 17 : Zones de post-traitement selon les fonds

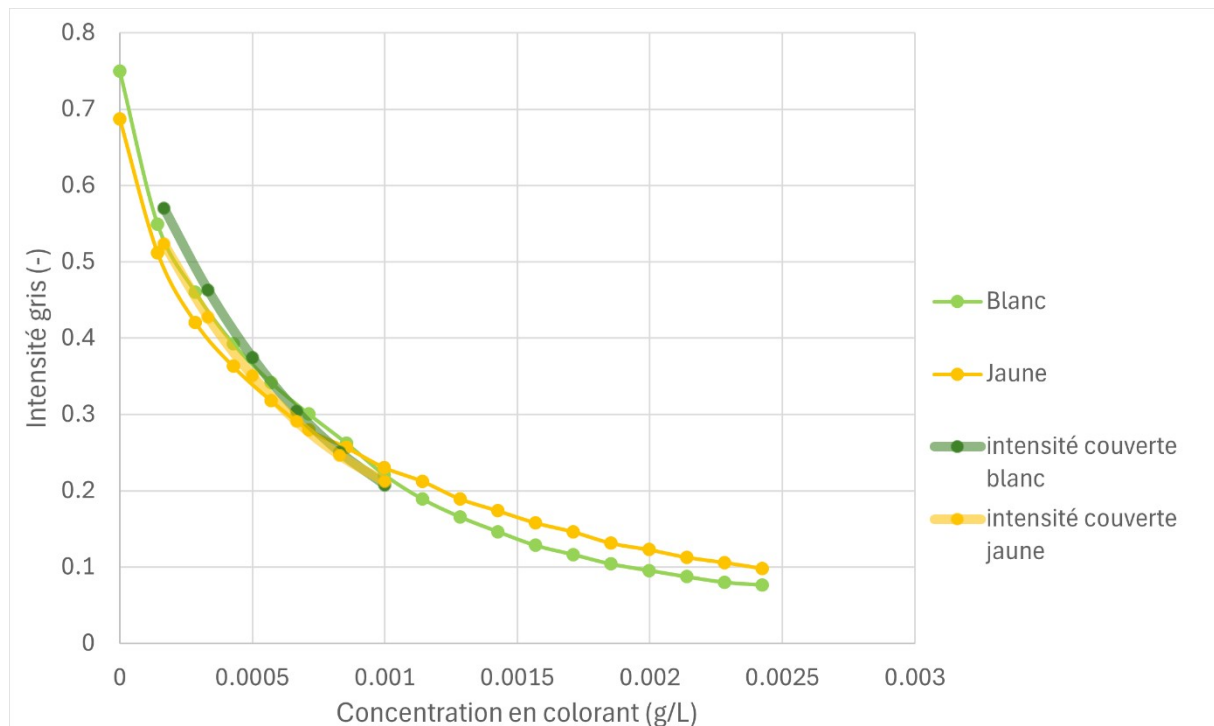


Figure 18 : Graphique de l'intensité des pixels en fonction de la concentration en colorant (bleu de méthylène) avec la plage de concentration utilisé si la concentration maximale en colorant est 0.001g/L.

- Ainsi un premier étalonnage entre intensité des pixels et la concentration en colorant est réalisé.
- Résultats pour le permanganate en Annexe 5.
- Choix de la concentration maximale optimale :
 - 0.001g/L pour le bleu de méthylène
 - 0.003g/L pour le permanganate de potassium

3.7.2. Etalonnage concentration en colorant/salinité

Objectif : Réaliser d'un étalonnage entre concentration en colorant et salinité.

- Cette étape peut être réalisé directement grâce à la loi précédente en associant à la concentration maximale en colorant (0.001g/L) la salinité maximale en conditions d'essai (30g/L).
- Il est possible de vérifier la loi en réalisant une dilution avec comme solution mère initiale une solution avec la salinité maximale (30g/L) et la concentration en colorant maximale :
 - 1) Réalisation de niveaux de dilution du sel avec la concentration de colorant choisi précédemment : 30, 25, 20, 15, 10, 5g/L

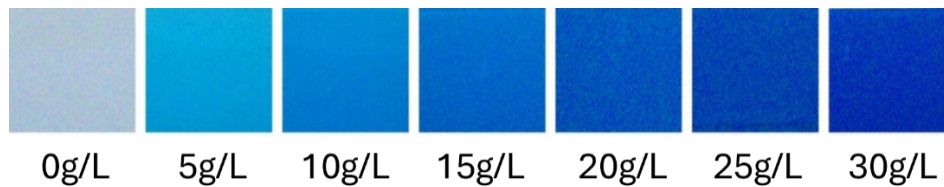


Figure 19 : Extraction photo des zones à analyser après dilution à différents paliers de salinité pour le bleu de méthylène sur fond blanc.

- Extraction de l'intensité des pixels : Les résultats des comparaisons entre intensité de gris théorique et mesurée à partir de la dilution ne correspondent que si les conditions expérimentales sont absolument identiques.

3.7.3. Création de la courbe de calibration.

Objectif : Mise en relation de l'intensité des pixels avec la salinité réelle.

- Réalisation de la courbe à partir des mesures de la dilution

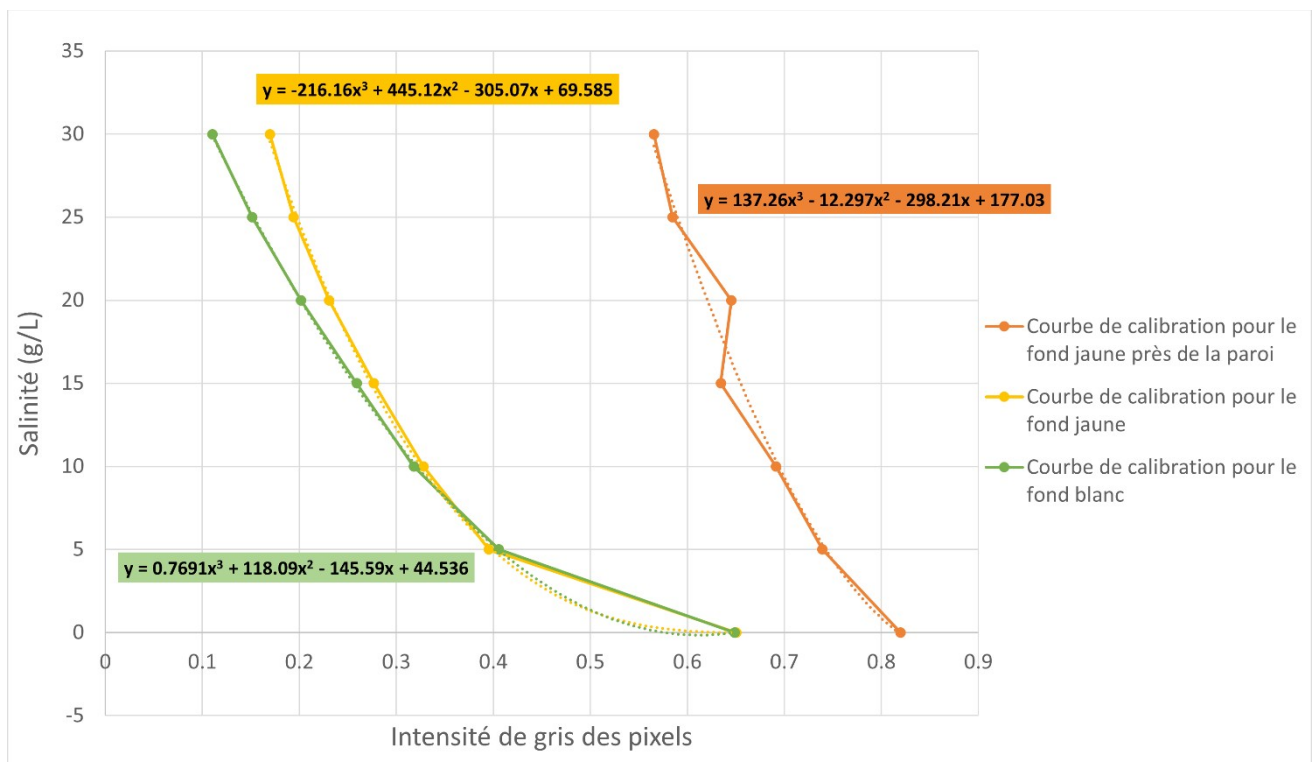


Figure 20 : Graphique avec les courbes de calibration salinité/intensité pour le bleu de méthylène sur différents fonds.

- Les lois choisies sont des lois polynomiales du 3^{ème} degré car se sont-elles qui semblent correspondre le plus aux tendances des courbes.
- Résultats pour le permanganate en Annexe 6.

3.7.4. Résultats

En appliquant une loi obtenue sur une acquisition dans les mêmes conditions il est possible de visualiser spatialement sur le banc les courants de densité.

- La figure 21 ci-dessous illustre la chambre d'eau douce après 10 secondes d'ouverture du batardeau, un courant de densité est visible grâce au colorant ajouté dans l'eau salée à 30g/L. Après application de la bonne loi de calibration (ici bleu de méthylène sur fond jaune) il est possible de visualiser le courant de densité selon sa salinité.

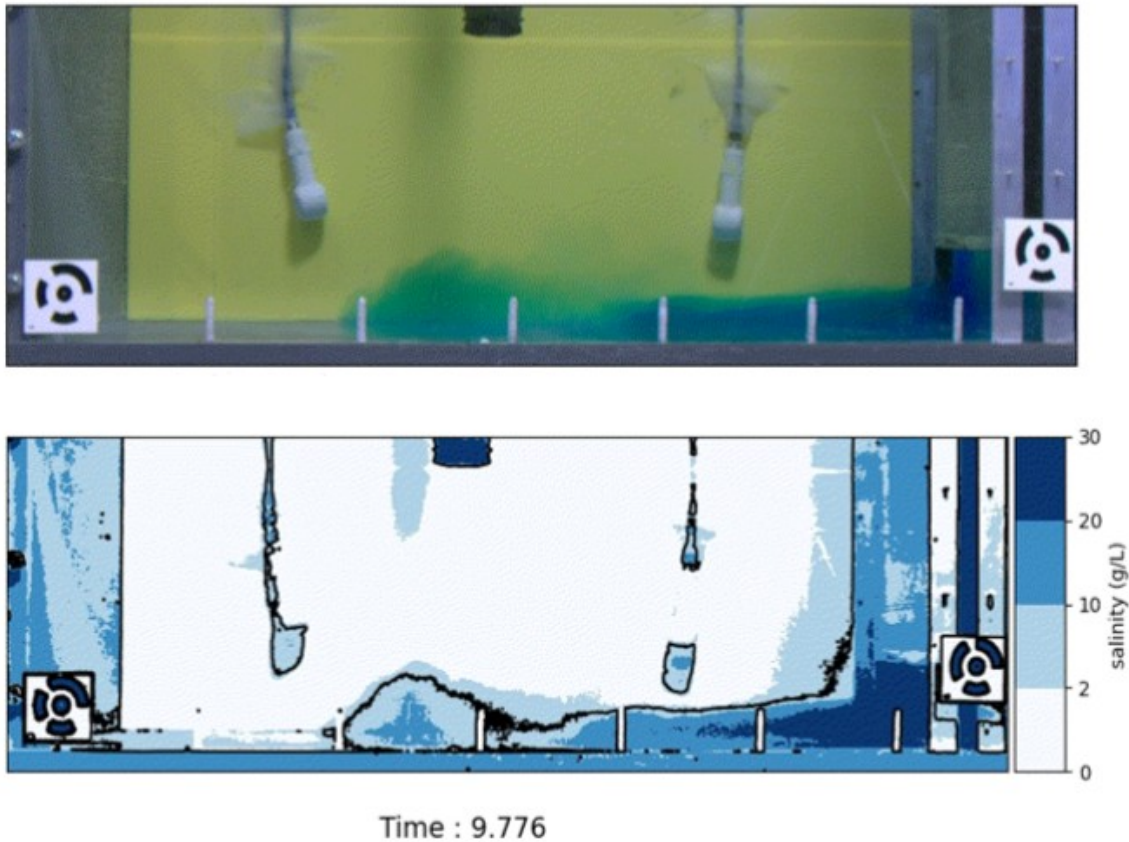


Figure 21 : Post-traitement d'un courant de densité avec visualisation de la salinité.

Afin de vérifier que l'échelle de salinité est correcte, les mesures de salinité obtenues par les sondes HACH sont comparé avec les données obtenue par traitement optique.

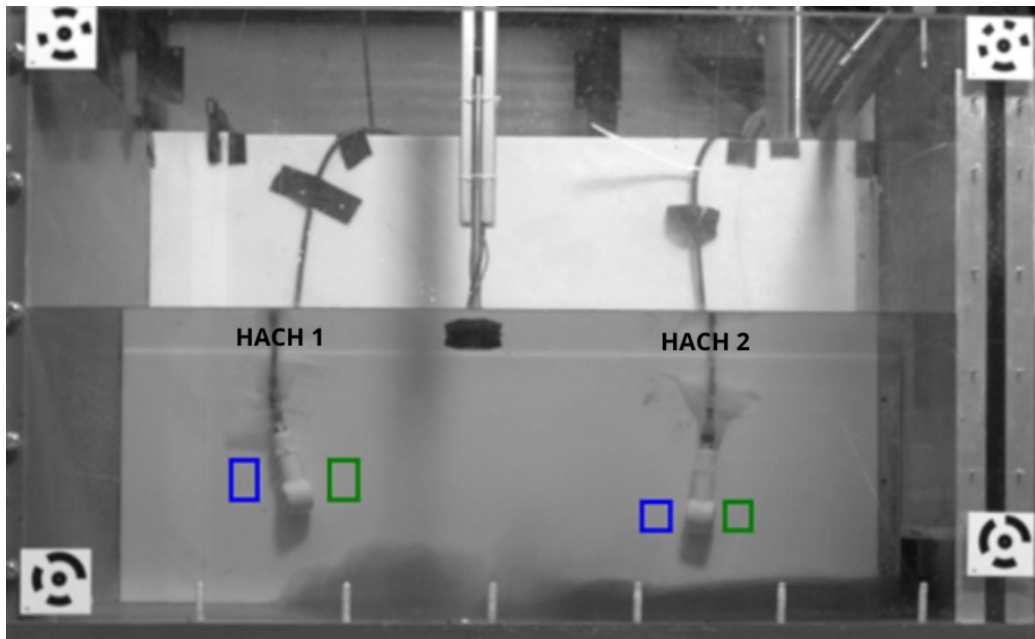


Figure 22 : Zones de post-traitements choisis pour vérification de la loi

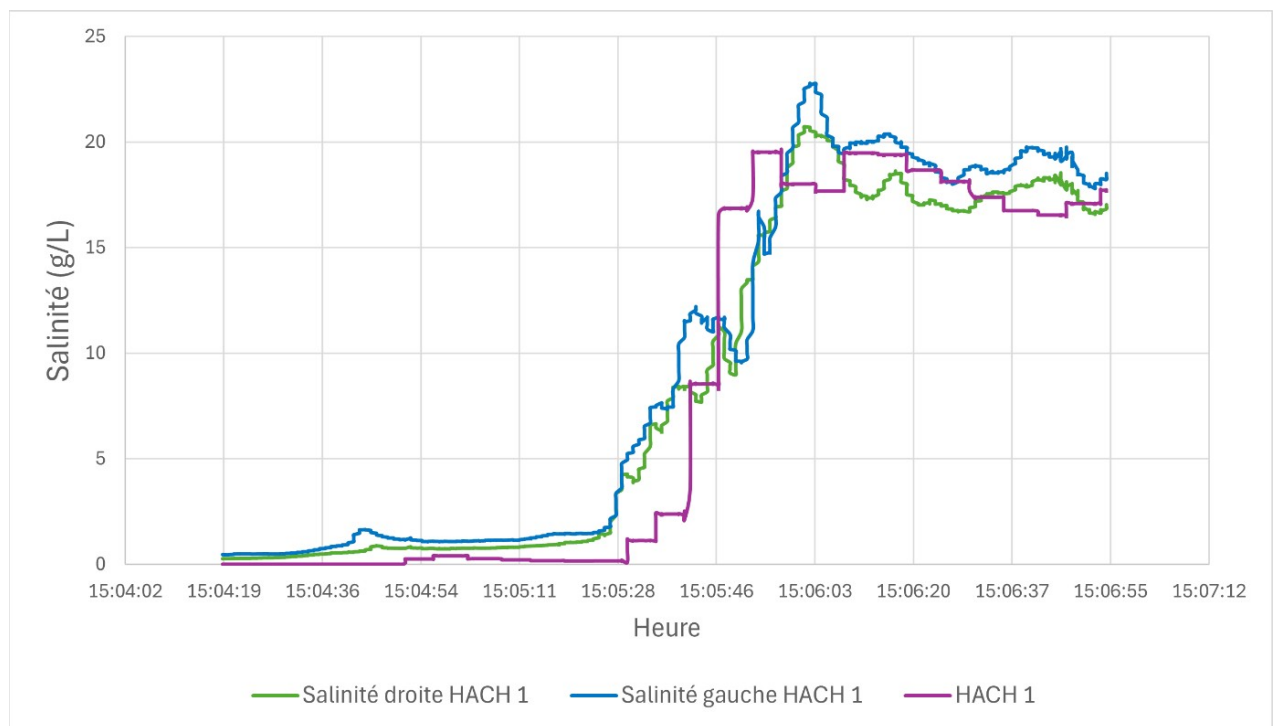


Figure 23 : Graphique des mesures de salinité obtenues par la sonde HACH 1 et par traitement optique sur une zone à gauche et une zone à droite de la sonde.

- Les résultats obtenus du traitement optique autour de la sonde HACH 1 suivent globalement les tendances de salinité avec un écart moyen de 1,7g/L cependant l'écart peut atteindre 5g/L lorsque que les variations de salinité sont rapides.
- Ces erreurs peuvent être dû à des éléments parasites autour de la sonde (ombres, reflets).

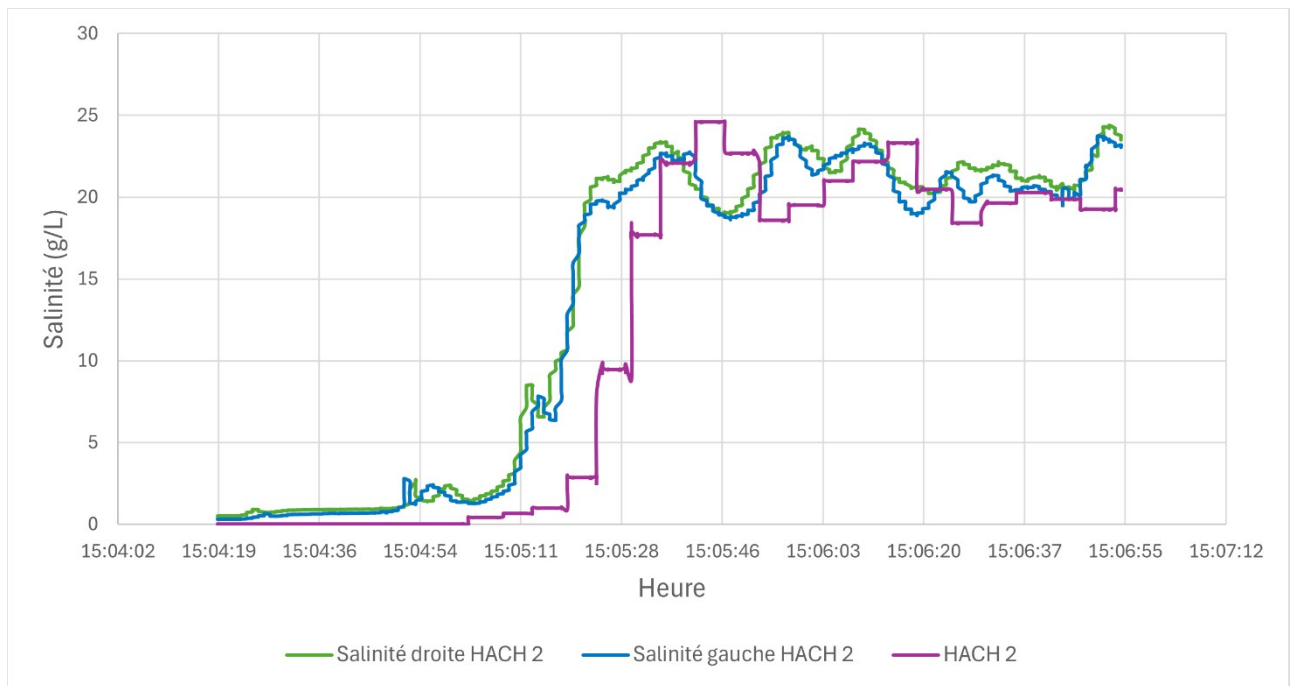


Figure 24 : Graphique des mesures de salinité obtenues par la sonde HACH 2 et par traitement optique sur une zone à gauche et une zone à droite de la sonde.

- Les résultats sur la sonde HACH 2 correspondent d'avantage au traitement optique autour de la sonde.
- Un temps de décalage d'environ 6 secondes de la sonde HACH 2 est remarquable et correspond probablement au temps de réaction de la sonde. Si ce temps de réaction est supprimé l'erreur moyenne passe de 2,8g/L à 1,6g/L.

3.7.5. Conclusions des paramètres

• **Colorant :**

Conclusion : Le bleu de méthylène offre un meilleur contraste car couvre une gamme d'intensité de gris sur la gamme critique entre 25g/L et 30g/L plus grande que le permanganate, et cela pour tous les fonds.

• **Couleur du fond :**

Conclusion : Le fond blanc offre le meilleur contraste peu importe le colorant. Un fond jaune permet aussi un bon contraste sensiblement le même que pour le fond blanc. Cependant le fond gris ne permet pas un bon contraste et le fond jaune près de la paroi obtient une loi bien trop éloignée des deux autres fonds.

• **Éclairage :**

L'éclairage a un gros impact sur la loi de calibration, un test a été effectué pour vérifier que la loi de calibration est la même dans les deux chambres. Ce test a révélé une différence pouvant atteindre 5g/L de sel entre les deux chambres pour la même intensité de pixel (Annexe 7). Une calibration distincte doit donc être effectuée par zone et il faut s'assurer que l'éclairage soit bien homogène dans chaque zone.

De plus, comme décrit dans la partie 3.5. L'intensité mesurée peut aussi varier au sein d'une même chambre. Les tests ont montré que l'utilisation de spots lumineux est préférable à condition de les placer au-dessus de chaque chambre.

3.8. Conclusion de la partie

L'ensemble des travaux réalisés sur la visualisation optique des courants de densité a permis de valider une méthode fiable de calibration entre la salinité et l'intensité optique mesurée sur les images. L'utilisation d'un éclairage diffus et d'un fond noir a considérablement amélioré la qualité des images en réduisant les reflets parasites. Une concentration optimale en bleu de méthylène de 0,001 g/L a été déterminée pour couvrir toute la gamme utile de salinité.

Malgré des premiers résultats prometteurs, certaines limites subsistent : des essais supplémentaires sont nécessaires pour vérifier la robustesse du protocole en présence d'un bateau dans le modèle physique. Enfin, une série de facteurs susceptibles d'influencer la relation entre salinité et intensité a été identifiée : profondeur d'eau, éclairage, réglages optique, reflets, homogénéité de la solution, etc. Tous ces paramètres doivent être rigoureusement maîtrisés ou surveillés pour garantir la validité des résultats. La méthodologie de calibration, bien qu'encore perfectible, constitue une base solide pour les futures expérimentations.

4. Conclusion

Ce travail a permis de développer et de valider une méthodologie expérimentale appliquée sur un banc d'essai. Les différentes étapes menées, instrumentation du banc, préparation des solutions salées, acquisition et traitement optique, ont chacune contribué à l'élaboration de cette méthodologie.

L'instrumentation a confirmé la fiabilité des sondes HACH, des capteurs optiques et de l'ADCP, tout en mettant en évidence certaines limites, notamment le temps de réponse des sondes et la nécessité d'un positionnement stable. La préparation des solutions salées a conduit à l'établissement d'un nouvel abaque expérimental reliant salinité, masse volumique et température, mieux adapté aux conditions de l'étude que les références théoriques existantes.

Ce travail ne constitue toutefois qu'une première étape. La suite consistera à tester et adapter cette méthodologie sur le modèle physique du CESAME, dont la complexité est bien plus grande que celle du banc d'essai. L'échelle accrue, la présence d'un navire, les effets d'ombre liés aux structures et d'autres contraintes viendront en effet compliquer la mise en œuvre.

Enfin, l'extension de la méthodologie à une configuration multi-caméras, la mise en place d'acquisitions synchronisées sur plusieurs zones et le croisement systématique des données optiques avec celles issues des sondes et de l'ADCP permettront de renforcer la fiabilité et la précision des résultats.

5. Bibliographie

BASLER. Basler Product Documentation. (2025) Disponible sur : < [Basler Product Documentation](#) > (06/2025).

CNR (Nathalie HASSEL). (2025) Disponible sur : < [CNR | L'énergie au cœur des territoires](#)> (06/2025).

Gill, A. E. (1982) “*Atmosphere-Ocean Dynamics*”, Academic Press, San Diego, CA.

HACH. (2025) Disponible sur : < [Fabrique des instruments et des réactifs pour le test et l'analyse de la qualité de l'eau | Hach France](#)> (16/06/2025)

Helena NOGUEIRA, Claudia ADDUCE, Elsa ALVES, Mario J FRANCA. “Image analysis technique applied to lock-exchange gravity currents. *Measurement Science and Technology*” (2013). Disponible sur : < stacks.iop.org/MST/24/047001 >

H. Haddad (CNR). (2025) “*Physical Model Design*” Rapport interne CNR, Numéro : *DIMP-I 2025-0158-00*

WIKIPEDIA. Canal de Panama. (2025) Disponible sur : < [Canal de Panama — Wikipédia](#)> (16/06/2025)

6. Table des figures

Figure 1 : Photo du banc d'essai.....	7
Figure 2 : Sondes 3700sc HACH.....	8
Figure 3 : Transmetteur SC4500 HACH.....	8
Figure 4 : Graphique du suivi en salinité de la solution en fonction de la température avec différentes positions des sondes.....	9
Figure 5 : Position ne modifiant pas les mesures de salinité.....	10
Figure 6 : Position modifiant les mesures de salinité.....	10
Figure 7 : BASLER A2a2840 – 14gcBAS.....	10
Figure 8 : Logigramme de l'ordre des réglages des capteurs optiques.....	12
Figure 9 : Photo de l'ADCP monté sur le banc d'essai.....	13
Figure 10 : Profil des vitesses des courants d'eau salée obtenue grâce à l'ADCP.....	14
Figure 11 : Graphique du suivi en salinité pendant 24h d'une solution à 32g/kg avec plusieurs valeurs de compensation de la température.....	17
Figure 12 : Graphique de comparaison entre les valeurs théorique de Gill et les mesures.....	19
Figure 13 : Photos du banc sans mesures d'ajustement pour limiter les reflets.....	20
Figure 14 : Photos du banc avec éclairage et fond noir derrière les caméras.....	21
Figure 15 : Zones post-traitées pour comparer l'homogénéité de l'intensité des pixels (éclairage avec lanterne).....	21
Figure 16 : Zones post-traitées pour comparer l'homogénéité de l'intensité des pixels (éclairage spot).	22
Figure 17 : Zones de post-traitement selon les fonds.....	23
Figure 18 : Graphique de l'intensité des pixels en fonction de la concentration en colorant (bleu de méthylène) avec la plage de concentration utilisé si la concentration maximale en colorant est 0.001g/L.....	24
Figure 19 : Extraction photo des zones à analyser après dilution à différents paliers de salinité pour le bleu de méthylène sur fond blanc.....	25
Figure 20 : Graphique avec les courbes de calibration salinité/intensité pour le bleu de méthylène sur différents fonds.....	25
Figure 21 : Post-traitement d'un courant de densité avec visualisation de la salinité.....	26
Figure 22 : Zones de post-traitements choisis pour vérification de la loi.....	27
Figure 23 : Graphique des mesures de salinité obtenues par la sonde HACH 1 et par traitement optique sur une zone à gauche et une zone à droite de la sonde.....	27
Figure 24 : Graphique des mesures de salinité obtenues par la sonde HACH 2 et par traitement optique sur une zone à gauche et une zone à droite de la sonde.....	28



POLYTECH[®]
TOURS

35 ALLÉE FERDINAND DE LESSEPS
37200 TOURS

Clémence Brochard
2024-2025

Elaboration d'un protocole d'étude des courants de densité par visualisation photo

Résumé :

Le stage s'inscrit dans une étude menée dans le cadre du canal de Panama et portant sur les phénomènes de courants de densité. L'objectif principal du stage est de définir une méthodologie permettant de visualiser et d'analyser ces courants de densité de manière fiable. Pour cela, l'approche choisie repose sur la prise de photographies et l'analyse d'images, qui offrent une vision directe de l'évolution des mélanges. Afin de rendre visibles les écoulements, des colorants sont ajoutés à l'eau et servent de traceurs. Leur suivi permet d'identifier les zones de diffusion et de caractériser le comportement des courants. Cette méthode vise à fournir une base solide pour l'étude qui suivra sur le modèle physique du CESAME.

Summary:

The internship is part of a study conducted in the context of the Panama Canal, focusing on density current phenomena. The main objective of the internship is to define a methodology to reliably visualize and analyze these density currents. To achieve this, the chosen approach relies on taking photographs and image analysis, which provide a direct view of the evolution of mixtures. In order to make the flows visible, dyes are added to the water and serve as tracers. Their tracking allows for identifying diffusion areas and characterizing the behavior of the currents. This method aims to provide a solid foundation for the subsequent study on the physical model of CESAME.

CNR LABORATOIRE GERLAND

4 RUE Chalons-sur-Saône
69007 LYON

Tuteur entreprise :

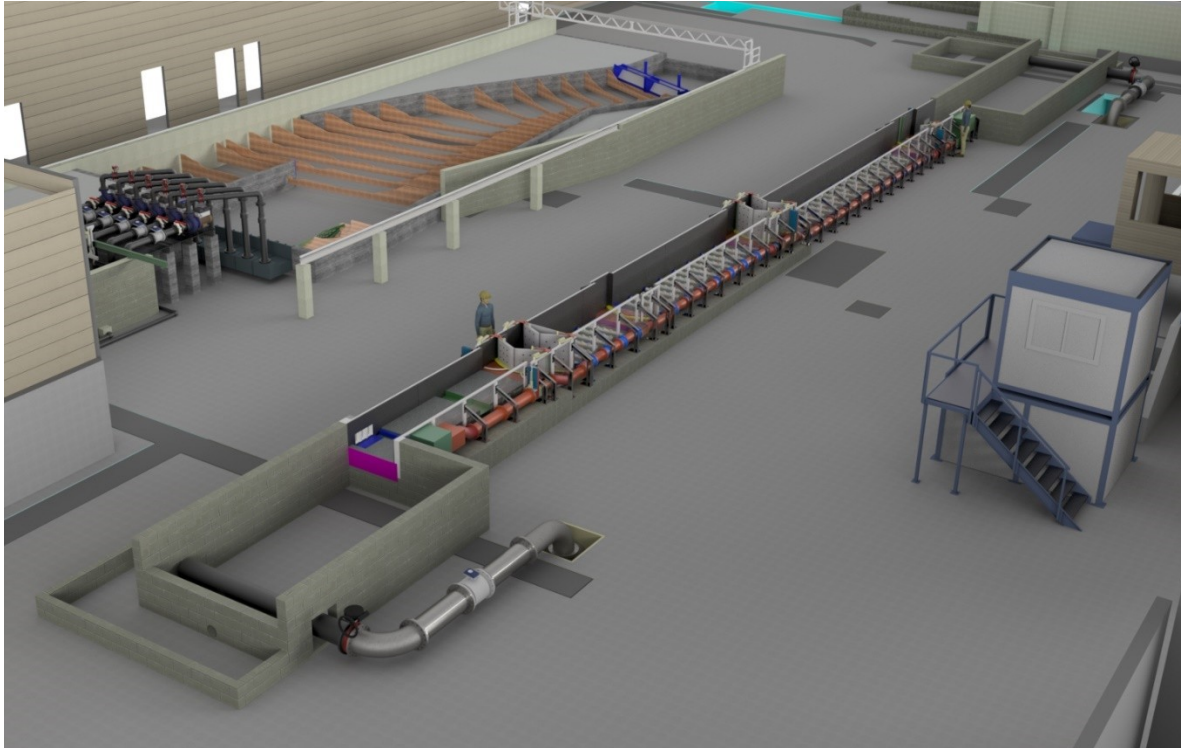
Hanna Haddad

Ingénieur en hydraulique et transport sédimentaire

Tuteur académique :

Stéphane Rodrigues

7. Annexes



Annexe 1: Modélisation physique de l'écluse de Miraflores au 1/30.

Procédure d'Étalonnage des sondes de salinité HACH

Avant de commencer l'étalonnage, vérifier les conditions de placement et de manipulation des sondes :

1. Positionnement des sondes :

- Chaque sonde doit à au moins 1 mètre d'une paroi métallique ou d'une source pouvant induire des interférences.
- Les sondes doivent être espacées d'au moins 20 cm les unes des autres.
- Aucune sonde ne doit toucher directement les parois du récipient.

2. Manipulation :

- Ne pas tenir les sondes par leur base (risque de transfert de chaleur ou de bruit électrique), mais toujours les manipuler par le câble.

3. Réinitialisation des paramètres :

- Aller dans le menu « Étalonnages » du boîtier pour chaque sonde.
- Rétablir les valeurs par défaut de chaque sonde pour repartir d'un étalonnage propre.

Étalonnage de la température :

1. Préparation de la solution :

Utiliser une solution thermique stable.

La sonde doit être entièrement immergée, sans toucher les bords du récipient.

2. Stabilisation :

Laisser les sondes en place au moins 30 minutes pour permettre à la température de se stabiliser.

3. Réglages :

Effectuer l'étalonnage à « Zéro » ou sur la base de la température connue de la solution.

Utiliser un thermomètre pour vérifier la température réelle de la solution et ajuster les valeurs si nécessaire.

 Un étalonnage à l'air libre est incorrect : il fausse les mesures, car la température ambiante fluctue et n'est pas représentative des conditions en solution.

Étalonnage de la conductivité :

1. Solution étalon :

Utiliser une solution de conductivité de référence (ex. : HANNA à 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

S'assurer que la sonde ne touche ni le fond ni les parois du récipient.

Respecter les distances d'espacement entre sondes comme précisé plus haut.

2. Stabilisation thermique :

Laisser la sonde immergée 30 minutes pour stabiliser la température avant la lecture.

3. Réglages dans le boîtier :

Entrer la « température de référence » de la solution étalon :

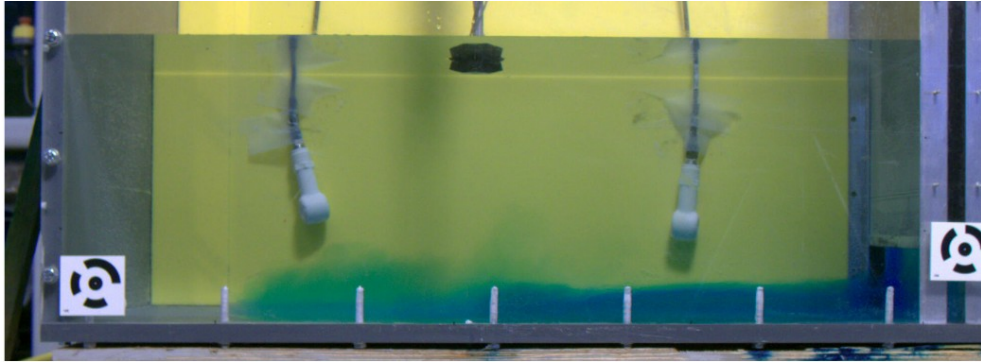
Par exemple : Pour la solution HANNA à 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$ $\rightarrow$ 25°C.

Entrer la « pente » de la solution étalon :

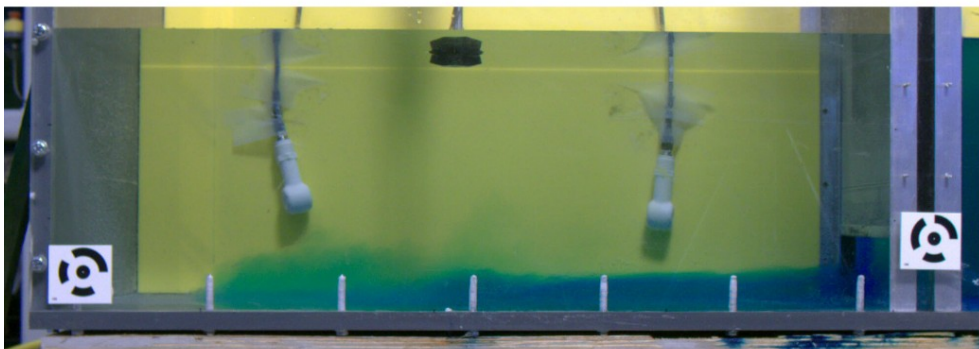
Par exemple : Pour HANNA à 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$ $\rightarrow$ 1.84 %/°C.

Notes importantes :

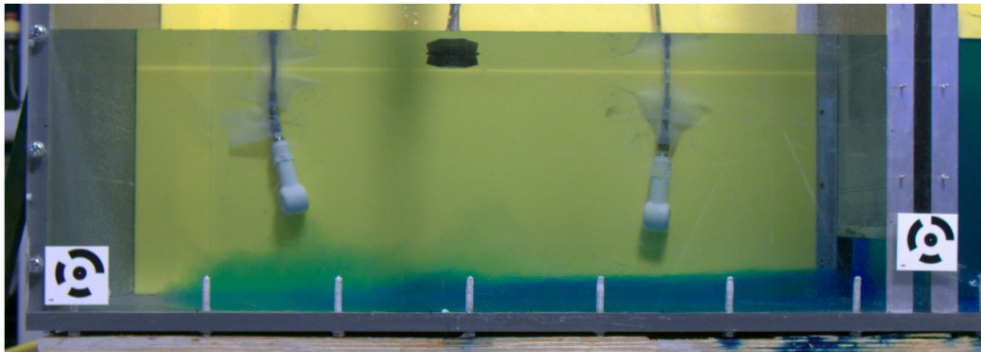
- Il est préférable d'étalonner d'abord la température, puis la conductivité, cependant la température peut être modifier après sans trop d'impact sur la conductivité.
- Ne jamais interrompre une stabilisation thermique.
- Toujours utiliser des solutions étalon fraîches et non contaminées.



1

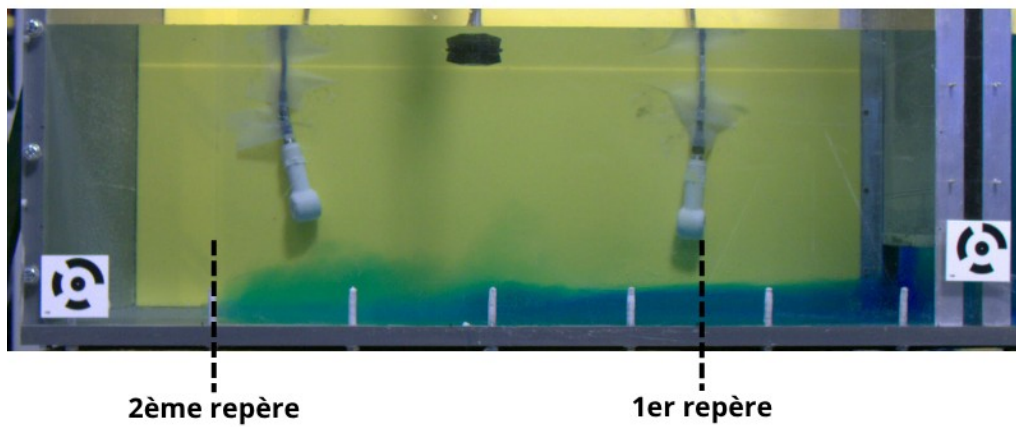
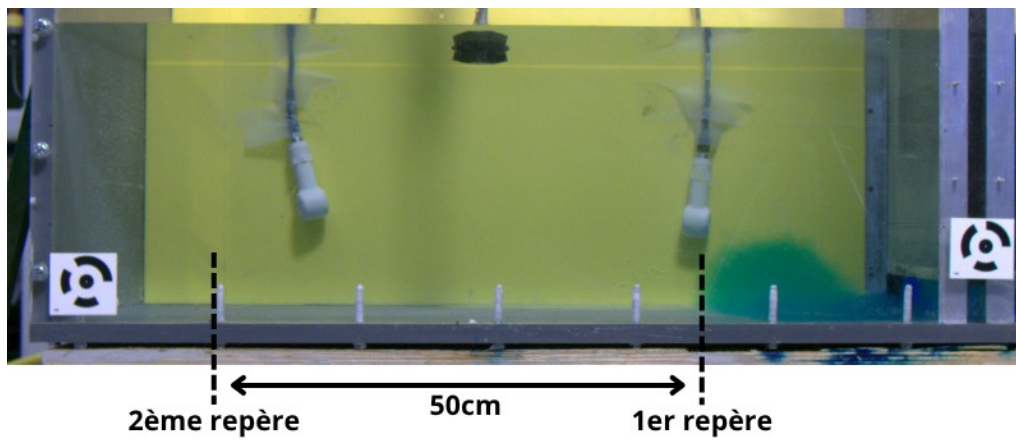


2

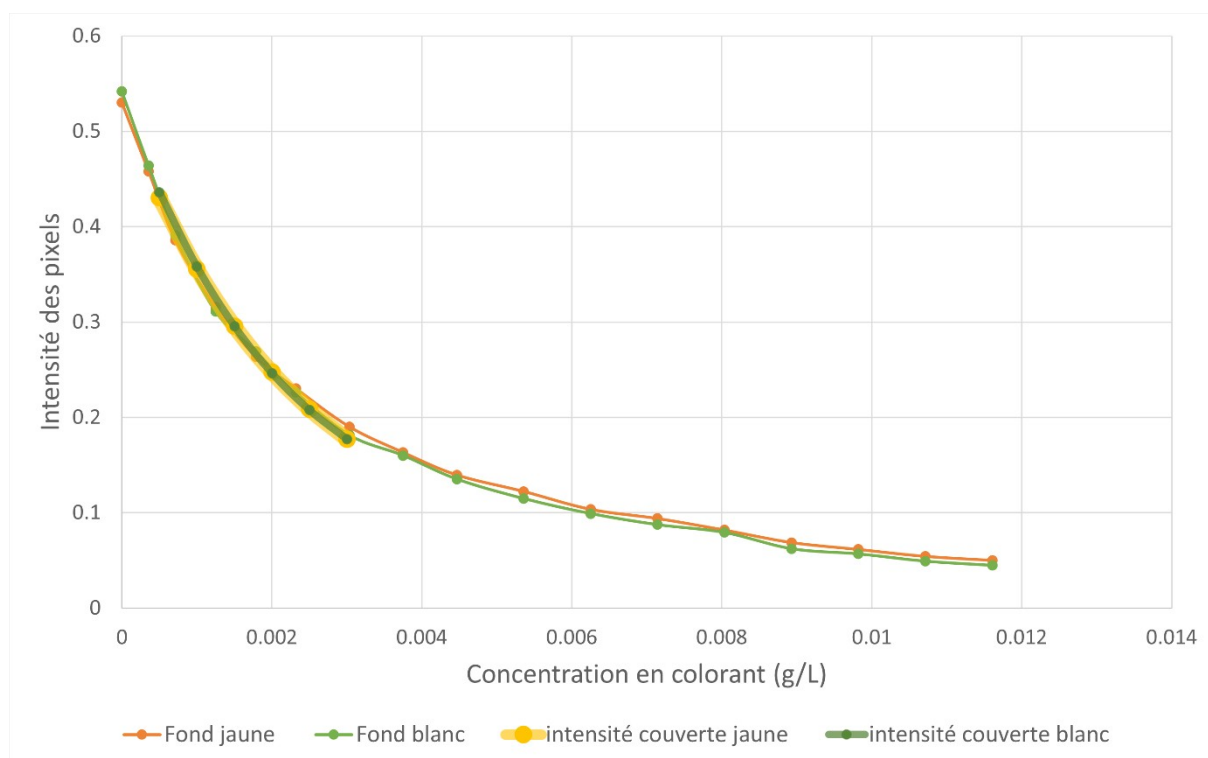


3

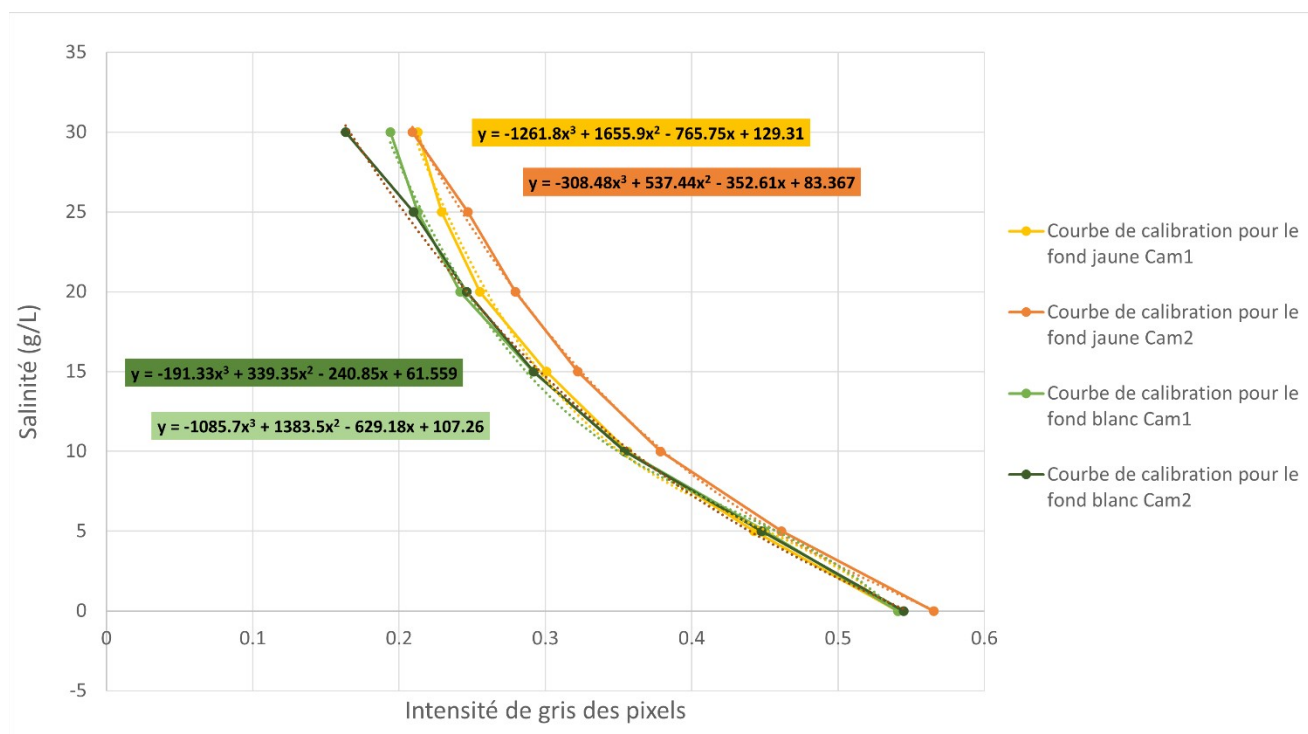
Annexe 3 : 3 photos prises lors d'un test de courant de densité à 5fps soit toutes les 0,2secondes.



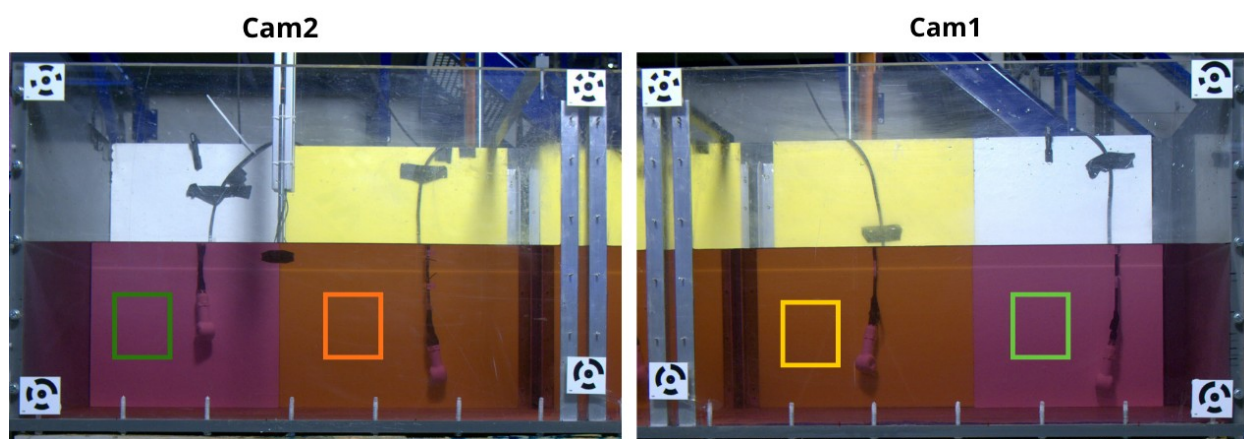
Annexe 4 : Estimation de la vitesse de courant par acquisition photo.



Annexe 5 : Graphique de l'intensité des pixels en fonction de la concentration en colorant (permanganate) avec la plage de concentration utilisé si la concentration maximale en colorant est 0.003g/L.



Annexe 6 : Courbes de calibration selon Cam et fonds pour le permanganate.



Annexe 7 : Zones de post-traitement selon Cam et fonds pour le permanganate.