



UFR Sciences et Techniques

Sciences pour l'ingénieur

Surverse expérimentale et numérique

Rapport du projet personnel de recherche

ABAD - TORTORA Tom



Tuteur : Frédéric GOLAY

Laboratoire Imath

2024 - 2026

Je tiens à remercier chaleureusement M. Golay pour le temps qu'il a consacré à me diriger et à m'aiguiller tout au long de ces deux années. Mes remerciements s'adressent également à mon père pour son aide précieuse lors de l'assemblage de la maquette.

Table des matières

1	Résumé	3
2	Introduction	3
3	Cahier des charges	4
4	Surverse numérique	5
4.1	Code de calcul	5
4.2	Modèle physique	5
4.3	Fichiers et sous-programmes	6
4.3.1	Fichier de configuration	6
4.3.2	Fichier OBJ	7
4.3.3	Sous-programme de cinématique objets	8
4.4	Simulations	9
4.4.1	Lancement d'une simulation	9
4.4.2	Simulations préliminaires	10
4.4.3	Simulation finale	11
5	Surverse expérimentale	14
5.1	Prototype 1	14
5.2	Fabrication additive	15
5.2.1	Paramétrage de l'impression	16
5.3	Prototype 2	17
5.3.1	Fabrication	17
5.3.2	Mise en œuvre	19
6	Comparaison	21
6.1	Analyse de la cinématique	21
6.1.1	Phase 1 : Formation et propagation de l'onde	21
6.1.2	Phase 2 : Surverse et retour à la statique	23
6.1.3	Phase 3 : État statique final	25
6.2	Interprétation des écarts	26
7	Conclusion et perspectives	28
8	Bibliographie	29
9	Annexes	30

1 Résumé

Ce projet d'étude analyse la complémentarité entre la simulation numérique et l'expérimentation physique à travers le phénomène hydrodynamique de la surverse d'un barrage causée par l'impact d'un solide dans l'eau. La démarche numérique repose sur l'utilisation du code de calcul CERF v1.0, exploitant un modèle physique d'Euler bi-fluide isotherme et un maillage adaptatif en temps et en espace (BB-AMR) afin d'optimiser les ressources de calcul en 2D. En parallèle, une approche expérimentale a été menée via la conception et l'assemblage d'une maquette sur mesure par fabrication additive (impression 3D en PLA). La confrontation rigoureuse des deux méthodologies révèle une excellente concordance des résultats, avec un écart final sur les niveaux d'eau stabilisés de seulement 2,5% dans le bassin principal et 3,8% dans le bassin secondaire. Les légères divergences observées en fin de processus mettent en évidence les limites inhérentes au modèle numérique, notamment l'absence de prise en compte de la viscosité du fluide et des frottements sur les parois réelles. Ce travail valide ainsi l'efficacité et la robustesse d'un tel couplage dans une étude.

2 Introduction

La compréhension des phénomènes hydrodynamiques complexes, tels que l'impact d'un solide dans l'eau (water entry) provoqué par un glissement de terrain ou une chute de roche, représente un enjeu majeur pour la sécurité des infrastructures hydrauliques à travers le monde, notamment les barrages. Historiquement, l'état des technologies limitait l'analyse de ces phénomènes à des expérimentations réelles. Aujourd'hui, nous bénéficions d'outils puissants de mécanique des fluides numérique (CFD), qui permettent de simuler ces écoulements avec une grande précision. Cependant, le calcul numérique possède aussi ses limites et n'exclut pas l'approche physique. Ces deux méthodologies s'avèrent fondamentalement complémentaires.

Dès lors, une question se pose : Comment le couplage entre simulation numérique et expérimentation permet-il une étude précise des phénomènes de water entry et de surverse d'un barrage ?

Pour répondre à cette problématique, nous allons confronter une surverse numérique à une surverse expérimentale. Premièrement, nous détaillerons le cahier des charges et la configuration du domaine d'étude. Nous aborderons ensuite la modélisation numérique à travers le code de calcul CERF, en détaillant son modèle physique, ses fichiers de configuration et les sous-programmes régissant la cinématique des objets. Dans un second temps, nous présenterons la conception et la mise en œuvre de la surverse expérimentale, en mettant en avant la fabrication additive pour la création de notre maquette. Enfin, une comparaison rigoureuse des résultats numériques et expérimentaux permettra de valider la pertinence de ce couplage et d'analyser la dynamique et la cinématique des vagues observées.

3 Cahier des charges

Pour réaliser notre comparaison entre la surverse numérique et expérimentale de la manière la plus précise possible, nous devons mettre en place un cahier des charges que nous respecterons lors de nos deux expérimentations. Ce document présente sa version finale, ayant évolué au fil des besoins et des contraintes du projet.

- Le domaine d'expérimentation sera divisé en deux parties : le bassin principal d'une longueur de 21 cm et le bassin secondaire d'une longueur de 8 cm, tous deux séparés par un barrage de 1 cm de largeur. La hauteur d'eau initiale dans le bassin principal est de 7 cm et la hauteur du barrage est de 8 cm. Le bassin secondaire est initialement totalement vide.
- Le solide est en forme de triangle rectangle de 6 cm de côté, dont les angles aigus ont été tronqués pour propulser l'eau vers le barrage et ainsi générer une surverse mesurable sans créer de projection d'eau trop violente. Son mouvement est une chute, sans vitesse initiale et guidée par des rails verticaux dont les frottements sont considérés comme négligeables. La hauteur initiale est de 15 cm, dont 8 cm au-dessus de l'eau du bassin principal (voir Figure 1).

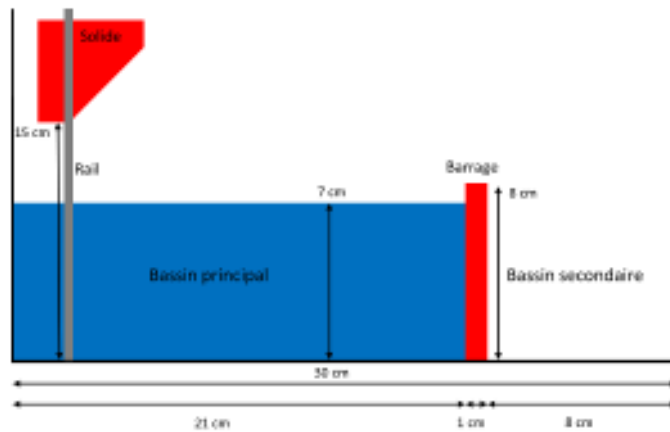


FIGURE 1 – Schéma de l'expérience

- Pour des raisons de temps et de coût matériel, la simulation sera restreinte à la 2D. Il faudra ainsi en tenir compte, notamment lors de la construction de notre maquette, mais aussi lors de la comparaison entre les deux expériences.

4 Surverse numérique

Dans cette section nous étudierons et analyserons le paramétrage, la mise en œuvre ainsi que la conformité de la surverse numérique, grâce au code de calcul CERF.

4.1 Code de calcul

Le code de calcul que nous allons utiliser pour mener à bien notre surverse numérique est le code CERF (*Computation, Erosion and Flow*) dans sa version 1.0 développé au sein du laboratoire IMATH sous la direction de Frédéric Golay. Ce code utilise une approche BB-AMR (*Block Based Adaptive Mesh Refinement*) qui met en œuvre, comme son nom l'indique, l'utilisation de maillages adaptatifs en temps et en espace afin de réduire les temps de calcul. Nous aurons l'occasion, plus tard, d'observer plus en détail ce maillage adaptatif lors des simulations. CERF permet nativement et exclusivement la simulation hydrodynamique en 3 dimensions, ce qui demande énormément de ressources. Nous pouvons cependant réaliser des simulations en 2 dimensions en forçant le maillage à ne posséder qu'une seule maille sur l'axe Z, dont l'épaisseur sera fortement réduite, mais pas inexistante.

CERF permet l'utilisation de deux modèles physiques :

- Le modèle de Saint-Venant permet en général de simuler la propagation d'ondes en eaux peu profondes, mais qui se révèle non adapté en cas de phénomènes de déferlement.
- Le modèle d'Euler bi-fluide isotherme quant à lui, comme l'ont démontré Frédéric Golay et Philippe Helluy dans *Numerical schemes for low Mach wave breaking*, permet de simuler des écoulements en hydrodynamique maritime et côtière, dont le déferlement de vagues. Ce modèle correspond parfaitement à notre étude puisqu'il permet de simuler fidèlement la surverse du barrage.

Pour permettre son bon fonctionnement, ce code requiert plusieurs autres programmes et installations, tels qu'une distribution Linux, un compilateur Fortran (gfortran), ainsi que la bibliothèque MPI qui permet d'effectuer des calculs en parallèle sur une machine. Afin de faciliter son utilisation, nous avons choisi d'utiliser l'outil WSL (*Windows Subsystem for Linux*) de Windows qui permet l'installation d'un sous-système Linux Ubuntu. La visualisation des résultats au format TECPLOT, ainsi que la génération d'une vidéo sur la base de la compilation des résultats, se feront grâce au logiciel VisIt dans sa version 3.1.2.

4.2 Modèle physique

Dans le domaine de la mécanique des fluides, nous pouvons retrouver différents modèles qui permettent la simulation de divers types d'expérimentations. Pour le cas des écoulements air-eau, l'approche classique repose sur les équations de Navier-Stokes, qui permettent la description complète du mouvement des fluides incompressibles et isothermes, notamment en tenant compte de leur viscosité :

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right] = -\nabla p + \rho \vec{g} + \eta \Delta \vec{u} \quad (1)$$

Avec ρ la masse volumique du fluide, $\vec{u}$ le vecteur vitesse, p la pression et η la viscosité.

Cependant, ces équations demandent énormément de ressources afin d'être exploitées dans le cadre de simulations bi-fluides. C'est pourquoi Frédéric Golay et Philippe Helluy proposent de simplifier ce modèle en considérant un mélange air-eau (de proportion φ). Cette proportion satisfait une équation de transport :

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \varphi = 0 \quad (2)$$

Ce mélange est considéré comme faiblement compressible et non visqueux ($\eta = 0$). L'absence de viscosité nous permet de substituer aux équations de Navier-Stokes les équations d'Euler. Ici, le

fluide est donc régi par l'équation de conservation de la masse (3) et de la quantité de mouvement (4) :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u} \otimes \vec{u} + pI) = \rho \vec{g} \quad (4)$$

Pour fermer le système, Frédéric Golay et Philippe Helluy ont démontré qu'un modèle isotherme (sans équation d'énergie) est suffisant pour modéliser la cinématique des vagues. Cela permet également de créer une compressibilité artificielle en partant d'une vitesse du son artificielle elle aussi (c_0), liant la pression p à la masse volumique ρ dans une relation linéaire :

$$p = p_0 + c_0^2 [\rho - (\varphi \rho_e + (1 - \varphi) \rho_a)] \quad (5)$$

Avec φ la fraction volumique, c_0 la vitesse du son artificielle, p_0 la pression de référence, ρ_e et ρ_a les masses volumiques de l'eau et de l'air.

Le fait d'introduire une vitesse du son artificielle n'a pas de sens physique, mais est purement numérique, dans le but de réduire le temps de calcul en autorisant une très légère compression. On aboutit ainsi à un système hyperbolique qui est aisément approximé par la méthode des volumes finis. Ce sont donc ces équations qui forment le modèle utilisé.

4.3 Fichiers et sous-programmes

Cette nouvelle sous-section est dédiée au paramétrage de nos simulations, nous y analysons le fichier de configuration ainsi que les sous-programmes qui le composent.

4.3.1 Fichier de configuration

Dans un premier temps, nous nous pencherons sur le fichier de configuration, sur lequel se base le code de calcul lors du lancement d'une simulation. Celui-ci est divisé en 7 sections : PHYS, MAME, INIT, COND, MESH, OBST, NUME. Nous en présentons ici les principaux points, essentiels à son paramétrage.

Dans un premier temps, il faut définir la géométrie et les dimensions du domaine de simulation dans la section MAME (maillage maître). D'après le cahier des charges, nous avons choisi un domaine de 30×30 cm qui sera discrétisé dans un maillage de 900 cellules (30×30 également). Le maillage de 900 cellules constitue le niveau de raffinement le plus bas possible, le niveau 0.

Afin d'y introduire les différents objets tels que notre solide ou barrage, nous devons nous pencher sur la section OBST (obstacle). En plus de les déclarer, divers arguments peuvent leur être attribués ou changés, les plus notables étant leur masse volumique (ρ) ainsi que le type de pénalisation que nous pouvons leur appliquer. On peut par exemple, appliquer une condition d'encastrement pour notre barrage ou encore un mouvement prédéfini grâce à une fonction pour notre solide. Concernant le mouvement prédéfini, il sera régi par le sous-programme de cinématique d'objets, qui sera détaillé dans la sous-sous-section suivante.

Il est également important de préciser et de détailler les conditions aux limites de notre domaine. Étant donné que nous souhaitons simuler des murs, nous utilisons donc des conditions miroir sur chacune des bordures, c'est à dire :

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial n} = 0 \quad \frac{\partial \rho}{\partial n} = 0 \quad (6)$$

Avec $\vec{u}$ le vecteur vitesse, ρ la masse volumique et n la normale sortante aux limites du domaine.

Une fois que le domaine de la simulation est défini, nous pouvons y introduire nos deux fluides dans leur position et dimensions initiales. Cette configuration s'effectue dans la section INIT (conditions initiales). Dans un premier temps, nous remplissons la totalité du domaine d'air de masse volumique $\rho = 1kg/m^3$. Puis, nous pouvons ajouter l'eau, de masse volumique $\rho = 1000kg/m^3$, sur toute la longueur du bassin principal et avec une hauteur de 7 cm, comme énoncé dans le cahier des charges.

Pour conclure, nous nous focalisons sur la section MESH (maillage). Cette section permet de paramétrer la discrétisation du maillage maître ainsi que les conditions de raffinement et de dé-raffinement. Ces dernières sont basées sur un seuil de production numérique d'entropie et permettent un gain conséquent en temps de calcul. C'est également ici que sont précisées les zones de haut raffinement initial, avec pour niveau haut les interfaces air/eau/objet, pour la première itération du code, avant que le maillage dynamique ne prenne le relais.

Les autres sections nous permettent également de modifier d'autres paramètres, tels que le modèle physique ou encore la constante de temps de remaillage. Une version détaillée du fichier de configuration est disponible en annexe 1.

4.3.2 Fichier OBJ

L'étape suivante concerne la modélisation du barrage et du solide dans la simulation. Dans le but de les implanter correctement dans notre domaine depuis le fichier de configuration, il convient de comprendre comment ces objets sont définis. Du point de vue du code, ils sont modélisés comme de l'eau rigidifiée, permettant ainsi de rester dans le cadre du modèle bifluide. Afin que le code puisse interpréter les formes utilisées, nous devons les lui fournir au format OBJ (*Object*). Le format OBJ est un format standard pour stocker une modélisation 3D simple. Il permet de décrire la géométrie d'une structure avec les coordonnées de ses sommets dans l'espace (notées : $v \ x_i \ y_i \ z_i$), qui sont ensuite reliés dans un certain ordre pour former des triangles et ainsi des faces (notées : $f \ v_u \ v_v \ v_w$). Ci-dessous, la figure 2, représente notre solide où nous pouvons observer les différents triangles (exemple en bleu), faces et sommets (exemple en jaune) qui le composent. Comme énoncé dans le cahier des charges, le solide est un triangle rectangle de 6 cm de côté dont les angles aigus ont été aplatis.

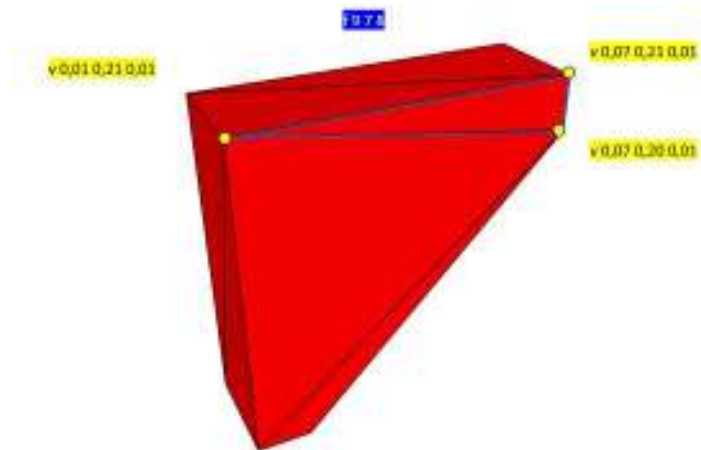


FIGURE 2 – Représentation 3D du solide

Nous pouvons constater que, malgré le fait que nous soyons théoriquement en 2 dimensions, comme

énoncé précédemment, nous retrouvons quand même une certaine épaisseur à nos objets. Cela est fait pour garantir qu'ils traversent de part en part le domaine de la simulation afin d'empêcher l'eau de s'infiltrer sur les côtés. Cela n'impacte en rien le cadre de la 2D que nous nous sommes imposé.

Une version brute des fichiers objets est disponible en annexe 2.

4.3.3 Sous-programme de cinématique objets

Le sous-programme de cinématique d'objets a pour objectif de définir la trajectoire du solide au cours du temps. Dans notre maquette, le solide étant guidé par des rails, il lui manque donc un certain nombre de degrés de liberté. Or, nous ne pouvons pas reproduire ces rails dans la simulation. C'est pourquoi nous avons choisi de lui imposer un mouvement. Nous devons donc déterminer la fonction qui régit la vitesse verticale du solide en fonction du temps. Il est important de noter que sa vitesse ne sera pas impactée par la pénétration dans l'eau, nous devons donc prévoir cette décélération dans nos équations. Afin de simplifier la fonction liée à cette décélération, nous négligerons la gravité. Cette approximation est largement acceptable, car le solide étant composé d'eau rigidifiée, la poussée d'Archimède compensera le poids une fois dans l'eau.

En supposant donc que le solide n'est soumis qu'aux forces de traînée hydrodynamique et que nous avons un nombre de Reynolds élevé : On pose V_2 la vitesse verticale du solide selon l'axe Y.

$$\sum \vec{F} = m\vec{a} \quad (7)$$

$$-\frac{1}{2}\rho CSV^2 = m\frac{dV}{dt} \quad \text{On pose : } k = \frac{1}{2}\rho CS \quad (8)$$

$$-\frac{k}{m}dt = \frac{dV}{V^2} \quad (9)$$

$$-\frac{1}{V} = -\frac{k}{m}t + C \quad (10)$$

$$\frac{1}{|V|} = \frac{1}{|V_0|} + \frac{k}{m}t \quad (11)$$

$$V(t) = \frac{|V_0|}{1 + \frac{k|V_0|}{m}t} \quad (12)$$

Donc $V\vec{2}(t) = -V(t)\vec{e}_y$.

Nous devons maintenant déterminer V_0 la vitesse à l'impact ainsi que k le coefficient d'amortissement.

Dans un premier lieu, nous allons déterminer la vitesse V_0 du solide à l'impact dans l'eau. Pour cela, nous avons opté pour une mesure plutôt qu'un calcul pour plus de précision. En effet, cela nous évite de devoir faire des approximations quant au coefficient de frottement du solide sur les rails ou l'air, ou encore la poussée d'Archimède. Pour effectuer ces mesures, nous allons utiliser notre maquette, dont le solide sera muni d'un accéléromètre SEN-MPU6050 relié à un microcontrôleur Arduino UNO.

Lors de trois essais, nous avons pu relever :

Numéro de l'essai	Temps de vol (s)	Vitesse d'impact (m/s)
n°1	0,131	1,13
n°2	0,134	1,17
n°3	0,132	1,15
Moyenne	0,132	1,15

TABLE 1 – Prises de mesures de l'accéléromètre.

Nous pouvons en déduire que $\vec{V}_0 = -1.15\vec{e}_y$ m/s, avec un écart-type de 0,02 m/s

Déterminons maintenant le coefficient d'amortissement k , comme énoncé précédemment :

$$k = \frac{1}{2}\rho CS \quad (13)$$

Avec

- ρ : masse volumique de l'eau, $\rho = 1000\text{kg}/\text{m}^3$.
- C : coefficient de traînée dépendant de la forme. Ici, nous avons choisi $C = 1$ pour compenser les approximations précédentes.
- S : Surface, étant donné que le solide pénètre dans l'eau, la surface dépend du temps. Nous avons donc pris sa valeur moyenne : $S = 0.0021\text{m}^2$.

$$k = \frac{1}{2} * 1000 * 1 * 0.0021 \quad (14)$$

$$k = 1.05 \quad (15)$$

En remplaçant les valeurs dans notre équation, on obtient :

$$\vec{V}2(t) = -\frac{1.15}{1 + \frac{1.05*1.15}{0.130}t}\vec{e}_y \quad (16)$$

L'expression de $V2(t)$ étant établie, nous allons l'intégrer à la simulation. Pour cela, il faut modifier le sous-programme de cinématique objets. Cette fonction prend en argument le temps global de la simulation, ce qui va permettre d'utiliser notre équation $V2(t)$ pendant un certain nombre de secondes, puis de figer l'objet pour simuler son impact sur le fond du bassin et éviter qu'il ne traverse le domaine de simulation.

Une version brute du Sous-programme de cinématique objets est disponible en annexe 3

4.4 Simulations

Cette sous-section est dédiée à la mise en œuvre de nos simulations, depuis le script de lancement jusqu'à la vérification de la conformité des résultats.

4.4.1 Lancement d'une simulation

Nous abordons maintenant la procédure de lancement d'une simulation qui, comme énoncé précédemment, doit se faire dans notre sous-système Linux. Elle comporte trois grandes étapes :

- Chargement du fichier de configuration : Dans un premier temps, nous devons charger notre fichier de configuration (*surv.inp*), qui permettra au code de lire l'ensemble des paramètres requis et imposés.
- Sauvegarde des états initiaux : La deuxième phase assure la sauvegarde des fichiers originaux du maillage et de la position des éléments, définis précédemment dans le fichier de configuration.
- Boucle de calcul principale : Enfin, une boucle principale est exécutée 2500 fois. Le domaine est décomposé en huit sous-domaines afin d'exploiter le calcul parallèle sur huit cœurs du processeur physique, nous recalculons le maillage si nécessaire, en fonction des conditions de raffinement, et nous sauvegardons le maillage ainsi que la position de chaque objet.

Le nombre d'itérations de la boucle a été déterminé après plusieurs essais pour permettre un retour à la statique. Le processus a été parallélisé sur 8 cœurs physiques pour permettre une réduction du temps de calcul.

Une version brute du script de lancement est disponible en annexe 4

4.4.2 Simulations préliminaires

Dans cette sous-section nous détaillerons les démarches suivies afin de tirer les bonnes conclusions qui nous ont permis de paramétrer correctement les fichiers détaillés dans la sous-section précédente. Nous ferons temporairement abstraction de la géométrie du solide et du barrage qui changeront de forme en raison de leurs évolutions au cours du projet. Le modèle vu dans la partie des fichiers objets reste la version finale.

Durant le projet, de nombreuses simulations ont été effectuées, pour en améliorer la qualité et réussir à tendre vers un comportement physique au plus proche de notre maquette, en vue d'être croisées avec ses résultats expérimentaux.

Prenons comme exemple l'une des premières simulations. Nous retrouvons ci-dessous dans la figure 3, l'eau et le solide en rouge, l'air en bleu ainsi que l'interface air/eau en jaune. Dans cette figure, nous pouvons observer notre solide, en bas à droite qui vient de pénétrer dans l'eau. Sur le haut de la vague nous pouvons observer un étrange phénomène de perte de résolution du maillage. Ce phénomène est dû à un intervalle de remaillage trop grand. En effet, la vitesse de l'eau à cet endroit était trop importante pour cet intervalle et donc la vague est sortie de la zone de haut niveau de raffinement causant cette perte de résolution.

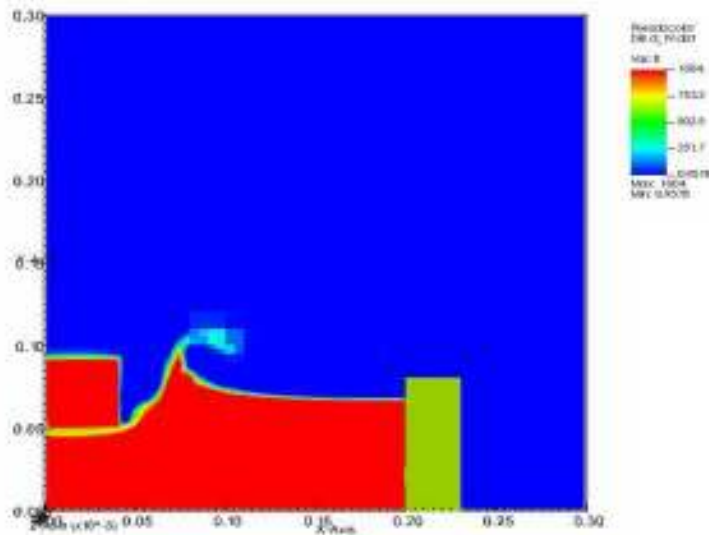


FIGURE 3 – Simulation préliminaire : perte de résolution du maillage

Dans cette figure 4, ci-dessous, qui se trouve à la fin de la simulation, nous constatons que la durée du calcul est trop courte. Nous perdons de l'information, comme le nombre d'allers-retours que va effectuer la vague ou encore quels seront les niveaux d'eau finaux dans chaque bassin lors du retour à l'équilibre. Nous devons également sauvegarder la position de notre solide à chaque pas de temps, comme pour le barrage, afin de pouvoir l'afficher en surbrillance et éviter qu'il ne se confonde totalement dans l'eau par manque de contraste.

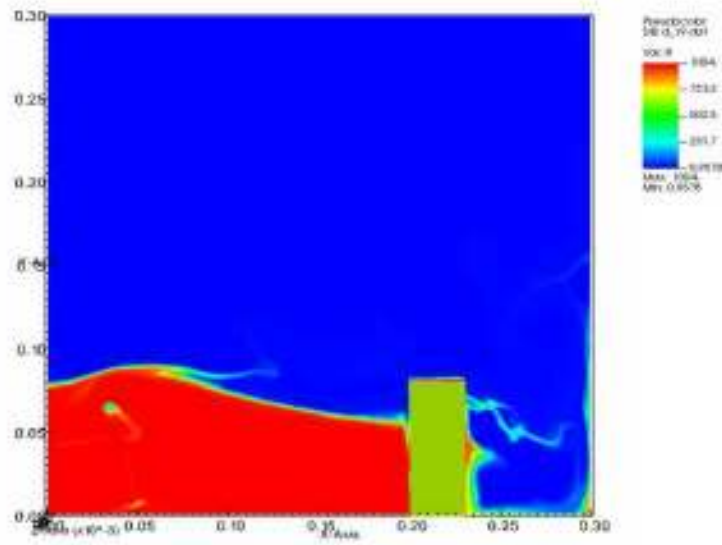


FIGURE 4 – État final de la simulation préliminaire

Pour conclure, cette simulation nous aura permis de modifier le pas de temps, la durée totale de la simulation, ainsi que la sauvegarde de la position à chaque instant. Durant une autre simulation, nous avons également pu observer que le solide, qui était alors un carré de 4 cm de côté, ne permettait pas une surverse suffisamment importante pour garantir une comparaison efficace, ce qui a entraîné sa modification dans sa version finale. Le barrage a également été raccourci en longueur pour atteindre le 1 cm énoncé dans le cahier des charges.

4.4.3 Simulation finale

Maintenant que nous avons compris les principaux rouages derrière ces simulations, nous sommes en mesure d'effectuer et d'analyser la simulation finale qui nous servira de référence. Dans cette partie, nous étudierons et vérifierons uniquement la qualité de la simulation que nous venons d'effectuer.

Dans un premier temps, nous allons vérifier la qualité du maillage initial, que nous avons programmé dans le fichier de configuration.

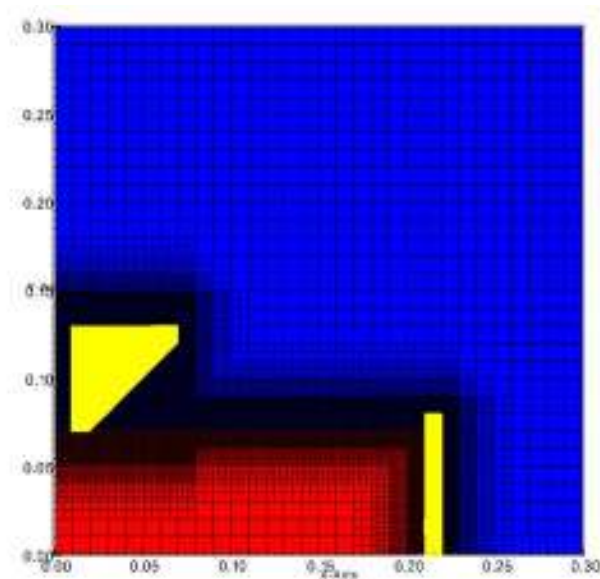


FIGURE 5 – maillage initial

Sur la figure 5 ci-dessus, nous observons plusieurs niveaux de raffinement, symbolisés par la finesse du maillage. Le niveau le plus haut englobe toutes nos interfaces et nos objets, car ce sont précisément ces zones qui sont susceptibles de grandement évoluer au pas de temps suivant. A l'inverse les zones les plus éloignées de ces interfaces conservent le niveau minimum que nous avons prédéfini. Nous pouvons donc en conclure que le maillage initial est approprié.

Nous pouvons également constater sur la figure 6 ci-dessous que, malgré la vitesse, le maillage s'adapte efficacement pour suivre l'interface air/eau, qui reste donc fine et de qualité, restant sur 3 à 4 cellules et limitant ainsi la diffusion.

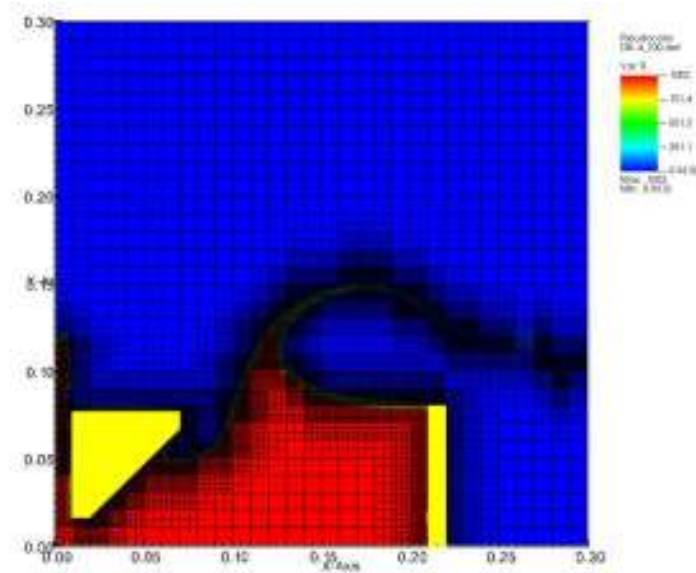


FIGURE 6 – maillage adaptatif

Nous avons évoqué que les conditions de raffinement étaient liées à la production d'entropie. Il est donc intéressant de s'y pencher. En comparant la figure 7 qui a été prise au même instant que la figure 6, nous retrouvons une similitude entre la présence d'un fort maillage ainsi que la production d'entropie numérique, représentée ici en bleu. Ici, l'entropie permet de détecter les zones sujettes à fortes variations et est donc un très bon indicateur pour déterminer où raffiner.

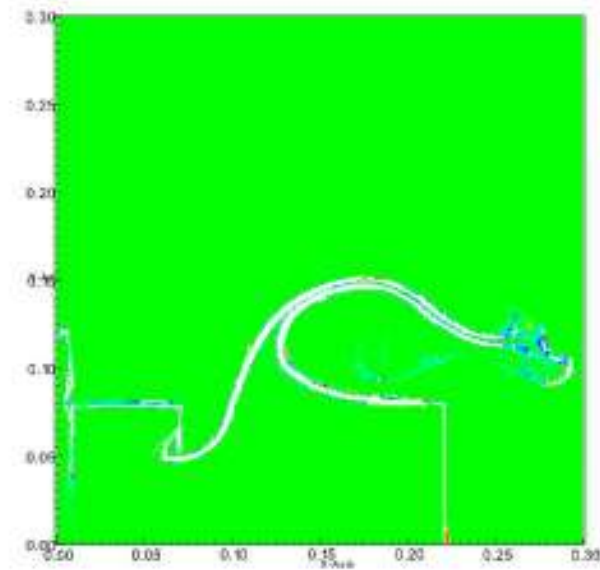


FIGURE 7 – Production d'entropie numérique

Enfin, pour conclure cette analyse, nous allons calculer la quantité d'eau initiale et la comparer à la quantité d'eau finale en cm^2 , pour estimer la production d'eau due à la diffusion numérique. D'après le cahier des charges, les conditions initiales nous permettent de déterminer :

$$S_i = h_i \times L_{bp} \quad (17)$$

$$S_i = 7 \times 21 \quad (18)$$

$$S_i = 147 cm^2 \quad (19)$$

Avec h_i : la hauteur d'eau initiale et L_{bp} : la longueur du bassin principal. Déterminons maintenant la quantité d'eau finale. Pour cela nous prendrons les derniers instants de la simulation dans laquelle un retour à la statique a été établi comme ci dessous dans la figure 8.

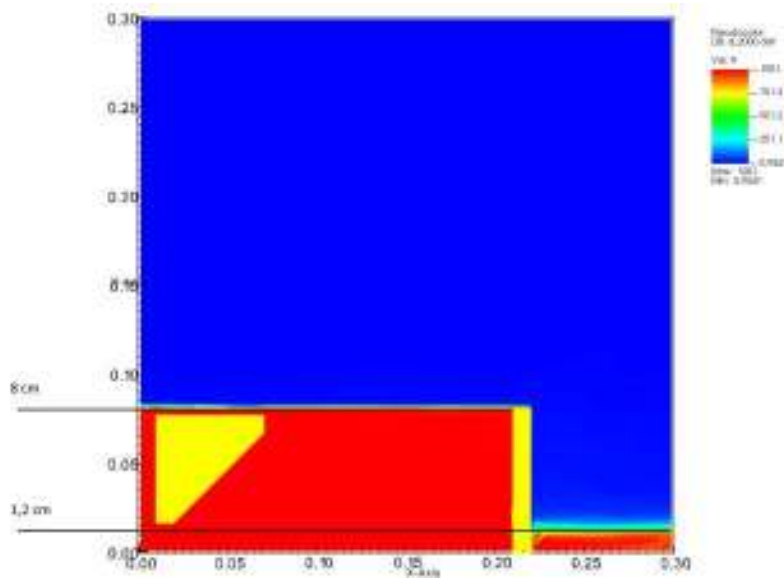


FIGURE 8 – Retour à la statique

En analysant la figure, nous pouvons en déterminer :

$$S_f = h_fbp \times L_{bp} - S_s + h_fbs \times L_{bs} \quad (20)$$

$$S_f = 8 \times 21 - 23.5 + 1.2 \times 8 \quad (21)$$

$$S_f = 154.1 cm^2 \quad (22)$$

Avec S_f : surface finale; h_fbp : hauteur finale du bassin principal; S_s : surface du solide en cm^2 ; h_fbs : hauteur finale du bassin secondaire; L_{bs} : longueur du bassin secondaire.

Nous observons donc une différence de $S_f - S_i = 7.1 cm^2$, qui se traduit par une différence de $7.1 / (P \times L_{bs}) = 7.1 / (6 \times 8) = 0.14 cm$ (avec P la profondeur suivant l'axe Z de notre maquette) en trop sur la hauteur de notre bassin secondaire. Nous utiliserons cette valeur plus tard lors de la comparaison entre l'expérience et la simulation.

Nous pouvons en conclure que la simulation finale est conforme et de qualité, mais qu'il faudra prendre en compte la légère production d'eau lorsque nous effectuerons la comparaison.

5 Surverse expérimentale

Dans cette section, nous aborderons tous les différents aspects de l'évolution et de la construction de la maquette au cours du projet.

5.1 Prototype 1

La conception du premier prototype de maquette a été originellement pensée pour être réalisée à partir d'objets du quotidien qui peuvent être trouvés dans une maison. Notre cahier des charges n'avait pas encore été créé.



FIGURE 9 – Photo du prototype 1 de la maquette

Ainsi, la structure principale repose sur un bac en plastique qui a été compartimenté en deux pour accueillir le bassin principal ainsi que le bassin secondaire. Le barrage est composé d'une plaque de plexiglas associée à des joints en silicone qui assurent l'étanchéité entre les deux compartiments. Le système qui a été choisi pour générer une vague dans le bassin principal se compose d'un rail de guidage sur lequel coulissera un mobile en bois.

Le protocole expérimental se déroule de la manière suivante : un objet de masse connue est lâché d'une hauteur définie dans le but de venir percuter la plaque de bois du mobile. Celui-ci va alors se mettre en mouvement grâce au transfert d'énergie cinétique, pénétrer dans l'eau et donc générer une vague.

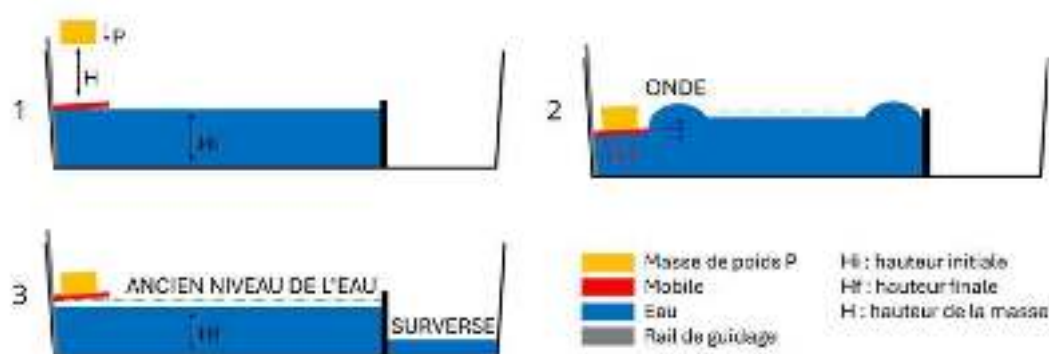


FIGURE 10 – Schéma de l'expérimentation

Cependant, il est rapide de constater que le protocole expérimental ainsi que la maquette comportent beaucoup de défauts, que ce soit sur le plan de la reproductibilité numérique de l'expérience avec le code CERF ou encore de la qualité intrinsèque de la maquette. Celle-ci ne se révèle pas très précise, notamment en raison d'importantes forces de frottement induites par le rail de guidage, ou encore un facteur humain trop présent dans l'expérience. Par exemple, le tableau ci-dessous présente les résultats d'une série d'expérimentations effectuée sur cette maquette. On y remarque une dispersion significative des valeurs ainsi que des maxima assez éloignés.

Essai	Hi	Hf	Diff
E1	6,50	6,27	0,23
E2	6,50	6,30	0,20
E3	6,50	6,25	0,26
E4	6,50	6,26	0,24
E5	6,50	6,29	0,22
E6	6,50	6,20	0,30
E7	6,50	6,32	0,18
MOYENNE	—	—	0,23

TABLE 2 – Différence du niveau de l'eau en cm (prototype 1).

Le but étant de reproduire le plus fidèlement possible le cadre de la simulation, nous avons donc très vite vu la nécessité de trouver une méthode plus rigoureuse.

5.2 Fabrication additive

Face aux limites évidentes du premier prototype, nous nous sommes alors tournés vers la fabrication additive (impression 3D). Nous allons étudier en détails ce type de fabrication car elle joue un rôle clé dans la construction de notre maquette. Ce type de procédé offre de nombreux avantages, comme une liberté quasi-totale en matière de modélisation géométrique, de design, tout en proposant un large choix de matériaux. Le tout à un coût relativement faible comparé à d'autres types de fabrication industrielle. Cela nous permet d'élargir drastiquement le champ des possibilités quant à la création de notre maquette en fabriquant des pièces sur mesure.

Afin de pouvoir réaliser des pièces de bonne qualité et robustes, il convient de comprendre le principe de la fabrication additive mis en œuvre ici. A l'inverse de la fabrication soustractive, ce procédé repose sur l'extrusion d'un filament thermoplastique à travers une buse chauffée. La matière est déposée par couches de 0,08 à 0,20 mm, pour une buse standard de 0,4 mm, sur un plateau de construction pour former ainsi une pièce en 3D.

Pour réaliser ces impressions, nous utilisons une imprimante 3D de la marque Creality, plus précisément la ENDER 3 V3 SE. Celle-ci a préalablement subi de légères modifications et optimisations au niveau matériel et logiciel pour améliorer et faciliter son fonctionnement. Ce modèle dispose d'un volume d'impression de $220 \times 220 \times 250$ mm. Il peut atteindre une vitesse d'impression maximale de 250 mm/s, et permet d'imprimer dans les matériaux plastiques les plus populaires dans ce domaine, tels que le PLA (Acide PolyLactique) ou encore le PET-G (PolyÉthylène Téréphtalate Glycolisé).

Pour la maquette, le choix du matériau s'est orienté vers le PLA. Ce choix a été dicté par sa disponibilité immédiate sans investissement supplémentaire, ainsi que par des conditions environnementales. En effet, l'absence d'enceinte isotherme combinée à la fraîcheur hivernale de la pièce aurait accentué le risque de gauchissement (déformation lors de l'impression : *warping*) sur des matériaux tels que le PET-G, qui nécessitent une température d'impression plus élevée que celle du PLA.



FIGURE 11 – Creality Ender 3 V3 SE

La plupart des machines de fabrication additive, tout comme les autres machines de type CNC (*Computer Numerical Control*), exploitent des fichiers au format G-code. Le G-code est l'un des plus anciens langages de programmation encore largement utilisés aujourd'hui. Pour une imprimante 3D, le G-code est une liste d'instructions précises, comme des coordonnées de déplacement ou des températures, que la machine exécute pas à pas. Afin d'obtenir ce G-code, il est nécessaire d'utiliser un logiciel de tranchage (*slicer*), qui va non seulement décomposer le modèle 3D que nous lui fournissons en entrée (communément au format STL : *StereoLithography*) en couches successives, mais aussi nous permettre de modifier un certain nombre de paramètres d'impression.

5.2.1 Paramétrage de l'impression

La majorité des problèmes lors des impressions 3D sur des machines modernes proviennent d'une erreur humaine, comme un mauvais paramétrage ou encore une préparation inadéquate de la machine. C'est pourquoi il est important de configurer correctement l'impression avant son lancement et de prendre en compte les contraintes mécaniques et environnementales auxquelles sera soumise la pièce. Dans notre cas, nous devons concevoir une structure suffisamment robuste et étanche.

- **Hauteur de couche** : Tout d'abord, il convient de déterminer la hauteur de couche à adopter. Comme énoncé précédemment, cette hauteur, pour une buse standard de diamètre 0,4 mm, varie de 0,08 mm à 0,20 mm et est un facteur de qualité visuelle. Dans notre cas, afin de limiter le nombre d'interfaces inter-couches qui augmentent la porosité de l'ensemble et les risques de micro-fuites, nous choisirons une hauteur de couche de 0,20 mm.
- **Remplissage** : Malgré ce que l'on pourrait penser, il est extrêmement rare de réaliser une impression pleine car cela nécessite énormément de ressources en temps et en matériaux. On ajuste alors le taux et la forme du remplissage en fonction des besoins. Biroosz et al. (2022) ont démontré que la forme de remplissage gyroïde se distingue notamment par une très bonne répartition des forces lors des essais. Par exemple, des éprouvettes rectangulaires avec un taux de remplissage de 25% , ont permis d'atteindre une résistance à la rupture de 400 N. De plus, ce motif prévient les croisements de trajectoire sur la même couche, comme ceux créés par le motif en grille. L'utilisation du motif gyroïde avec un remplissage de 25% est donc ici privilégiée pour assurer une bonne intégrité structurelle aux pièces fabriquées.

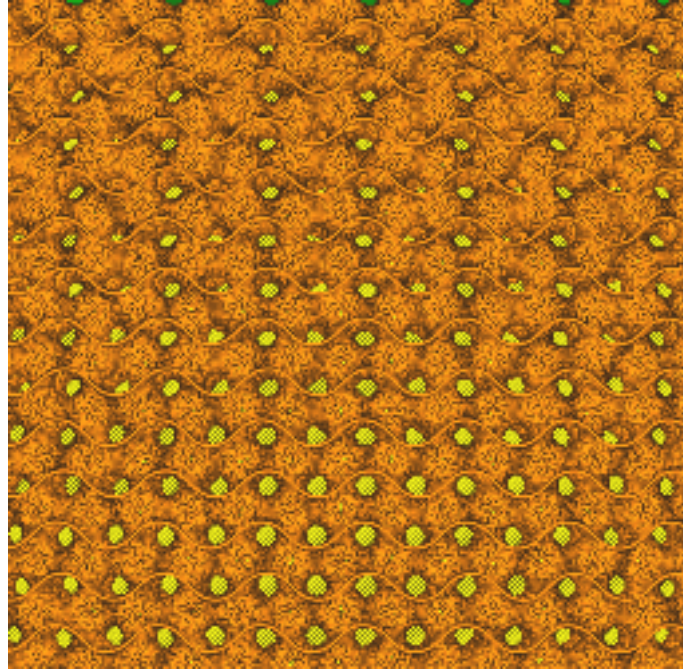


FIGURE 12 – Motif gyroïde de remplissage (25%)

- **Température** : La température cible dépend du type de matériau que nous utilisons. Pour le cas du PLA, la plage de température recommandée pour la buse est située entre 190°C et 230°C. Dans le but de minimiser les infiltrations d'eau entre les couches et donc de maximiser l'étanchéité des pièces, nous devons les fusionner au maximum en utilisant une température élevée. Néanmoins, nous avons vu que cela favorise le gauchissement. Nous utiliserons donc une température cible de 220°C qui se trouve être un bon compromis.
- **Parois** : Enfin, nous avons opté pour l'utilisation d'un minimum de 4 parois, toujours dans l'optique de maximiser l'étanchéité de nos pièces.

5.3 Prototype 2

5.3.1 Fabrication

Grâce aux conclusions tirées du premier prototype et suite à l'établissement du cahier des charges présenté précédemment, la modélisation du second prototype a été initiée. La conception et la modélisation des pièces nécessaires à la fabrication de notre maquette ont été réalisées grâce au logiciel de CAO SOLIDWORKS 2025.

Pour sa fabrication, il avait été initialement prévu que la maquette soit composée de seulement deux sections pour permettre l'impression sur le plateau de construction de notre machine et limiter les zones de fuite potentielles. Cependant, des contraintes techniques telles que le gauchissement pour de grandes impressions mais aussi des contraintes de temps ont forcé l'impression en trois sections distinctes pour une meilleure qualité.

Comme l'illustre la figure 13, cette segmentation a été effectuée dans le bassin principal.

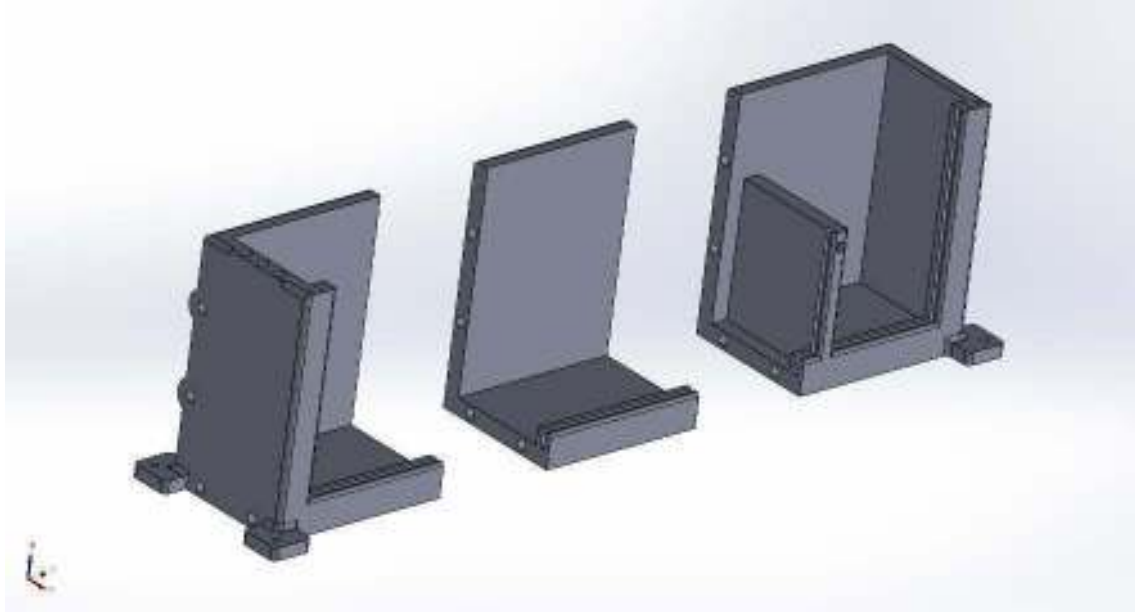


FIGURE 13 – Modèle 3D des sections de la base de la maquette

Afin de pouvoir observer la surverse, l'un des murs est constitué d'une plaque de plexiglas de 2 mm d'épaisseur. L'étanchéité est assurée par l'encastrement de la plaque dans une rainure dédiée, scellée au silicone.

L'impression en trois sections a imposé des solutions de renforcement structurel pour garantir la rigidité et l'étanchéité de l'ensemble. Ainsi, les trois sections sont boulonnées ensemble par des tiges filetées en acier traversant leur base ainsi que les murs sur toute la longueur de la maquette. Du silicone permet de finir de sceller l'espace entre les sections. L'ensemble est également solidarisé à une planche de bois afin de faciliter son déplacement sans risquer de déformer la structure. Enfin, afin d'assurer un alignement parfait lors de l'assemblage, les zones de contact inter-sections ont fait l'objet d'un surfacage par ponçage pour garantir une planéité optimale.

Maintenant que la base de la maquette a été réalisée, l'étape suivante concerne l'étude du système de génération de vagues. Ce dernier est constitué d'un surplomb qui va venir s'emboîter sur le mur, et est destiné à suspendre le solide grâce à un fil vertical. Le déplacement de ce mobile est assuré par deux rails de guidage, qui lui imposent un mouvement uniquement vertical dans le but de réduire le plus possible l'espace entre le solide et la paroi du bassin principal, tout en limitant les frottements. On réduit cet espace au maximum pour rester dans le cadre imposé par le modèle de surverse numérique en 2D, et éviter au maximum que l'eau ne s'infiltre sur les côtés.

Dans notre surverse numérique, notre solide est constitué d'eau et possède donc une masse volumique $\rho_e = 1000 \text{ kg/m}^3$. Or ici le solide est fabriqué en PLA, celui-ci possède une masse volumique de $\rho_p = 1250 \text{ kg/m}^3$. Pour compenser cela, nous avons donc abaissé la densité du remplissage de notre solide lors de son impression pour atteindre la masse volumique de l'eau :

$$\rho_v = R \times \rho_p \quad (23)$$

$$R = \frac{\rho_v}{\rho_p} = \frac{1000}{1250} \quad (24)$$

$$R = 0.8 \quad (25)$$

$$(26)$$

Avec ρ_v : la masse volumique visée ; ρ_p : la masse volumique du PLA ; R : le remplissage en pourcentage.

En imprimant notre solide avec un taux de remplissage de 80%, nous lui donnons donc théoriquement une masse volumique similaire à celle de l'eau. Cependant, des tests ont montré que la présence des parois du solide, avec un taux de remplissage de 100%, alourdit l'ensemble. Il est donc préférable, pour pallier cela, de prendre un taux de remplissage de 77% .

Enfin, afin de garantir la précision des mesures, un déflecteur a été installé en bout de barrage, la plaque de plexiglas avant a été agrandie et une seconde plaque a été ajoutée sur la face arrière. Ces éléments empêchent les projections d'eau hors de la structure, ce qui aurait pour effet de fausser les niveaux d'eau finaux. Des graduations ont également été marquées sur le plexiglas afin de pouvoir prendre des mesures efficaces lors de l'expérience.

La figure 14 ci-dessous représente l'assemblage de toutes les pièces qui ont été imprimées pour ce projet. En rouge, nous avons le système de génération de vagues avec le surplomb, les deux supports pour les rails ainsi que le solide. En bleu, nous retrouvons le déflecteur ainsi que le support pour la plaque de plexiglas arrière. Enfin, en jaune, nous observons les trois sections qui forment la base de la maquette.

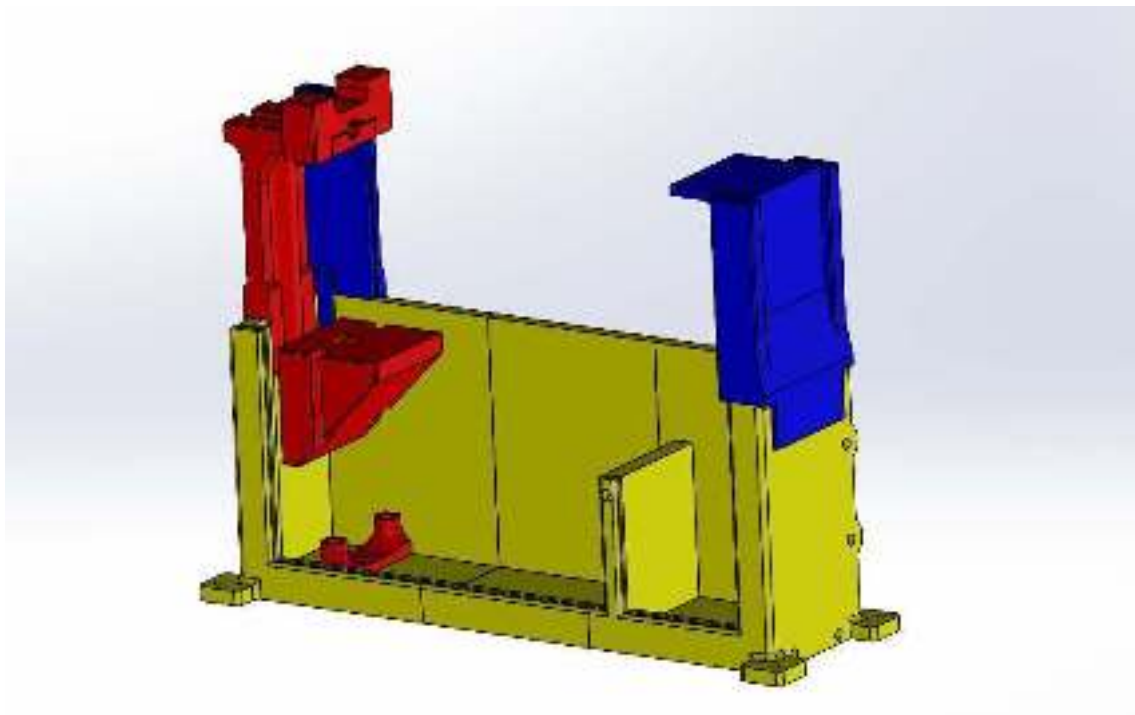


FIGURE 14 – Prototype 2, assemblage de la modélisation 3D

Après plus d'une centaine d'heures d'impression, nous avons pu procéder à l'assemblage de la maquette sans rencontrer de problèmes majeurs. Nous avons également procédé à des tests en eau pour repérer et sceller toutes les fuites, qui se concentraient uniquement sur l'espace entre le plexiglas et la structure.

5.3.2 Mise en œuvre

Maintenant que nous avons fabriqué notre maquette, et après avoir vérifié son étanchéité, nous allons pouvoir procéder aux expérimentations. Le protocole reste le même que celui détaillé dans le cahier des charges : le solide est lâché d'une hauteur de 7 cm au-dessus de l'eau grâce à un fil et provoque une onde qui se propage et va créer une surverse.

Afin de vérifier la précision et la répétabilité de l'expérience, nous mesurons pour cela le niveau d'eau dans le bassin secondaire après le retour à la statique. Lors de cinq essais, nous mesurons :

Essai	H_f
E1	1,00
E2	1,01
E3	0,58
E4	1,02
E5	1,00
MOYENNE	1,00

TABLE 3 – Niveau d'eau dans le bassin secondaire après surverse en cm (prototype 2)

Dans ce tableau, nous observons une grande cohérence des valeurs, à l'exception de l'essai 3, que l'on peut qualifier de valeur aberrante. Cette anomalie s'explique majoritairement par une erreur de manipulation survenue lors de la chute du solide. En effet, le fil de suspension n'a pas été libéré de manière instantanée, mais a été retenu progressivement, ce qui a eu pour effet de freiner le solide et donc de fausser les résultats. Nous avons donc écarté cette valeur. Pour permettre une comparaison avec la surverse numérique, une vidéo de l'expérience a été réalisée lors de l'essai numéro 5, qui comporte une valeur dans la moyenne (moyenne hors valeur aberrante).

L'étude de la vidéo de la surverse expérimentale s'effectuera dans la section comparaison.

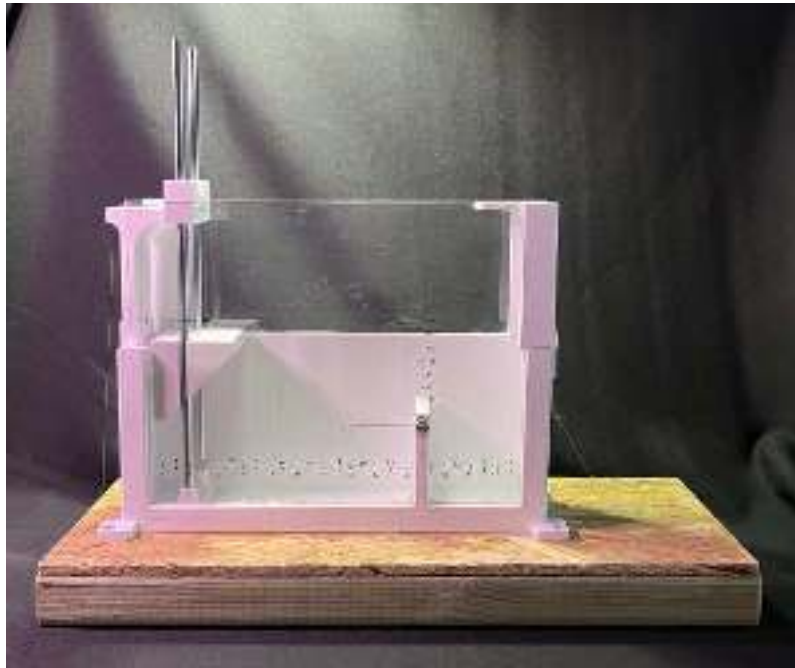


FIGURE 15 – Prototype 2, maquette finale

6 Comparaison

Dans cette section, nous analyserons en détail les résultats numériques et expérimentaux dans le but de les comparer et de tirer les conclusions nécessaires.

6.1 Analyse de la cinématique

Afin d'effectuer une comparaison qualitative et quantitative de nos deux expériences, nous allons analyser visuellement, et numériquement lorsque c'est possible, la cinématique et la propagation des vagues lors des deux expériences. Dans le but de comparer efficacement ces deux surverses, nous allons étudier cinq instants critiques de la cinématique de surverse du barrage. Nous diviserons l'analyse de la cinématique en 3 parties. Une première partie aura lieu lors de l'impact du solide et s'arrêtera avant la surverse. Une deuxième partie comportera la surverse ainsi que le retour à la statique. Et enfin, la troisième partie étudiera la statique avec les niveaux d'eau finaux dans chaque bassin. Chaque partie traitant de moments différents, nous établirons un protocole de comparaison adapté chaque fois. Par convention, lors de l'étude des photos de la maquette, nous négligerons sa profondeur et ferons l'approximation d'être en 2D. Par conséquent, l'axe X fera référence à l'horizontale et l'axe Y à la verticale

6.1.1 Phase 1 : Formation et propagation de l'onde

Dans cette première partie, nous analyserons la formation et la propagation de la vague. Pour cela, nous allons effectuer 3 mesures. Nous vérifierons que les deux photos que nous allons comparer ont été prises au même instant, en mesurant la distance entre la vague et le mur de gauche, avec comme point de référence le creux de celle-ci. Puis, nous déterminerons les coordonnées de la crête de la vague.

Dans ce premier instant, nous pouvons déterminer que la vague a une position d'environ $X_v = 14,1cm$. Ces photos ont donc été prises au même moment, nous pouvons alors déterminer les coordonnées du haut de la vague :

- Surverse numérique : $X_h = 15,3$; $Y_h = 13,6$
- Surverse expérimentale : $X_h = 15,4$; $Y_h = 13,3$

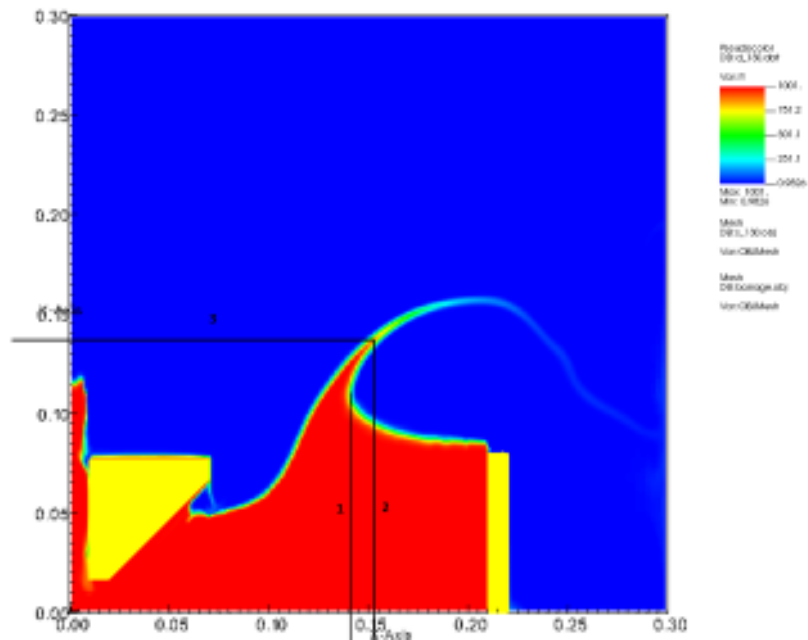


FIGURE 16 – Instant 1 : Surverse numérique

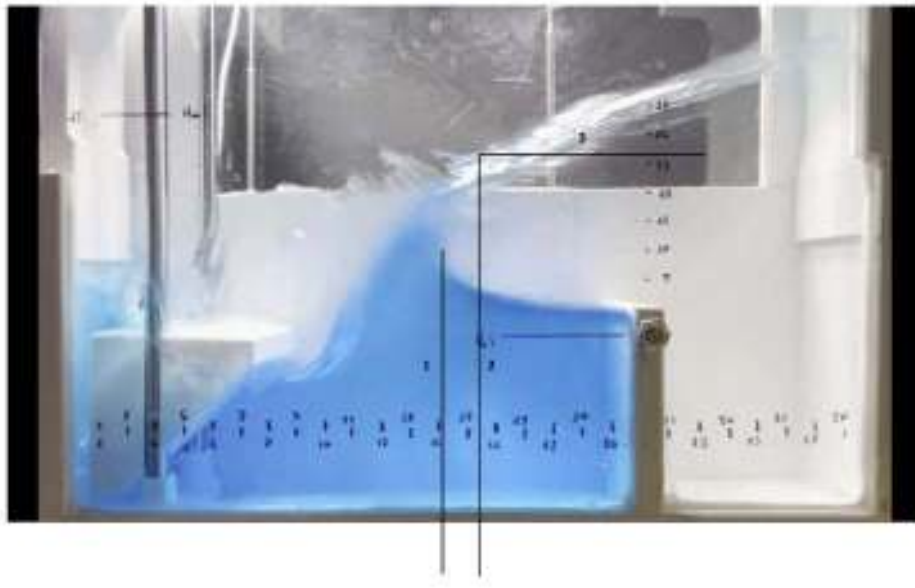


FIGURE 17 – Instant 1 : Surverse expérimentale

Nous allons maintenant répéter l'opération avec le deuxième instant, représenté par la figure 18 et la figure 19.

Pour la vague, avec une position d'environ $X_v = 16,5\text{cm}$, les coordonnées du haut de la vague sont :

- Surverse numérique : $X_h = 17,8$; $Y_h = 12,9$
- Surverse expérimentale : $X_h = 18,0$; $Y_h = 12,6$

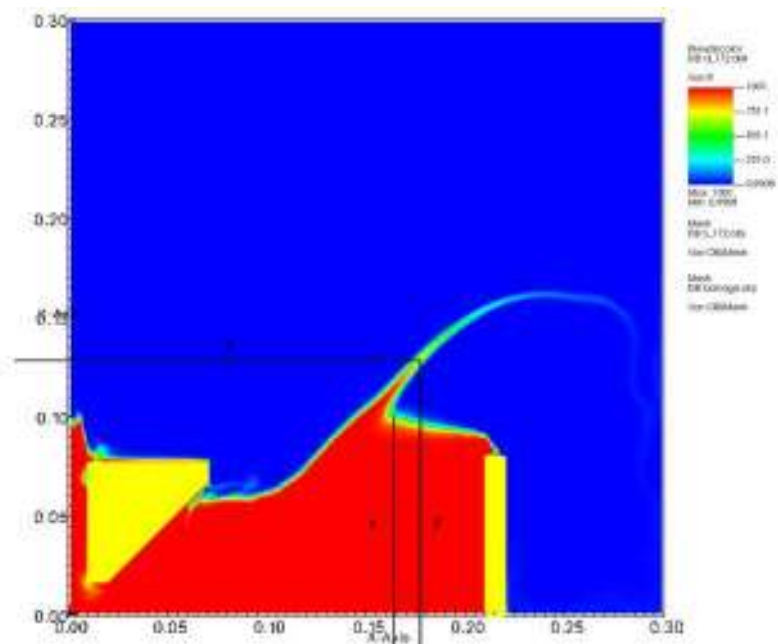


FIGURE 18 – Instant 2 : Surverse numérique

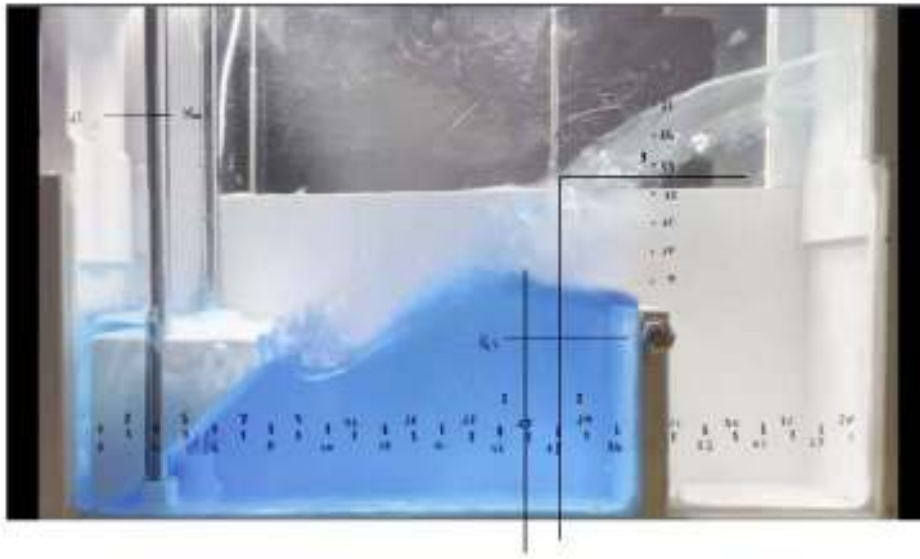


FIGURE 19 – Instant 2 : Surverse expérimentale

En conclusion, bien que la surverse numérique génère une vague légèrement plus haute que celle observée expérimentalement, l'écart reste mineur et peut très facilement s'expliquer par des approximations qui ont précédemment été faites. La cinématique globale de la simulation s'avère aussi très fidèle aux observations et aux mesures réelles, validant ainsi cette première partie.

6.1.2 Phase 2 : Surverse et retour à la statique

Dans cette deuxième partie, nous analysons la surverse du barrage et le retour à la statique. Pour cela, nous effectuons dans un premier temps une série de mesures pour l'étude du troisième instant. Puis nous comparerons le mouvement de la masse d'eau après la surverse, durant le retour à la statique.

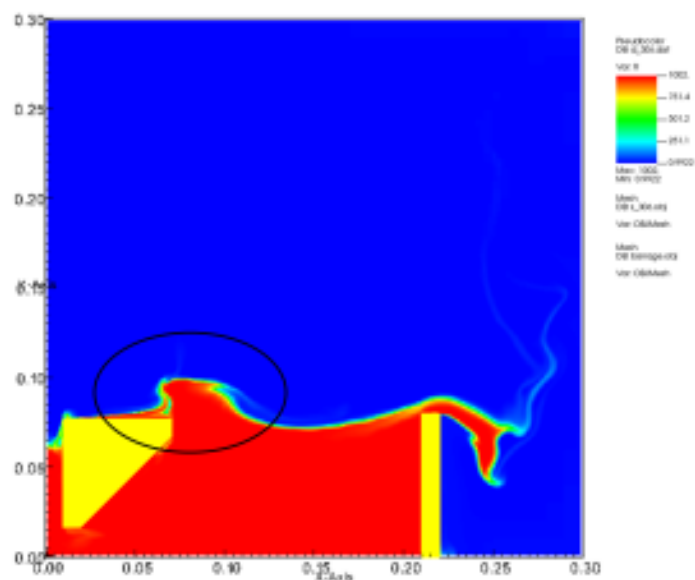


FIGURE 20 – Instant 3 : Surverse numérique

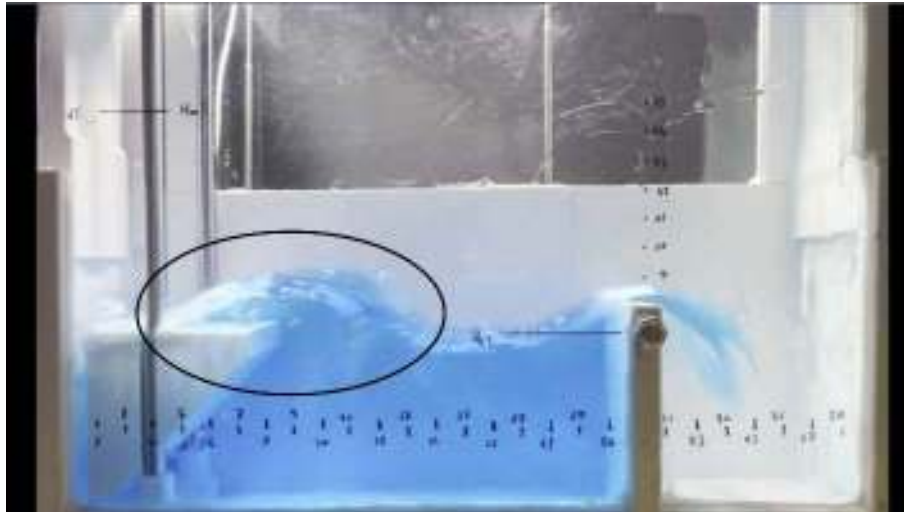


FIGURE 21 – Instant 3 : Surverse expérimentale

Nous retrouvons encore une fois sur les deux figures une très grande similitude pour la cinématique. La seule différence notable réside dans la formation de la vague juste à l'avant du solide, ici entouré en noir sur les deux figures. Nous observons que dans la surverse numérique, cette vague s'apprête à passer au dessus du solide, alors que dans la surverse expérimentale, celle-ci a déjà recouvert partiellement le solide.

Cette onde va d'ailleurs se propager selon l'axe des X positifs et créer à nouveau une surverse dans nos deux expérimentations.

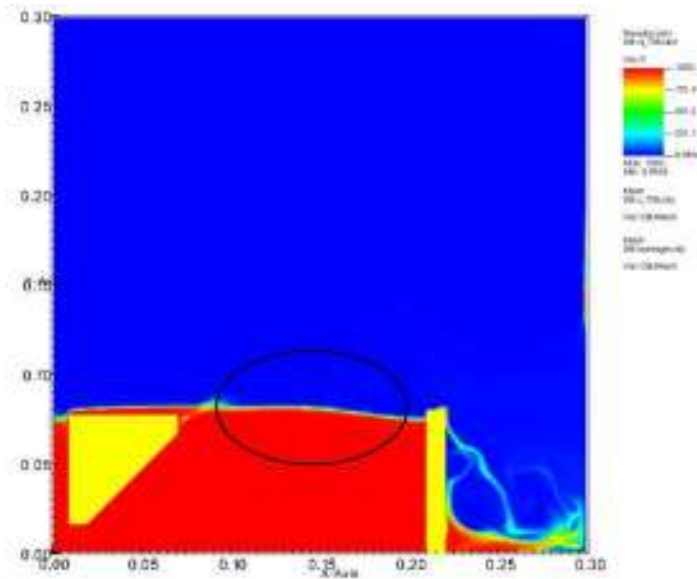


FIGURE 22 – Instant 4 : Surverse numérique

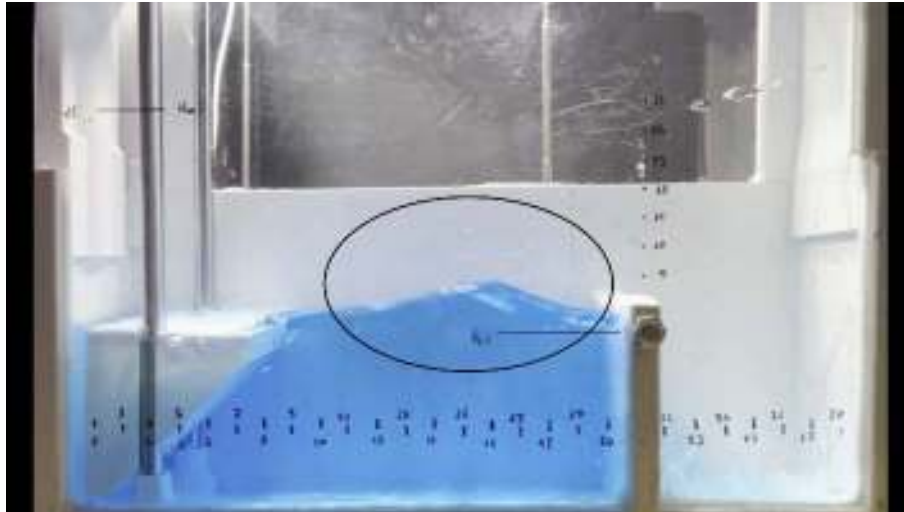


FIGURE 23 – Instant 4 : Surverse expérimentale

Enfin, après la deuxième surverse que nous pouvons observer dans la figure 22, nous retrouvons une vague se propageant suivant l'axe des X négatif sur la figure 23, ici également entourée en noir. Or, dans l'expérience numérique, nous ne la distinguons pas réellement.

Pour conclure cette partie, les différences se sont légèrement accentuées, notamment à la fin, avec l'absence d'un retour de la vague. Mais le tout reste encore similaire et les différences peuvent encore une fois être expliquées par des approximations.

6.1.3 Phase 3 : État statique final

Enfin, nous allons analyser la statique, c'est à dire les niveaux d'eau finaux dans chaque bassin une fois la surverse passée. Comme énoncé précédemment dans la Section 4.4.3 la surverse numérique possède 0,14 cm d'eau en trop. Nous devons donc prendre en compte cette quantité d'eau en plus lors de la comparaison.

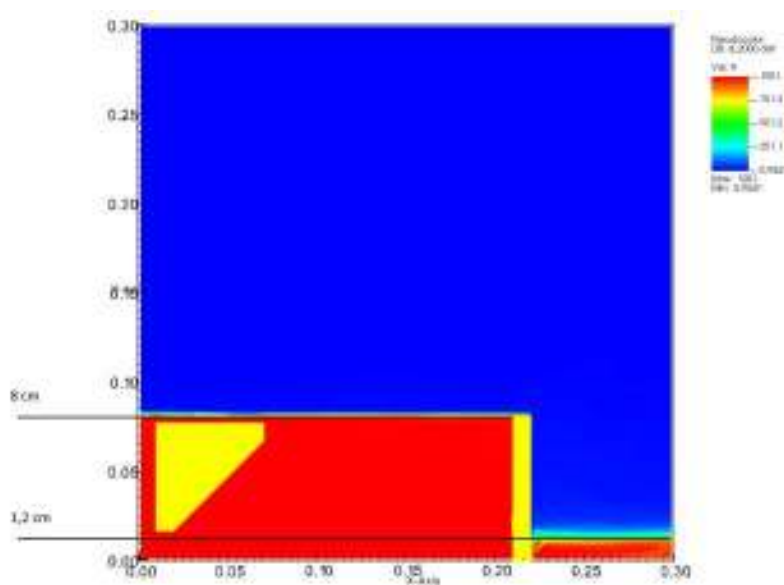


FIGURE 24 – Statique : Surverse numérique

Surverse numérique :

- Bassin principal : $h_1 = 8,00cm$
- Bassin secondaire : $h_2 = 1,20cm$
- Bassin secondaire après correction : $h_2 = 1,06cm$

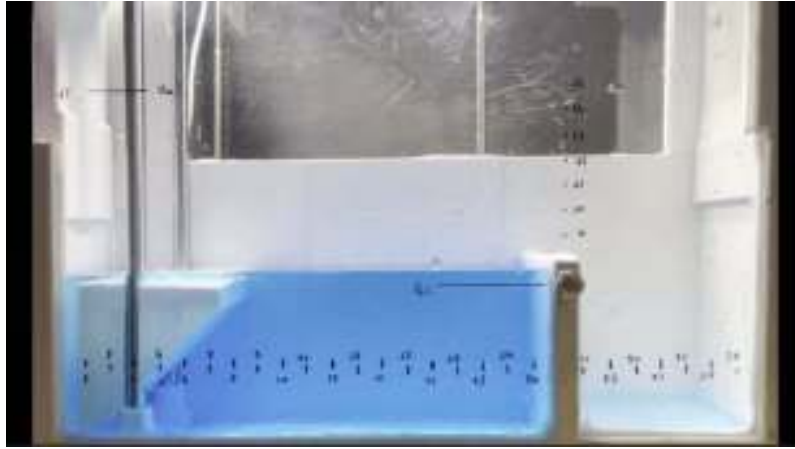


FIGURE 25 – Statique : Surverse expérimentale

Surverse expérimentale :

- Bassin principal : $h_1 = 7,80cm$
- Bassin secondaire : $h_2 = 1,00cm$

Nous constatons qu'après l'application de la correction sur le bassin numérique secondaire, les niveaux d'eau finaux concordent fortement. L'écart n'est que de 2,5% pour le bassin principal et de 3,8% pour le bassin secondaire après correction, ce qui valide définitivement l'état statique du modèle numérique en vérifiant la conservation de la masse d'eau et en appliquant les corrections si nécessaire.

6.2 Interprétation des écarts

Nous pouvons déduire, au vu des résultats précédents, que la cinématique globale de la simulation numérique reproduit fidèlement celle de notre expérimentation, en particulier jusqu'à la première surverse. Nous constatons cependant un léger écart en fin de processus. Cela s'explique par les approximations du modèle physique, notamment le fait de négliger la viscosité du fluide.

L'hypothèse la plus probable pour justifier ces écarts se trouve dans une dissipation d'énergie beaucoup moins prononcée au sein de la simulation numérique comparée à l'expérimentation réelle. Ce phénomène peut s'expliquer par l'approximation de la 2D, mais également par des effets de bord qui n'introduisent aucun frottement dans la simulation, contrairement aux parois réelles en PLA de notre maquette. Ainsi, la vague numérique conserve une plus grande amplitude lors de la Phase 1, ce qui engendre une surverse initiale, puis secondaire, plus importante comme mis en évidence lors de la Phase 3. L'amplitude de cette seconde surverse numérique étant supérieure à celle observée expérimentalement, une plus grande quantité d'eau a franchi le barrage et, par conséquent, l'onde s'est moins réfléchi sur la paroi. Cela explique également l'atténuation, voire l'absence, de la vague de retour détaillée dans la Phase 2.

Il est également important de noter que toutes les mesures ainsi que les impressions 3D sont sujettes à des incertitudes :

- L'épaisseur du ménisque de l'eau pour la surverse expérimentale, l'interface air/eau pour la surverse numérique et la lecture visuelle induisent une incertitude sur les hauteurs finales.
- L'impression 3D engendre de faibles tolérances dimensionnelles. De plus, la porosité du PLA fait qu'il est susceptible d'absorber une faible quantité d'eau.

Pour une comparaison visuelle globale, voici ci-dessous la vidéo de la surverse expérimentale et numérique côte à côte :

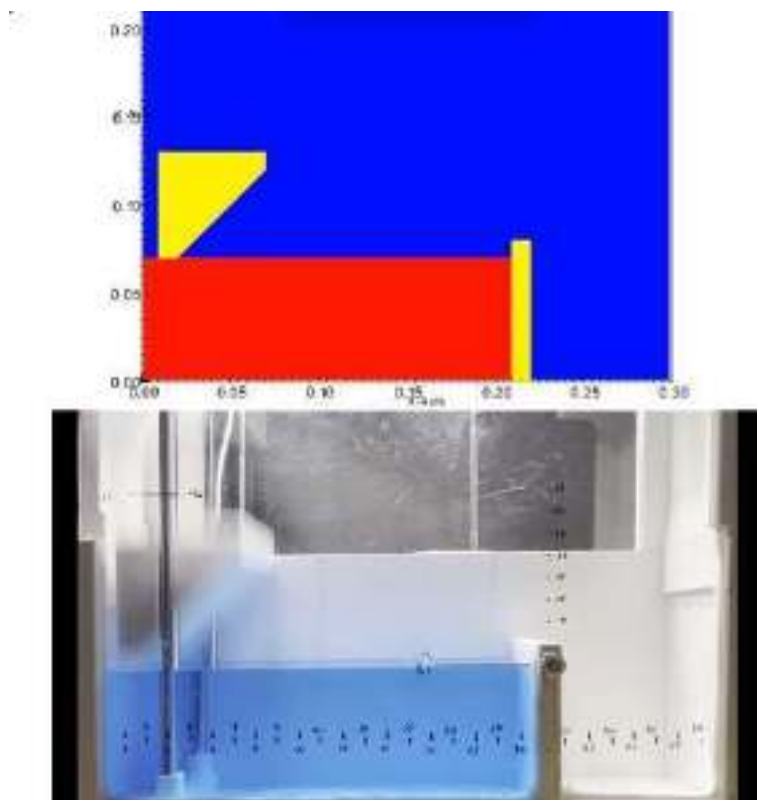


FIGURE 26 – Vidéo comparative de la surverse numérique et expérimentale. *Cliquez ici pour visionner la vidéo.*

7 Conclusion et perspectives

Pour conclure, ce projet personnel de recherche avait pour objectif d'étudier la complémentarité et le couplage entre la simulation numérique et l'approche physique expérimentale en mécanique des fluides, à travers le cas d'étude de l'impact d'un solide (*water entry*) provoquant la surverse d'un barrage. En confrontant les résultats issus du code de calcul CERF à ceux obtenus via une maquette physique conçue par fabrication additive, nous avons pu apporter des éléments de réponse quantitatifs et qualitatifs à notre problématique initiale.

Les recherches menées pour la surverse numérique ont mis en évidence la pertinence du modèle eulérien bi-fluide isotherme par rapport au modèle de Saint-Venant, pour recréer une surverse de barrage. Bien que les simulations préliminaires aient révélé des problèmes concernant la fréquence de remaillage ou encore la durée totale de celle-ci, la simulation finale a démontré un excellent suivi des interfaces air/eau/objets. De plus, l'obtention d'un maillage de bonne qualité a permis de garantir une certaine fiabilité pour notre surverse numérique.

Parallèlement, l'analyse des erreurs d'un premier prototype a permis de concevoir une maquette finale optimisée grâce à la fabrication additive. Les paramètres retenus pour ces impressions, notamment l'usage du thermoplastique PLA, d'un motif gyroïde et d'une densité de remplissage adaptés aux pièces, ainsi que l'élimination d'un maximum de biais humains, ont assuré une excellente répétabilité de l'expérience et ont drastiquement augmenté la fiabilité de nos mesures.

La confrontation directe des deux approches lors de l'analyse de la cinématique valide pleinement l'efficacité de ce couplage. L'écart observé sur l'amplitude de la crête de la vague initiale reste minime. De plus, après l'application d'une correction sur la conservation de la masse d'eau (hauteur compensée de 0,14 cm), les niveaux d'eau finaux affichent une très bonne concordance. Les écarts calculés sont de l'ordre de 2,5% pour le bassin principal et de 3,8% pour le bassin secondaire, et attestent de la grande fidélité de notre modélisation.

Enfin, les divergences mineures identifiées en fin de processus, notamment l'atténuation plus marquée de la vague de retour dans l'expérience, s'expliquent de manière cohérente. Elles découlent de l'hypothèse de la viscosité négligée dans le modèle d'Euler ($\eta = 0$), ainsi que des effets de bord et de frottement contre les parois en PLA, absents par définition de la simulation en 2D. Ces mécanismes drainent plus rapidement l'énergie de la vague dans la maquette et provoquent ainsi les écarts observés.

En somme, ce travail démontre que l'outil numérique et l'expérimentation physique ne s'opposent pas, mais sont complémentaires et s'alimentent mutuellement. La simulation permet d'accéder rapidement à une description détaillée des phénomènes de *water entry* et de surverse, tandis que l'expérimentation fournit une validation indispensable des résultats obtenus. Leur couplage constitue ainsi une méthode robuste permettant d'étudier ces phénomènes avec une grande précision, tout en identifiant et prenant en compte les limites propres à chaque approche.

Afin d'approfondir cette étude et d'affiner la précision des résultats obtenus, plusieurs axes de développement méritent d'être explorés. En premier lieu, une transition vers une simulation en trois dimensions à l'aide du code CERF permettrait de s'affranchir des limites du modèle 2D actuel, en dépit d'un coût en temps de calcul numérique nettement plus élevé.

Par ailleurs, l'optimisation matérielle de la structure expérimentale constitue une piste d'amélioration majeure. Le remplacement du thermoplastique PLA par un matériau plus robuste et hydrophobe permettrait de limiter la fatigue mécanique de la maquette et d'assurer une meilleure durabilité face aux contraintes répétées. Enfin, la conception d'un système mécanique ou électromagnétique automatisé pour le levage et le lâchage du solide permettrait d'éliminer presque totalement le biais humain de l'expérience, garantissant ainsi une répétabilité parfaite et une plus grande rigueur lors des futurs essais expérimentaux.

8 Bibliographie

Altazin, T., Ersoy, M., Golay, F., Sous, D., et Yushchenko, L. (2016). Numerical investigation of BB-AMR scheme using entropy production as refinement criterion. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*.

Birosz, M. T., Ledenyák, D., et Andó, M. (2022). Effect of FDM infill patterns on mechanical properties. *Polymer Testing*, 113, 107654. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107654>

Brébec, J.-M., Guéneau, P., Mallet, J.-M., et al. (2021). *Physique MPSI/PTSI* (2e éd.). Dunod.

Golay, F. (2019). *Écoulements multi-fluides [Cours]*. Seatech.

Golay, F. (2026). *CERF : Computation, ERosion and Flow V1.0*. IMATH, Université de Toulon.

Golay, F., et Helluy, P. (2007). Numerical schemes for low Mach wave breaking. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 21(2), 69–86. <https://doi.org/10.1080/10618560701343382>

9 Annexes

Annexe 1 :

```

PHYS 0
MODE 2.
GPES 2
SHAR 0.02
!-----

MAME      1      1
0. 0.3  0. 0.3
30 30
!-----

INIT      2      2
-0.1 0.31 -0.1 0.31 -0.1 0.1
1. 0. 0. 0. 1.e5 0.
-0.1 0.21 -0.1 0.07 -0.1 0.1
1000. 0. 0. 0. 1.e5 0.

!-----

COND      1      0
1
1
1
1

!-----

MESH 0
NBDS 8
MARL 4
COPA 0.9
REPA 3
NZRA 4
0 -0.1 0.4 -0.1 0.4 -0.1 0.1
4 0.0 0.23 0.06 0.09 -0.1 0.1
4 0.20 0.23 0.0 0.06 -0.1 0.1
4 0. 0.08 0.05 0.15 -0.1 0.1

!-----

OBST      0      2
barrage.obj 1000. -1
bloc.obj 1000. 3

!-----

NUME 0
TINT 0.001
CCFL .9
SDOR 2.
TDOR 2.
TIME 1
SAVE 1.

```

Annexe 2 :

Le solide :

```
v 0.01 0.15 -0.01
v 0.07 0.20 -0.01
v 0.07 0.21 -0.01
v 0.01 0.21 -0.01
v 0.02 0.15 -0.01
v 0.01 0.15 0.01
v 0.07 0.20 0.01
v 0.07 0.21 0.01
v 0.01 0.21 0.01
v 0.02 0.15 0.01
f 1 2 5
f 1 4 2
f 4 3 2
f 6 10 7
f 6 7 9
f 9 7 8
f 1 6 9
f 1 9 4
f 4 9 8
f 4 8 3
f 3 8 7
f 3 7 2
f 2 7 10
f 2 10 5
f 1 5 10
f 1 10 6
```

Le barrage :

```
v 0.21 0.00 -0.01
v 0.22 0.00 -0.01
v 0.22 0.08 -0.01
v 0.21 0.08 -0.01
v 0.21 0.00 0.01
v 0.22 0.00 0.01
v 0.22 0.08 0.01
v 0.21 0.08 0.01
f 1 2 3
f 1 3 4
f 2 6 7
f 2 7 3
f 6 5 7
f 5 8 7
f 5 1 4
f 5 4 8
f 3 4 7
f 4 7 8
f 2 5 6
f 2 1 5
```

Annexe 3 :

```

SUBROUTINE fct_mvsl(v1,v2,v3,o1,o2,o3,num)
!.1----- Implicit, Use
  use phy_typ
  IMPLICIT NONE
!.2----- Declaration
  real(kind=kind(0.d0)), intent(out) :: v1,v2,v3
  real(kind=kind(0.d0)), intent(out) :: o1,o2,o3
  integer, intent(in) :: num

  v1=0.d0
  v2=0.d0
  v3=0.d0
  o1=0.d0
  o2=0.d0
  o3=0.d0

  select case (num)

!  Mouvement du batteur
    case(1)
      v1=-4.d-1*datan(1.d0)*sin(4.d0*datan(1.d0)*tc)

!  Mouvement du batteur
    case(2)
      v1=-0.2d0*4.d0*datan(1.d0)*sin(4.d0*datan(1.d0)*tc)

!  Mouvement du prisme
    case(3)
      if(tc.le.0.058d0)then !si tps <= a un nmbre a definir
        v2 = -1.15d0 / (1.0d0 + (1.05d0 * 1.15d0 / 0.130d0) * tc)
      else
        v2=0.d0
      endif

!  Erreur
    case default
      call print_err('FCT_MVSOL',' Solide motion not defined!!')
      stop

  end select
END SUBROUTINE fct_mvsl
!DOCFIN

```

Annexe 4 :

```
\#!/bin/bash
./cerf\_input surv.inp          (1)
./cerf2tec

mv cerfout.dat d\_0.dat          (2)
mv cerfamr.dat d\_mame\_0.dat
cp solide.obj s\_0.obj

for i in $(seq 1 3000)           (3)
do
    mpirun --oversubscribe -np 8 ./cerf
    ./cerf2tec
    mv cerfout.dat d\_$_i.dat
    ./cerf\_amr
    mv solide\_002.obj s\_$_i.obj
    mv cerfamr.dat d\_mame\_$_i.dat
done
```