Université de Nice Sophia Antipolis

Projet Tuteuré de Licence de Physique

Année 2015

Simulation de Tsunami en laboratoire

Auteurs:
Bahia Benmbarek
Ayoub Houkmi
Enzo D'Ambrosio

Encadrants:
Lucie Rolland
Anthony Sladen
Clément Courde

Projet réalisé au *laboratoire Géoazur, Sophia Antipolis*

May 17, 2015

Sommaire

1 Introduction **1**
1.1 Présentation du sujet . . . 1
1.2 Problématique soulevée . . . 1
1.3 Plan du rapport . . . 1

2 Expérience et Modélisation **2**
2.1 La théorie du tsunami . . . 2
2.1.1 Les origines du tsunami . . . 2
2.1.2 La propagation . . . 3
2.2 Mise en oeuvre . . . 5
2.2.1 Expérience 1 . . . 6
2.2.2 Expérience 2 . . . 6

3 Résultats **7**
3.1 Méthode de mesure . . . 7
3.1.1 Expérience 1 et 2 . . . 7
3.1.2 La méthode FS-SS : Intercorrélation d'image et fonction "surfheight" . . . 7
3.2 Nos Mesures . . . 8

4 Analyse et commentaires **10**
4.1 Expérience 1 . . . 10
4.2 Expérience 2 . . . 10

5 Conclusion **12**

Annexes **2**

Annexe 1 **2**
1 Les différents graphes du cas d'étude théorique . . . 2

Annexe 2 **3**
1 La théorie . . . 3
2 Le tableau de valeurs sur la vitesse de propagation de la vague en fonction de la profondeur d'eau initial . . . 4
3 Motif de points aléatoires . . . 4

Références **5**

Chapitre 1

Introduction

1.1 Présentation du sujet

« Tsunami »
Raz-de-marée, catastrophe naturelle, vague déferlante, mur d'eau... Les noms ne manquent pas pour décrire ce phénomène redoutable généralement connu sous le nom de « tsunami » ; littéralement « vague de port » en japonais. Sa signification résume parfaitement l'idée générale que l'on s'en fait : le déferlement inattendu sur les côtes d'un gigantesque mur d'eau qui emporte tout sur son passage...
Considéré comme le phénomène naturel le plus destructeur de l'Histoire, l'ensemble des tsunamis répertoriés totalisent, sur les quatre derniers millénaires plus de 600 000 victimes au travers de 279 évènements. Notamment, le tsunami enregistré dans l'océan indien, le 26 décembre 2004, est l'une des catastrophes les plus meurtrières de ces 30 dernières années avec plus de 250 000 victimes dans son sillage [1].
Il est bien souvent difficile de comprendre ce qui fait d'un tsunami une telle force de la nature. Après quelques recherches préliminaires, il nous est apparu que pour mieux comprendre le phénomène, il fallait orienter nos recherches sur la mise en évidence, en laboratoire, des paramètres physiques qui régissent la propagation et l'amplitude d'un tsunami.Ce rapport présente les résultats de l'expérience de tsunami en laboratoire que nous avons réalisée depuis le dimensionnement du bassin jusqu'à la mise au point du dispositif d'acquisition de mesure précise de hauteur de vague. Plus spécifiquement, notre objectif était de répondre à la problématique suivante :

1.2 Problématique soulevée

Comment évolue un tsunami lors de sa propagation ?
Plus précisément, quelles sont les différentes caractéristiques au sein de cet écoulement ? Et quelles sont les influences de l'environnement qui peuvent faire varier ces caractéristiques de propagation, notamment son amplitude ?

1.3 Plan du rapport

Afin de répondre à cette problématique, il nous a fallu reconstituer un tsunami en laboratoire. Dans le but de pouvoir faire nos observations et réaliser une simulation numérique de la variation de l'amplitude en fonction du fond marin, deux expériences principales se sont notamment dégagées lors de nos travaux:

- une première qui tend à vérifier le lien entre la profondeur d'eau et la célérité de la vague ;
- une seconde, qui, par modélisation numérique, étudie les variations de l'amplitude de la vague selon le fond marin, et qui se retrouve être l'étude au cœur de notre projet.

Dans ce rapport, nous traiterons donc dans une première partie, de la théorie du tsunami, puis nous enchaînerons avec la description de nos expériences, avant de conclure sur nos mesures et les observations effectuées.

C'est ici que commence notre étonnant voyage dans le monde des tsunamis....

Chapitre 2

Expérience et Modélisation

Dans la culture populaire, les tsunamis correspondent à une catastrophe naturelle meurtrière, caractérisée par une vague destructrice, de très grande ampleur, déferlante sur les côtes. On se représente essentiellement ce phénomène comme un gigantesque mur d'eau qui se matérialise tel une gigantesque vague de surf... En réalité, il s'agit bien là d'une vision erronée puisqu'il est très rare que le tsunami se matérialise de la sorte, pouvant être plus généralement assimilé à une montée rapide du niveau de l'eau, dénommé communément « raz-de-marée » en français.

Néanmoins, le terme « raz-de-marée » étant trop imprécis, de par sa nature à regrouper les tsunamis et autres phénomènes de submersion marine, le terme de « tsunami » a été officialisé par le monde scientifique en 1963 [2].

Ce mur d'eau, pouvant parfois atteindre plusieurs dizaines de mètres de hauteur et que l'on associe généralement aux tsunamis, ne représente en vérité qu'un aspect du phénomène que nous allons tenter de décrire plus précisément.

D'un point de vue scientifique, le tsunami correspond à une série d'onde se propageant en milieu aquatique (océans, mers, lacs,...), caractérisé par une très grande période, dont l'ordre de grandeur varie de quelques minutes à plus d'une heure, ainsi que par une grande énergie déployée.

Sur le plan scientifique, nous pouvons découper ce phénomène en 3 phases :

- le déclenchement, ses origines;
- la propagation;
- le déferlement, non traité dans ce projet.

Dans le but de comprendre les caractéristiques d'un tsunami, il a fallu comprendre les deux premières phases du tsunami séparément pour pouvoir le modéliser dans son ensemble : depuis sa création jusqu'à son arrivée sur les côtes maritimes.

2.1 La théorie du tsunami

2.1.1 Les origines du tsunami

Il n'a pas toujours été évident de comprendre les causes qui pouvaient déclencher un tsunami. En effet, contrairement à l'étape de déferlement qui regroupe de multiples témoignages, on ne dispose que de peu d'observations du déclenchement d'un tsunami en milieu naturel ; d'une part, parce que l'origine se situe généralement loin du regard de l'Homme [1] et d'autre part, parce qu' un tsunami peut parcourir une très longue distance avant de déferler sur les côtes [2]. Il est donc assez difficile de faire le lien entre l'évènement déclencheur et le tsunami crée; d'autant que celui-ci est parfaitement imperceptible ... jusqu'à son arrivée sur la côte.

Aujourd'hui, nous savons qu'un tsunami peut avoir diverses origines, qui correspondent à des évènements devant déployer une énergie suffisante pour déplacer une grande masse d'eau.

Cela regroupe :

[1] exemple : le plancher océanique

[2] Celui qui a frappé l'Indonésie en 2004 a également causé de sérieux dommages en Somalie, située à plus de 5000 km de l'origine

- les séismes sous-marins d'une magnitude supérieure ou égale à 6.3, et dont l'épicentre se situe à moins de 50 km de la surface;
- des glissements de terrains;
- une explosion volcanique sous-marine;
- la chute d'un objet de grande ampleur tel une météorite, effondrement d'une montagne entière... [2][3]

Ces origines nous permettent immédiatement de différencier les perturbations à la surface de l'eau causées par le vent que l'on nomme des vagues, qui sont un phénomène dits de « surface », et les tsunami, qui correspondent à un déplacement d'une colonne entière d'eau, qui peut être causé par les événements cités plus haut, suivis par les effets de la gravité. Néanmoins, dans un souci de faciliter l'expression du rapport, nous utiliserons quelquefois par la suite, le terme de « vague », pour parler du « tsunami ».

Dans un premier temps, pour effectuer notre première expérience, nous avons utilisé un morceau de polystyrène pour provoquer une perturbation similaire à l'effondrement d'une montagne dans l'eau... Placé en surface, l'objet est enfoncé dans le liquide manuellement de manière continue. Néanmoins, la variation de hauteur d'eau, entre le moment qui précède la perturbation et celle qui la suit, étant trop important, il a fallu utiliser un autre système pour effectuer les mesures sur la deuxième expérience...

C'est pourquoi afin de modéliser le déclenchement d'un tsunami qui rempli cette condition, nous avons utilisé, dans un second temps, un "flotteur". Maintenu au fond de l'eau, il reste collé, un certain temps (environ 2 sec) au fond du bassin par effet ventouse. Puis, par la poussée d'Archimède, le flotteur remonte rapidement en surface, déplaçant la colonne d'eau et pouvant être assimilé à une origine tectonique.

Nous avons aussi eu l'idée, non réalisée par manque de temps, de trouver un flotteur plat et non cubique avec un système d'arrêt avant la surface pour modéliser plus correctement le déclenchement tectonique.

2.1.2 La propagation

La propagation du tsunami se résume en un déplacement dans deux milieux distincts :

- en eau profonde, soit le large dit « en haute mer » ;
- à l'approche des côtes maritimes .

Suivant ce milieu, certaines caractéristiques physiques du tsunami vont différer ...

1. Caractéristique fondamentales du tsunami

Comme nous l'avons dit précédemment un tsunami est une série d'onde, dont les caractéristiques fondamentales sont :

- une grande période T, dont l'ordre de grandeur est compris entre quelques minutes et plus d'une heure;
- une grande énergie mécanique
$$E = Ec + Ep \tag{2.1}$$
avec l'énergie cinétique Ec et l'énergie potentielle Ep.

2. Approximation eaux peu profondes

La plupart des tsunamis ont une longueur d'onde supérieure ou égale à la centaine de kilomètres. Leur longueur d'onde est donc très supérieure à la profondeur des océans qui ne dépasse pas la dizaine de kilomètres. C'est pourquoi, dans le cas des tsunamis on parle de « vague en milieu peu profond » (dit "shallow water").

$$\lambda = c * T \tag{2.2}$$

Avec c la célérité; λ la longueur d'onde; T la période;

En se basant sur le fait que la célérité diminue à l'approche des côtes et que la période reste constante, on en déduit que la longueur d'onde diminue également.

Afin de donner un ordre de grandeur, on estime que pour une période de 60 min, et une profondeur de 60 km, la longueur d'onde typique des tsunamis d'origine tectonique est d'environ 870 km.

3. Les lois qui régissent la propagation du tsunami

A l'aide d'un cas d'étude théorique [5], nous avons déterminé, une série d'équations qui régissent certaines caractéristique du tsunami sous certaines conditions...

A partir de l'équation de Navier-Stockes (2.3), on fait l'approximation de l'eau en un fluide incompressible (2.4) :

- $$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v}.\vec{grad})\vec{v} = -\frac{1}{\rho}\vec{grad}P + \vec{f} \tag{2.3}$$
- $$div(\rho\vec{v}) = 0 \tag{2.4}$$

avec $\vec{v}$ la vitesse; ρ la masse volumique; f les forces extérieures; P la pression.

En considérant, le fait établi que :

$$v = \sqrt{g * h} \tag{2.5}$$

avec g l'accélération de la pesanteur; h la hauteur d'eau

..et en effectuant les simplifications provenant du « shallow water » (qui correspondent à h'(x,t)[3] « h0) sur l'équation de N-S on arrive à :

1. $$P(x,z,t) = P_0 + g\rho * (h(x,t) - z) \tag{2.6}$$
2. $$h(x,t) = h_0 + h'(x,t) \tag{2.7}$$
3. $$\frac{\partial^2 h'(x,t)}{\partial t^2} - g(h_0 - ax)\frac{\partial^2 h'(x,t)}{\partial x^2} + ag\frac{\partial h'(x,t)}{\partial x} = 0 \tag{2.8}$$

Avec : (x : abscisse ; z : ordonnée ; t : temps)
P : Pression ;
P0 : Pression atmosphérique ;
ρ : masse volumique ;
g : accélération de la gravité ;
h : hauteur d'eau ;
h0 : hauteur d'eau initiale ;
a : pente du fond maritime .

Remarque :

- L'équation (2.8) correspond à l'équation reliant l'amplitude de la vague h avec la pente du fond maritime a.
- Ces équations mettent notamment en évidence le fait que certains paramètres du tsunami varient suivant l'environnement au cours de la propagation, contrairement aux caractéristiques fondamentales ; notamment, la vitesse v du tsunami et l'amplitude de la vague h qui sont intimement liés. L'étude de ces deux paramètres correspond notamment au principal axe de recherche de nos expériences...

4. Applications

a. Première application

[3] h' étant la variation du niveau d'eau par rapport au niveau initiale h0

Dans le cas où a = 0, on peut faire une estimation assez précise du temps que peut mettre un tsunami pour atteindre les côtes. En effet, l'équation devient :

$$\frac{\partial^2 h'(x,t)}{\partial t^2} - g * h0 \frac{\partial^2 h'(x,t)}{\partial x^2} = 0 \tag{2.9}$$

avec:

$$c0^2 = g * h0 \tag{2.10}$$

Une solution de cette équation peut s'écrire sous la forme :

$$h'(x,t) = cos(kx - \omega t) \tag{2.11}$$

où :

$$k = \frac{\omega}{c0} \tag{2.12}$$

Avec : k le vecteur d'onde; ω la pulsation;

Illustration : *Soit une profondeur d'eau de 4000m, un tsunami a une longueur d'onde de 200km. Les côtes maritimes sont à 4000km de distance. La célérité de l'onde est approximativement de : c0 = 200 m/s ;* Le temps que met le tsunami pour atteindre la côte est donc environ de 5H33min.

Ainsi, plus un tsunami est repéré tôt, plus on a le temps d'appliquer les consignes de sécurité. [4]

b. Application principale

Dans le cas où ax« h0, on peut simplifier dans l'équation (3) :

$$\frac{\partial^2 h'(x,t)}{\partial t^2} - g * h0 \frac{\partial^2 h'(x,t)}{\partial x^2} + ag \frac{\partial h'(x,t)}{\partial x} = 0 \tag{2.13}$$

Cela nous permet d'en déduire que :

$$h'(x,t) = exp[-ki * x] * cos(kr * x - \omega t) \tag{2.14}$$

Où :

- $$ki = \frac{-a}{2h0} \tag{2.15}$$
- $$kr = \frac{1}{c0} * \sqrt{\omega^2 - \frac{ga^2}{4h0}} \tag{2.16}$$

Avec : ki la composante imaginaire du vecteur d'onde et kr la composante réel du vecteur d'onde.

Dans un premier temps, on a tracé le terme d'amplification de l'onde en fonction de la pente (voir annexe 1). On peut ainsi voir que l'amplitude augmente linéairement avec la pente du fond marin.

Ensuite, on a tracé le terme h' dans son ensemble : amplification + propagation, en nous plaçant dans les conditions de l'expérience (voir annexe 1) ; ce qui donne une première idée de ce qu'on doit obtenir lors de l'expérience 2 (détaillé ci-après).

2.2 Mise en oeuvre

Une expérience préliminaire s'est dans un premier temps déroulée dans l'optique d'observer une première fois le phénomène du tsunami ; de déterminer des premiers paramètres pour les futures expériences réalisées avec le plus grand bassin de 2.49m.
Ce premier bassin mesure 48 cm environ de long. Il forme approximativement un plan carré.
Cette première expérience a donc eu pour objectif de nous familiariser avec le matériel ainsi que d'établir un ordre de priorité dans les expériences que nous devons mener sur le véritable bassin.

[4] consiste à s'abriter en un point solide et en hauteur ou à s'éloigner vers le large pour les navires amarrés.

2.2.1 Expérience 1

L'objectif de la première expérience est de vérifier la formule qui régit la vitesse en fonction de la profondeur (voir 2.1.2).
Pour cela on a effectué une série d'une dizaine de mesures sur la variation de l'amplitude de l'onde h ainsi que le temps mis par l'onde pour parcourir 1m, et ce pour différentes hauteur d'eau initiale h0. Cela a permis d'en déduire une vitesse expérimentale que l'on a comparée avec la vitesse théorique.
On a place des motifs de points aléatoires (voir annexe 3) sous le bassin de plexiglace de 3m. En créant une perturbation avec le polystyrène (voir 2.1.1), on mesure la variation de hauteur d'eau engendrée par la perturbation ainsi que la vitesse de la vague pour différentes hauteur d'eau initial.

2.2.2 Expérience 2

L'objectif initial de cette seconde expérience est donc de modéliser une simulation numérique d'un tsunami ainsi que de déterminer comment varie l'amplitude de la vague en fonction de la pente du fond marin noté a ; et enfin de comparer avec les résultats obtenue dans le cas d'étude théorique (voir en 2.1.2).
Pour cela, nous avons construit une pente avec une planche en bois, le morceau de plexiglass n'étant pas livré dans les temps... En plaçant des masses sur la planche accolée à une paroi, une extrémité touchait le fond tandis que l'autre était adossée à la paroi. Cela faisait notre pente sur laquelle nous avons plastifié un motif de point aléatoire en étanchant, avec plus ou moins de réussite le tout avec du fil de cuisine. Avec un flotteur, nous pouvions créer une perturbation (détaillée en 2.1.1).
Nous avons pris nos mesures, pour une hauteur d'eau d'environ 2.0cm, avec une caméra fixée avec des cales, placée à environ 120 cm du fond, pour des pentes faibles, initialement prévue à :

1. $$a = 0.03 \tag{2.17}$$
2. $$a = 0.07 \tag{2.18}$$
3. $$a = 0.10 \tag{2.19}$$
4. $$a = 0 \tag{2.20}$$

   ; celle-ci est traitée en même temps que les autres pentes puisque chaque zone de pente est d'abord précédé d'une zone de fond marin plat.

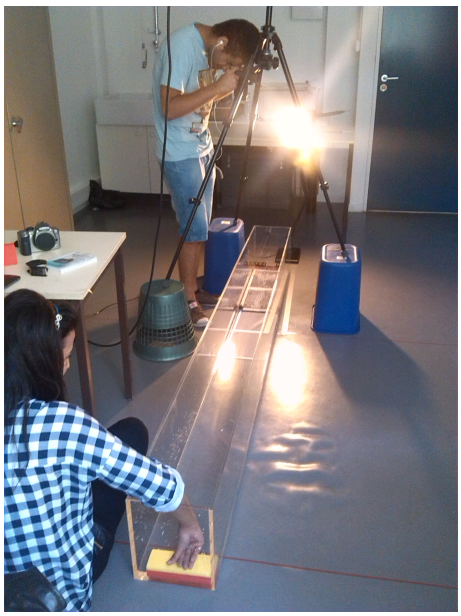


Figure 2.1: Photo du dispositif montage

Chapitre 3

Résultats

Les deux expériences ont amené quelques résultats concluants décrits dans cette partie (et discutés dans la prochaine).

3.1 Méthode de mesure

3.1.1 Expérience 1 et 2

Pour effectuer nos mesures sur la première expérience, nous avons utilisé une règle précise au mm et un chronomètre précis au centième de seconde. Les prises de mesures sont notamment effectuées avec des incertitudes dû aux appréciations des observateurs ; ce qui explique le fait qu'elles puissent être assez importantes.

En ce qui concerne la seconde expérience, nous avons opté pour une méthode suffisamment simple et rapide à mettre en application.

Celle-ci se base sur l'optique géométrique. Nous disposons un motif de point aléatoires en-dessous du bassin d'expérience (voir 3). Suite au déclenchement de la simulation, la hauteur d'eau varie et, selon le principe de réfraction, différents points semblent changer de position.
Grâce à une caméra placé au-dessus du bassin, plusieurs images (30 images/sec) du plan, à différent temps t, sont prises.

Enfin, le logiciel PIVlab procède à une inter-corrélation entre les différentes images prises du motif à différents temps t. La fonction « surfheight » sur Matlab doit nous permettre notamment de produire un film de la variation de la hauteur d'eau en fonction de la pente a, au cours de la période enregistrée.

Remarque:
Pour mesurer la valeur des pentes, il suffit de mesurer l'angle de la pente θ par les règles de la géométrie :

$$tan\theta = \frac{adjacent}{oppose} \tag{3.1}$$

puis

$$a = arctan\theta \tag{3.2}$$

3.1.2 La méthode FS-SS : Intercorrélation d'image et fonction "surfheight"

La fonction d'inter-corrélation est un opérateur, tel un produit de convolution, qui agit sur deux fonctions (f(x,y) , g(x,y)), correspondant chacune à une image. Cet opérateur a la propriété de valoir 1 lorsque les deux fonctions sont identiques et de tendre vers -1 quand les fonctions sont différentes.

En 2D, pour mesurer le déplacement relatif de deux images selon les axes x et y de l'image, un algorithme de corrélation utilise cet opérateur, en prenant respectivement, comme fonctions f et g, des portions des images de référence, et "déformée" ; ou "déplacée".
L'algorithme recherche les valeurs des déplacements dx et de dy telles que g(x+dx,y+dy) maximise l'opérateur de corrélation avec f; soit un quotient de probabilité. Ces valeurs sont retenues comme les meilleures estimations des déplacements de l'image g par rapport à l'image f.
Dans la pratique, l'algorithme applique cette procédure sur une série d'imagettes appelées des "fenêtres", qui

sont des portions de l'image de référence. Il calcule la fonction de corrélation entre une fenêtre de référence et une fenêtre déformée. La première est fixée, et l'utilisateur paramètre une zone dans laquelle peut se trouver la seconde correspondante. Celle déformée de cette zone qui permet d'obtenir la plus grande fonction de corrélation croisée avec celle de référence est retenue comme étant l'alter ego de celle-ci dans l'image déformée, et permet ainsi d'estimer le déplacement en ce point.

La répétition de cette procédure, dite locale car chaque fenêtre est analysée indépendamment de ses voisines, permet d'obtenir une cartographie des déplacements entre les deux images. L'intêret d'avoir des fenêtres les plus petites possible, est d'obtenir le champ de déplacements le plus local possible. Néanmoins, si la fenêtre choisie est trop petite, l'opérateur de corrélation n'a pas assez d'informations pour retrouver l'homologue de cette fenêtre sur l'autre image, car le nombre de "faux amis" potentiels augmente. Ainsi, aucun "pic de corrélation" sur le quotient de probabilité ne se dégage. Il est donc important de dimensionner correctement les fenêtre pour le traitement du signal [6][12].

Remarque:
La grande majorité des codes de corrélation d'images commerciaux utilisent les méthodes locales et permettent de mesurer des déplacements inférieurs au 1/10ème de pixel.

Les progrès récents des méthodes de corrélation d'images, couplés à l'augmentation continuelle des puissances de calcul, ont permis de concevoir et de développer de nouvelles méthodes de mesure qui sont en train de révolutionner la mécanique expérimentale.

La méthode "Free-Surface Synthetic Schlieren", dite FS-SS [7], permet de mesurer la déformation de la surface libre d'un liquide transparent avec une grande sensibilité. Cette méthode repose sur trois approximations linéaires, qui peuvent constituer des limitations importantes dans certaines situations pratiques : la caméra est loin de l'interface, avec de faibles déformations de l'interface ainsi qu'un faible angle de capture d'image. Dans notre cas, la caméra était située à 1m20 du bassin et on observait une perturbation de l'ordre du millimètre (voir 3.2).

Dans le cas d'ondes planes et donc dans le cadre d'approximations linéaires, le champs de déplacement dr(x,y,t) est proportionnel au gradient de hauteur d'eau. Une méthode d'intégration, suivant la méthode des moindres carrés[1], permet de reconstituer la hauteur d'eau h(x,y,t).

3.2 Nos Mesures

a. Expérience 1

La synthèse des mesures a permis d'établir le graphe suivant à partir du tableau de valeur en annexe 2.

b. Expérience 2

Suite au calcul d'inter-corrélation par le logiciel PIVlab (détaillée précédemment au chapitre 3.1.2) nous avons obtenu, pour une pente de 0.03, un champs de déplacement suivant le niveau d'eau. Nous pouvons donc voir sur les photos suivantes, trois séquences de la propagation de la vague. Ce sont notamment ces images qui, par la fonction "surfheight" nous donnent la hauteur d'eau :

[1] compare un modèle expérimentale, généralement entachées d'incertitude à un modèle mathématique censé décrire le phénomène

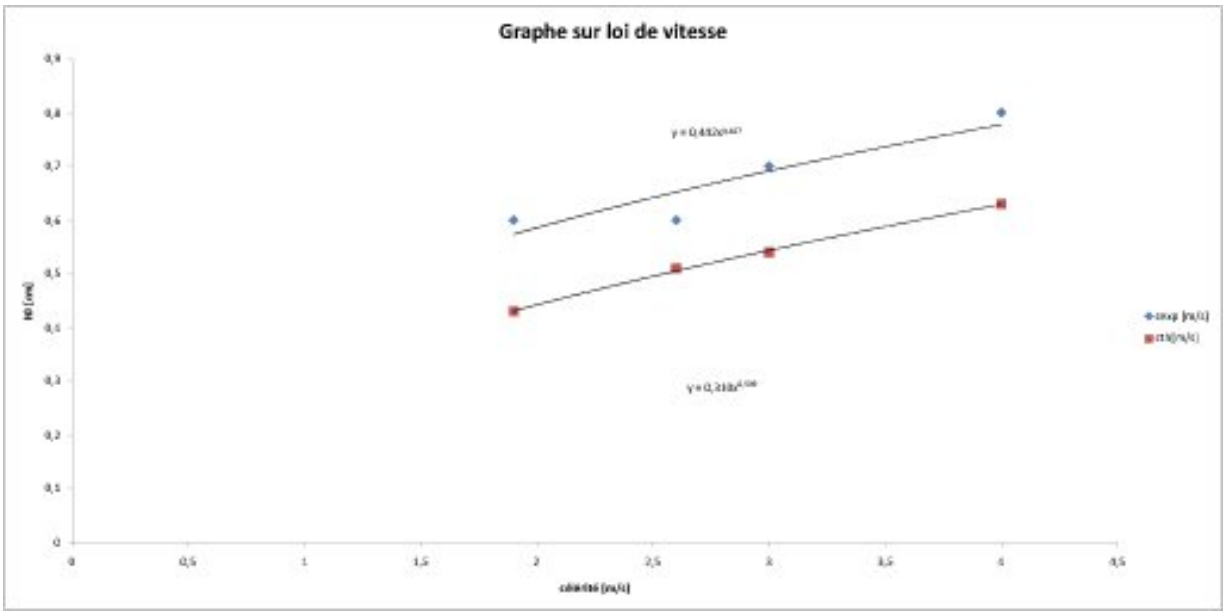
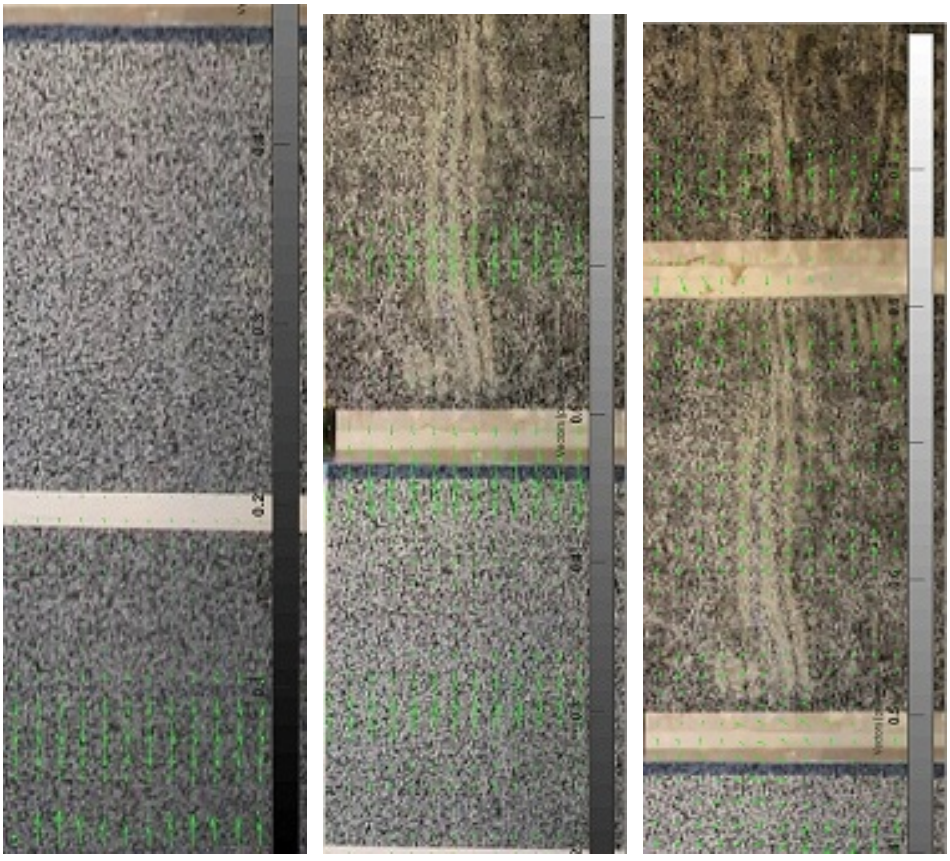


Figure 3.1: Graphe sur la célérité



(a) t=0 s (b) t=1 s (c) t=1.5 s

Figure 3.2: Champs de déplacement à différents temps t de la propagation

Chapitre 4

Analyse et commentaires

Les deux expériences ont été suffisamment concluantes pour en retirer quelques résultats.

4.1 Expérience 1

Tout d'abord en ce qui concerne la première expérience, on observe que toutes les perturbations provoquées ont un quotient :

$$\frac{h_0 - h'}{h_0} = 0.5 \tag{4.1}$$

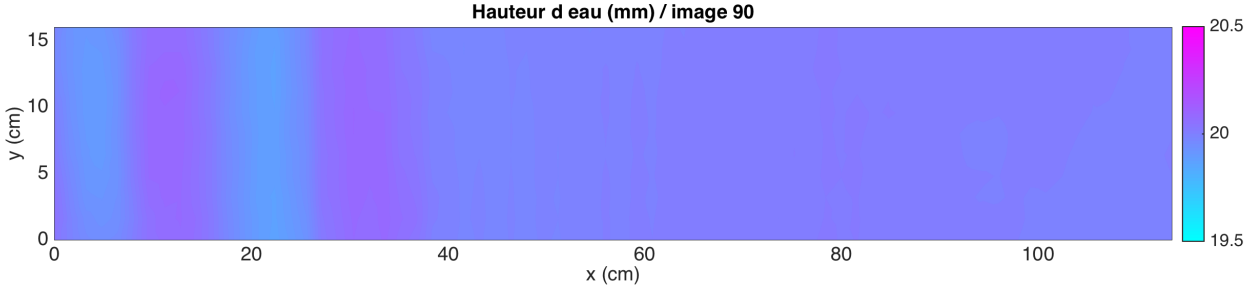
Cela permet de savoir qu'il s'agit d'une perturbation similaire pour tous les différents niveaux d'eau et ainsi d'effectuer une comparaison se basant sur une même force de perturbation [1]. Néanmoins, ce coefficient est trop élevé dans le cas d'une simulation de tsunami d'origine tectonique. Cette première expérience a donc permis de mettre en évidence la nécessité de trouver une autre source de perturbation pour la deuxième expérience ; le principe de "shallow water" n'étant pas suffisamment respectée dans ce premier cas.

Ensuite, cette expérience a également permis de mettre en évidence un lien entre la vitesse de propagation et la hauteur d'eau (voir 3.2). En effet, d'après le graphe, plus la hauteur d'eau est importante, plus la vitesse de la vague est importante. Par ailleurs, les équations des courbes de tendances ainsi que l'estimation des incertitudes, nous permettent de bien vérifier la formule suivante:

$$v = \sqrt{g * h} \tag{4.2}$$

La différence entre la valeur théorique et la valeur expérimentale provient justement de ces incertitudes et du fait que la perturbation entraîne une variation du niveau d'eau élevée.

4.2 Expérience 2



En ce qui concerne les résultats de la seconde expérience, pour l'instant, seules les mesures de la première pente (a=0.03), et donc également d'un fond marin plat, ont pu être traités. En effet, suite à quelques complications notamment sur le plan matériel au niveau des images [2], un manque de temps ne nous a pas permis de traiter les données sur les autres pentes. Néanmoins, plusieurs résultats concluants peuvent tout de même être abordés.

[1] celle-ci étant manuelle

[2] mauvaise résolution de l'appareil photo ou encore ce même appareil photo mal fixé par des "cales improvisées"

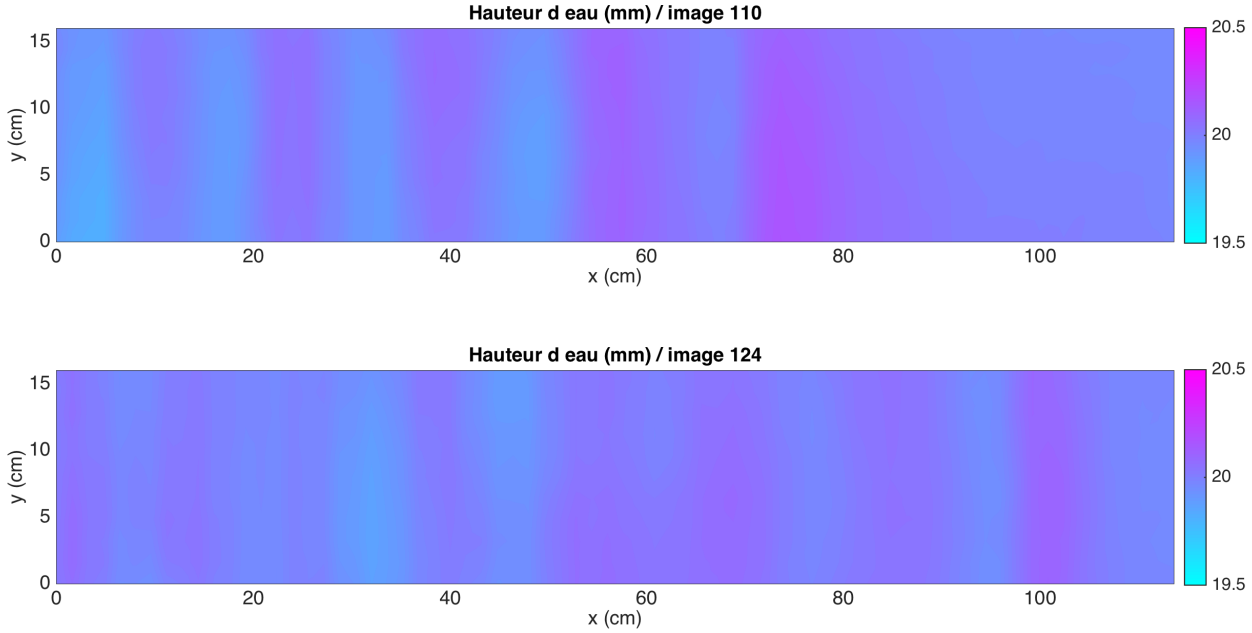


Figure 4.1: Exemple d'images de la propagation du tsunami, espacées dans le temps et obtenues par le traitement des images en 3.2 par la fonction "surfheight"

Tout d'abord, en observant les photos traitées successivement en 3.2, on observe parfaitement la propagation du tsunami. Il nous est donc possible d'en faire un film (un second peut également être réalisé à partir des images "surfheight"). Par ailleurs, on remarque, sur la figure 4.1, que l'on obtient une longueur d'onde approximativement équivalente à 15 cm. Or, la profondeur d'eau maximale est de 2cm. Il y a donc un facteur 8 entre les deux. Ainsi, l'hypothèse du "shallow water" est respectée maintenant.

De plus, la vitesse de propagation peut être recalculée, toujours avec une grosses incertitude... En effet, d'après la séquence d'image obtenue, nous mesurons que l'onde se déplace de 2 cm environ, par fond plat entre deux images. Celle-ci étant espacé de 1/30ième de secondes, on en déduit une vitesse égale à : 0.6 m/s ; un résultat qui tend vers celui de l'expérience 1.

Ensuite, bien qu'il soit difficile de mesurer, sur ces images, la variation de hauteur d'eau [3] en fonction du fond marin, on peut observer une légère teinte plus foncé de violet apparente au niveau de la pente [4] que celui au niveau du fond plat [5]. Cependant, le contraste n'apparaît pas suffisamment clair pour pouvoir en tirer de réelles conclusions.

Ainsi, bien qu'elle ne puisse apporter de grandes précisions sur les variations d'amplitude par rapport à la pente du fond marin, cette expérience met en évidence la modélisation réussie d'un tsunami en laboratoire, de sa création à sa propagation, ainsi qu'une analyse d'image de motif aléatoires qui fonctionne très bien pour ce cas d'étude.

[3] correspond à la "variation des couleurs"
[4] à partir de 50 cm environ sur la figure
[5] de 0 à 50cm sur la figure

Chapitre 5

Conclusion

Dans ce rapport, nous avons donc choisi de mettre en avant, les recherches théoriques effectuées ainsi que les expériences réalisées, en plus d'une importante prise en main des logiciels de traitement d'image tel que PIVlab [8] ou matPIV [9]. Ce rapport présente donc les résultats de l'expérience de tsunami en laboratoire que nous avons réalisée depuis le dimensionnement du bassin jusqu'à la mise au point du dispositif d'acquisition de mesure précise de hauteur de vague.

Suite à une connaissance approfondie sur le monde des tsunamis et malgré certains imprévus, ces expériences ont permis de mettre en évidence les caractéristiques du tsunami lors de sa propagation, qui sont : sa vitesse et son amplitude. On en retire notamment un parallèle important avec la théorie.

Entre autres, cela a permis de vérifier la loi qui régit la célérité du tsunami, notamment sur fond marin plat ; ainsi que d'entrevoir une première influence de la pente du fond marin sur la variation de l'amplitude de la vague. Néanmoins, cet aspect n'étant pas assez mis en évidence par les expériences effectuées, cette influence pourrait faire l'objet, à l'avenir, d'une prochaine étude, mise en œuvre avec un matériel supérieur.

La grande satisfaction de cette étude a notamment était la réussite au niveau de la modélisation du tsunami en laboratoire, soit dans un bassin de 2m49, tout en respectant les approximations faites sur la théorie, notamment celle du "shallow water". La grande difficulté était donc de faire correspondre les différentes caractéristiques du tsunami à la bonne échelle pour obtenir une certaine cohérence. Pour rappel, dans la nature, le tsunami se propage sur des distances de l'ordre du milliers de km.
La seconde grande satisfaction est la mise en avant d'une méthode de mesure ainsi que d'une analyse de traitement d'images qui fonctionnent très bien, parfaitement viables pour les prochaines études sur le sujet du tsunami.

Sur un plan plus technique, ce projet nous a permis d'entrevoir le monde de la recherche avec ses aléas, ses outils, ses défis,...

Finalement, l'objectif sur les dernières séances de stage est de traiter les données sur les autres pentes afin de tenter de préciser davantage l'influence de celle-ci sur le tsunami. Il faudra également finaliser les différents films de propagation, qui seront mis sur le site, et enfin, dans un idéal, refaire les expériences avec le matériel livré, qui devrait donner un résultat plus net, notamment au niveau de la réalisation de la pente qui correspondait ici à un montage mis au point "avec les moyens du bord".

Ajoutons, enfin, que ce travail sera repris pour des activités de vulgarisation scientifique et en particulier dans le cadre de la fête de la science.

Remerciements

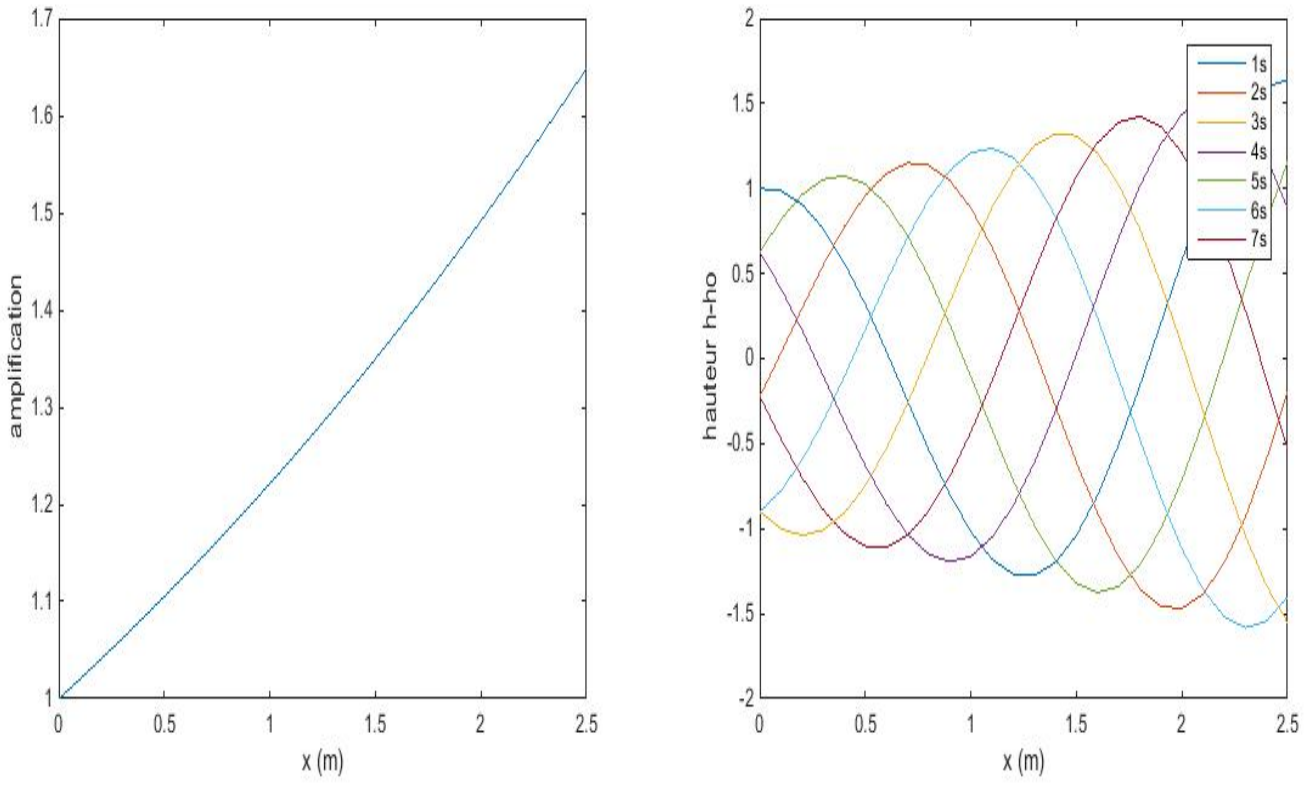
Nous remercions nos encadrants : Mme L. Rolland, Mr A. Sladen ainsi que Mr C. Courde, pour toute l'aide qu'ils nous ont apporté, notamment dans les moments de difficulté où nous bloquions sur des questions de logiciels mal connus par nous-même, ainsi que pour nous avoir guidé tout au long de ce stage.
Nous remercions également Mr J. Ambre, responsable de l'atelier mécanique, qui nous a fourni le nécessaire pour réaliser nos expériences : appareil photo, mètre, planche de bois, papier ponce,etc...
Enfin, nous remercions le laboratoire GéoAzur pour nous avoir permis d'utiliser ses locaux le temps de notre stage.

Annexes

Annexe 1

Sur cette annexe, on retrouve les différents graphes qui permettent de poser les bases théoriques du tsunami ; ce que l'on a tenter de retrouver lors de nos expériences.

1 Les différents graphes du cas d'étude théorique



(a) Graphe d'amplification

(b) Graphe de propagation

Figure 5.1: Graphe d'amplification et de propagation du tsunami développé dans l'exercice avec une pente de 0.02

Annexe 2

Les différentes équations, ainsi que le graphe, qui permettent de mettre en évidence la véracité de la relation entre la vitesse et la hauteur d'eau.

1 La théorie

Théorie :

Les différentes équations de calculs pour nos mesures sont :

- Incertitude sur le temps :

$$\delta t = \sqrt{\sigma[t]^2 + \delta P^2 + \delta T^2} \tag{5.1}$$

or delta P» delta T donc l'équation devient :

$$\delta t = \sqrt{\sigma[t]^2 + \delta P^2} \tag{5.2}$$

- Vitesse théorique :

$$Cth = \sqrt{g * h0} \tag{5.3}$$

et son incertitude :

$$\delta Cth = \frac{1}{2} * \delta h0 * \sqrt{\frac{g}{h0}} \tag{5.4}$$

- Vitesse expérimentale sur une mesure:

$$\frac{L}{T} \tag{5.5}$$

et son incertitude :

$$\delta Cth = \sqrt{(\frac{\delta L}{t})^2 + (\frac{\delta t * L}{t^2})^2} \tag{5.6}$$

- Vitesse expérimentale sur une série de mesures :

$$Cexpf = < Cexp > + \delta Cexpf \tag{5.7}$$

avec son incertitute

$$\delta Cexpf = \sqrt{\sigma[Cexp]^2 + < \delta Cexp >^2} \tag{5.8}$$

Avec :
l'imprécision du chronomètre :

$$\delta T = \frac{1}{10^5} s \tag{5.9}$$

l'imprécision de l'opérateur :

$$\delta P = 0.5 s \tag{5.10}$$

l'écart-type d'une série X :

$$\sigma X = \sqrt{< X^2 > + < X >^2} \tag{5.11}$$

la moyenne de la série X :

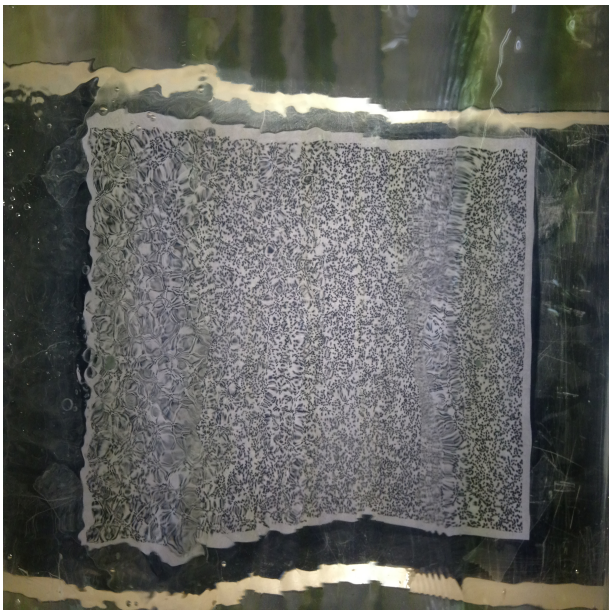
$$< X >= \frac{\sum X}{N} \tag{5.12}$$

2 Le tableau de valeurs sur la vitesse de propagation de la vague en fonction de la profondeur d'eau initial

h0	t	dt	cexp	dcexp	cth	dcth
1.9	1.9	0.5	0.6	0.2	0.43	0.01
2.6	1.6	0.5	0.6	0.2	0.51	0.01
3.0	1.4	0.5	0.7	0.3	0.54	0.01
4.0	1.3	0.5	0.8	0.3	0.63	0.01

3 Motif de points aléatoires

(a) Motif initiale



(b) Motif déformé

Figure 5.2: Motifs de points aléatoires initiale et déformé par une vague

Références

[1] http://fr.wikipedia.org/wiki/Séisme et tsunami de 2004 dans l'océan Indien

[2] http://fr.wikipedia.org/wiki/Tsunami

[3] http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/objets/Images/tsunami-Lognonne/tsunami-Lognonne.pdf

[4] http://hmf.enseeiht.fr/travaux/CD0001/travaux/optsee/hym/14/projet.htm

[5] Physique des tsunami et amplification côtières, Projet L3 Physique, UNS-Géoazur, 2015

[6] http://fr.wikipedia.org/wiki/Corrélation d images

[7] M. Rabaud, F. Moisy, J. Rolland, 2007, "Mesure de la déformation d'une surface libre par analyse du déplacement apparent d'un motif aléatoire de points (http://www.fast.u-psud.fr/ moisy/papers/rmr cfm07.pdf/)

[8] http://pivlab.blogspot.fr/p/blog-page$_1$9.*html*

[9] http://folk.uio.no/jks/matpiv/index2.html

[10] http://tectonics.caltech.edu/outreach/animations/

[11] https://sites.google.com/site/qingzongtseng/piv/

[12] Hermann M. Fritz, PIV applied to landslide generated impulse waves

[13] Petite vidéo qui a inspiré notre expérience : https://www.youtube.com/watch?v=lMcHnO9u9kk