

## Génération de vagues créées par un effondrement de terrain.

HEINRICH Philippe

Commissariat à l'Energie Atomique (Bruyères-le-Châtel)  
Laboratoire de Détection et de Géophysique.

### Résumé

Le programme bidimensionnel d'hydrodynamique Nasa-Vof2D a été modifié afin d'étudier la génération, la propagation et le déferlement sur la côte, de vagues créées par un effondrement de terrain. Nasa-Vof2D, développé à Los Alamos, est un code eulérien non linéaire, qui résout les équations de Navier-Stokes en incompressible avec surface libre. L'extension consiste à déplacer au cours du temps les frontières du domaine fluide (i.e. la bathymétrie). Il est alors possible de faire glisser un bloc de géométrie complexe sur une pente quelconque, à condition de connaître la cinétique du glissement.

### Summary

The two-dimensional hydrodynamics program Nasa-Vof2D has been modified to study the generation, the propagation and the run-up on shore, of water waves created by landslides. Nasa-Vof2D, developed by the Los Alamos National Laboratory, is a nonlinear eulerian code, which solves the complete incompressible Navier-Stokes. The extension consists in making the fluid domain boundaries (i.e. the bathymetry) time-dependent. It allows a complex geometry box to slide down any incline, provided that the body kinetic is known.

## I Introduction

A la suite de phénomènes tels que l'érosion, des secousses sismiques, ou des tempêtes, il arrive que des blocs géologiquement instables de la zone côtière se détachent et génèrent des vagues, dont l'importance peut entraîner des risques naturels aux abords des côtes. De tels glissements de terrain ont été observés en Alaska (lac de Kenai, Disenchantment Bay et Lituya Bay), en Italie (Réservoir du barrage de Vajont), en France (Nice en 1979), au Japon (Shimabara Bay), au Pérou, et dans de très nombreux lacs et fjords de Norvège.

A notre connaissance, les seuls modèles numériques traitant aujourd'hui ce type de problèmes sont des programmes d'ondes longues (i.e. longueur d'onde grande devant la profondeur locale). Cependant, l'absence d'accélération verticale dans ces modèles empêche de traiter correctement les problèmes d'attaque de la côte par les vagues. Ce phénomène étant souvent le plus dangereux, nous avons écarté, dans notre étude, ces modèles, et décidé d'introduire la possibilité d'un effondrement de terrain dans le programme d'hydrodynamique Nasa-Vof2D (1985). Ce code est eulérien, bidimensionnel dans le plan vertical et résout les équations complètes de Navier-Stokes.

Dans une première partie, nous présentons le code Nasa-Vof2D, ainsi que son extension. Nous comparons ensuite les résultats du code à ceux obtenus par les formules analytiques de Kennard (1949), pour le problème des vagues engendrées par la chute verticale d'un bloc. Enfin nous confrontons les résultats du programme à ceux obtenus par des essais en canal, effectués au L.N.H. (EDF à Chatou) en mai et juin 1990.

## II Présentation du programme Nasa-Vof et de son extension.

### 2.1) Présentation du programme Nasa-Vof.

Le programme Nasa-Vof2D, écrit à Los Alamos, est un code d'hydrodynamique bidimensionnel avec surface libre. Il résout les équations complètes de Navier-Stokes en incompressible par une méthode de différences finies, la méthode MAC (Marker And Cell) d'Harlow et Welch (1965). Cette technique est basée sur un maillage eulérien de cellules rectangulaires. Pour chacune d'entre elles, la conservation de la masse et de la quantité de mouvement est assurée. Le code permet de traiter des écoulements autour d'un ou plusieurs obstacles. Un obstacle est une zone de maillage délimitée par une frontière  $f(x,y)=0$ , zone à l'intérieur de laquelle le fluide ne peut pénétrer (vitesse normale nulle sur les bords).

On se propose de faire évoluer au cours du temps la frontière de l'obstacle. La principale modification concerne l'équation de continuité.

## 2.2) Modification de l'équation de continuité.

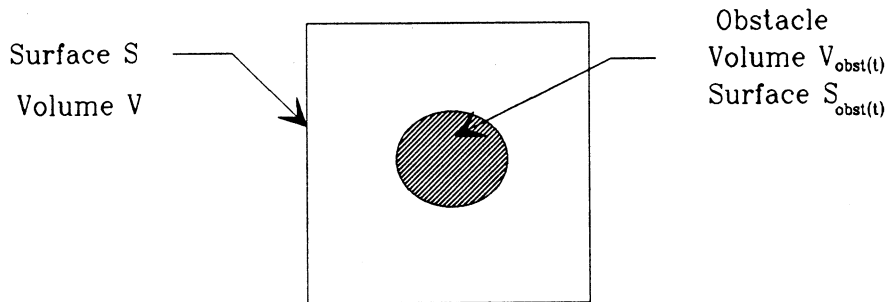


Fig.1 Intrusion d'un milieu solide (obstacle) dans un milieu liquide..

Ecrivons l'expression macroscopique de l'équation de conservation de la masse en incompressible pour une maille délimitée par une surface  $S$  et de volume  $V$ , sachant que cette maille contient un obstacle de volume  $V_{\text{obst}}(t)$  et dont la surface est  $S_{\text{obst}}(t)$  (cf Fig.1).

$$\iint_S \underline{v} \cdot \underline{n} \, dS = \iint_{S_{\text{obst}}(t)} \underline{v} \cdot \underline{n} \, dS \quad (1)$$

où  $\underline{n}$  désigne la normale extérieure aux volumes considérés et  $\underline{v}$  le vecteur vitesse du fluide.

De façon évidente,

$$\iint_{S_{\text{obst}}(t)} \underline{v} \cdot \underline{n} \, dS = dV_{\text{obst}}(t)/dt \quad (2)$$

La notation utilisée dans Nasa-Vof2D pour le terme de gauche dans (1) est  $V \cdot \text{div}(\theta \underline{v})$ . L'équation de continuité s'écrit dans ces conditions :

$$\text{div}(\theta \underline{v}) - 1/V \cdot dV_{\text{obst}}(t)/dt = 0 \quad (3)$$

Dans le cas des mailles coupées à la fois par la surface libre et l'obstacle, une équation analogue est écrite.

### III Comparaison du modèle numérique et de la solution analytique dans le cas d'un bloc chutant verticalement.

Dans ce paragraphe, on étudie un bloc de longueur  $L$ , de hauteur infinie, chutant verticalement à une vitesse  $v(t)$ , dans un bassin de profondeur  $d$  (cf fig.2). La face inférieure du bloc se situe initialement au niveau de la surface de l'eau au repos.

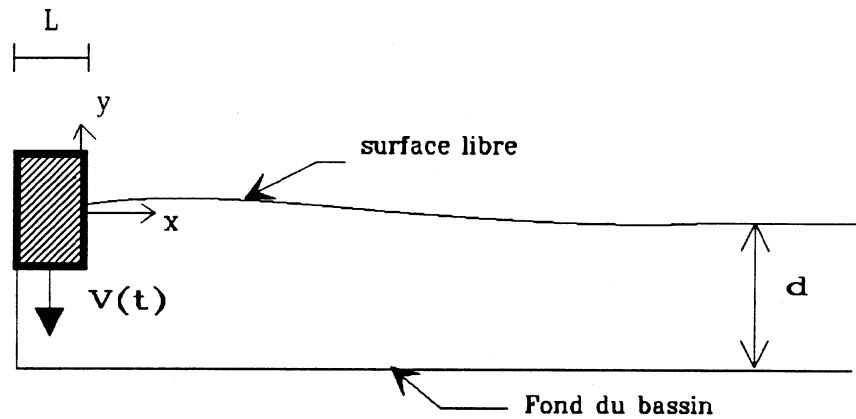


Fig.2 Chute verticale d'un bloc de longueur  $L$  à la vitesse  $v(t)$

La solution théorique est donnée par la formule de Kennard, obtenue en supposant le fluide parfait, incompressible et irrotationnel. L'équation de la surface libre est linéarisée et écrite en  $y=0$ . Le déplacement du bloc est simulé par un flux  $F(y,t)$  sur la frontière gauche du domaine ( $x=0$ ). On suppose que ce flux est uniforme pour  $-d < y < -s(t)$ , où  $s(t)$  désigne le déplacement du bloc compté à partir de la surface de l'eau au repos. Avec cette hypothèse,  $F(y,t)$  devient indépendant de  $y$ , et par continuité du volume :

$$F(y,t) = L v(t)/(d-s(t)) \text{ pour } -d < y < -s(t).$$

L'amplitude de la vague  $\eta(x,t)$  s'écrit :

$$\eta(x,t) = 2/\pi \int_0^\infty dk \int_0^t d\tau \int_{-d}^0 \cos(\sigma(t-\tau)) \cos(kx) \cosh(k(y+d)) L v(\tau) \{d-s(\tau)\} \cdot \cosh(kd) \}^{-1} dy$$

$$\text{où } \sigma^2 = g k \tanh(kd).$$

Les expériences en bassin de Noda (1970) ont montré que les nombres adimensionnés  $v(t)/\sqrt{gd}$  et  $L/d$  permettent de définir le domaine de validité de cette solution linéaire.

L'exemple étudié se situe dans ce domaine. Les données de ce cas sont les suivantes :

$$L = \text{largeur du bloc} = 0.1 \text{ m}$$

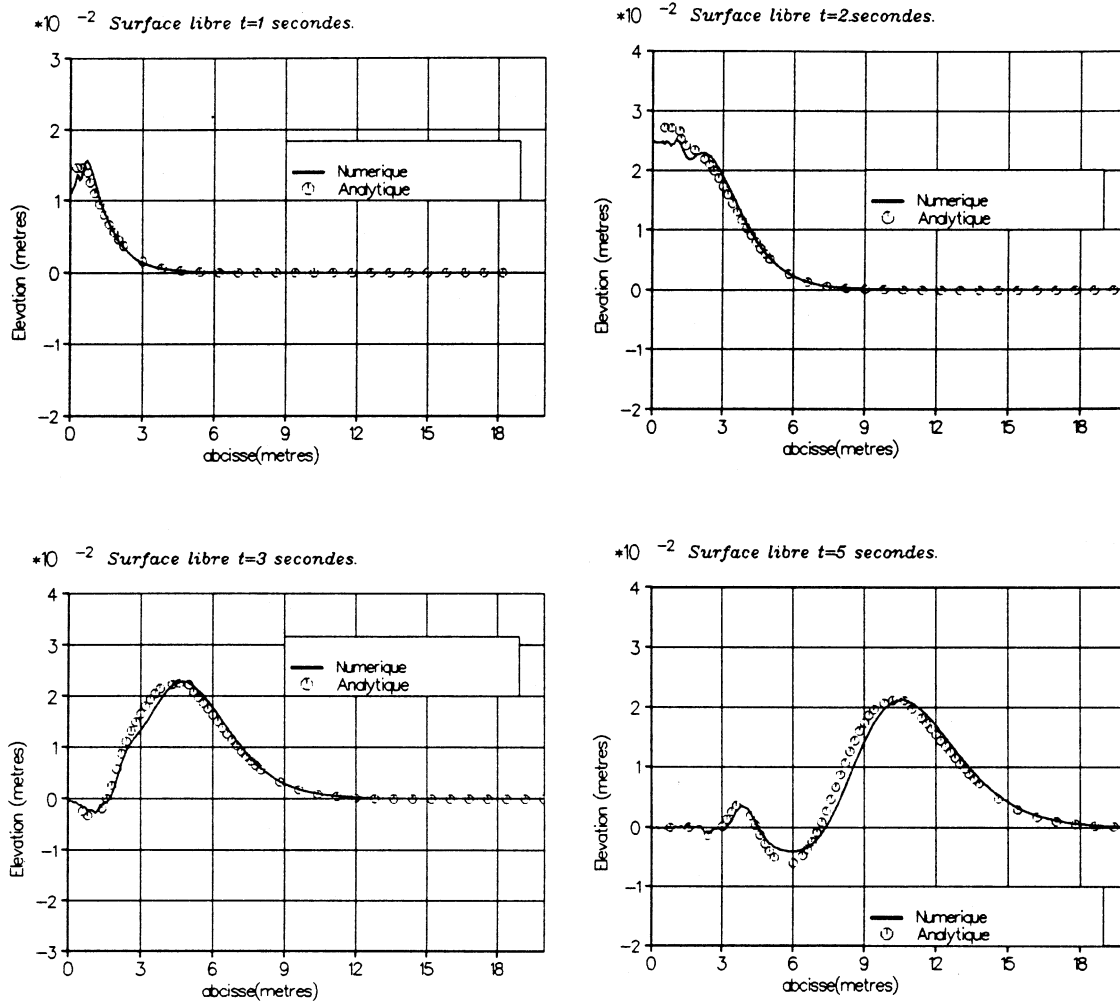
$$d = \text{hauteur d'eau} = 1 \text{ m}$$

$$T_f = \text{durée de la chute du bloc} = 2 \text{ sec.}$$

Le déplacement du bloc  $s(t)$  suit la loi :

$$s(t) = 0.25 t^2$$

Sur la figure 3, nous comparons les surfaces libres théoriques et celles calculées numériquement aux instants  $t=1s$ ,  $t=2s$ ,  $t=3s$  et  $t=5$  secondes.

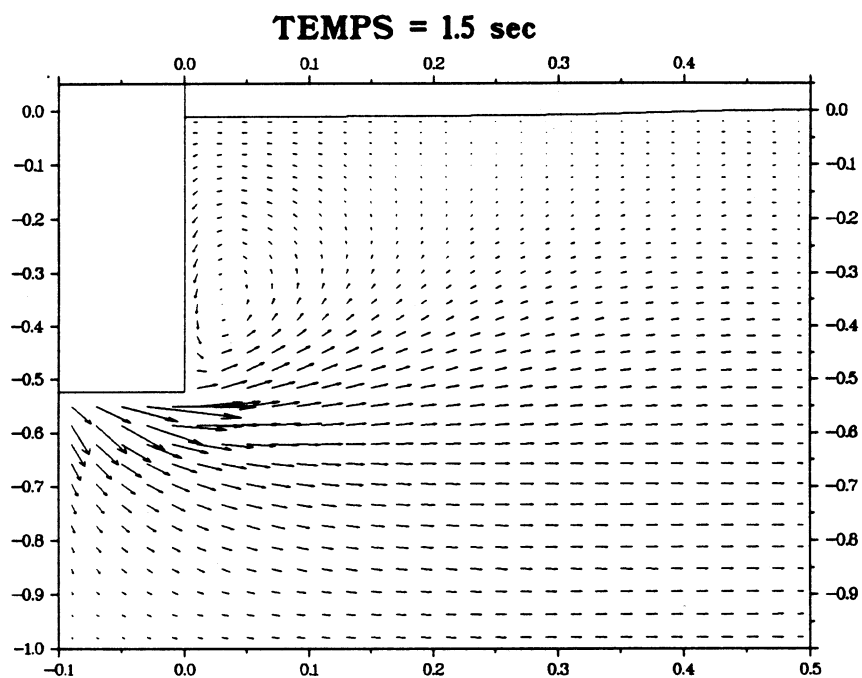


**Fig 3** Comparaison des surfaces libres obtenues analytiquement à celles obtenues numériquement dans le cas d'un bloc chutant verticalement.

On observe que la solution numérique diffère légèrement de la solution analytique aux premiers instants. Ces différences peuvent s'expliquer en partie par l'examen des vecteurs vitesses (cf fig.4). Sur cette figure, on observe 2 phénomènes non décrits par la théorie linéaire :

-1- lorsque la boîte chute dans Nasa-Vof, un tourbillon se crée le long de la boîte. Ce tourbillon n'est évidemment pas décrit par la solution analytique, où l'on suppose le fluide irrotationnel.

-2- l'hypothèse du flux uniforme  $F(y,t)$  pour  $-d < y < -s(t)$  n'est pas tout à fait vérifiée. Les vitesses horizontales sous la boîte décroissent avec la hauteur d'eau.



**Fig 4** Tracé du champ des vecteurs vitesses pour la chute d'un bloc.

#### IV Comparaison du modèle numérique et des essais en bassin.

L'objet de ces essais a été de valider Nasa-Vof2D et son extension dans des domaines non linéaires et pour des géométries complexes. Les essais ont été réalisés au L.N.H. (EDF), dans un bassin de 20 mètres de long, 50 cm de large et 1m50 de profondeur. Ils ont consisté à laisser glisser librement des blocs de géométrie et de poids différents, sur des plans inclinés de pente variable. L'une des parois étant vitrée, nous avons pu filmer les essais . Le dépouillement des films permet de connaître la cinétique du bloc, ainsi que le profil de la surface libre au cours du temps. Au delà du champ de la caméra (environ 4m50), des sondes résistives fournissent en un point donné la déformation de la surface libre au cours du temps. La figure 5 représente l'une des configurations étudiées . A l'instant initial, la face supérieure du bloc (demi-cube de 50 cm de côté) se situe à 1cm en dessous de la surface de l'eau au repos, dont le niveau se situe à l'intersection du plan incliné et de la pente du rivage.

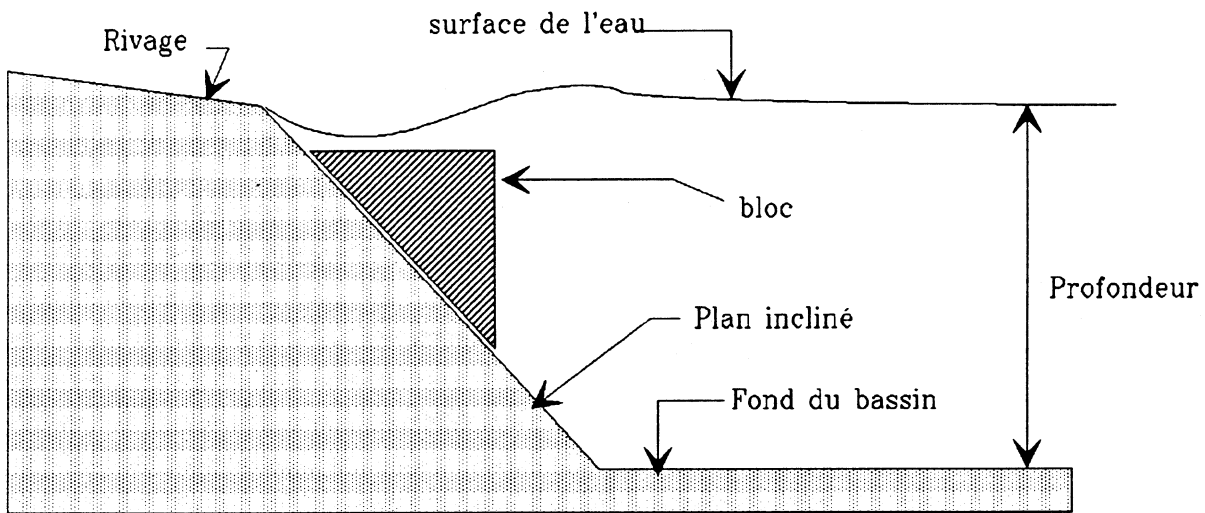


Fig 5. Coupe verticale d'un essai.

Les données de cet essai sont les suivantes :

Pente du plan incliné =  $45^\circ$

Pente du rivage =  $15^\circ$

Profondeur du bassin = 1m.

Densité du bloc (par rapport à l'air) = 2

Après une phase d'accélération jusqu'à  $t=0.4$  secondes, le bloc se déplace à une vitesse constante égale à 0.6 m/sec, la fin de la chute ayant lieu à  $t=0.97$ sec.

Sur la figure 6, on compare la surface libre obtenue numériquement et celle obtenue expérimentalement pour cet essai, aux instants  $t=0.5$ s,  $t=1$ s,  $t=1.5$ s et  $t=2$ s.

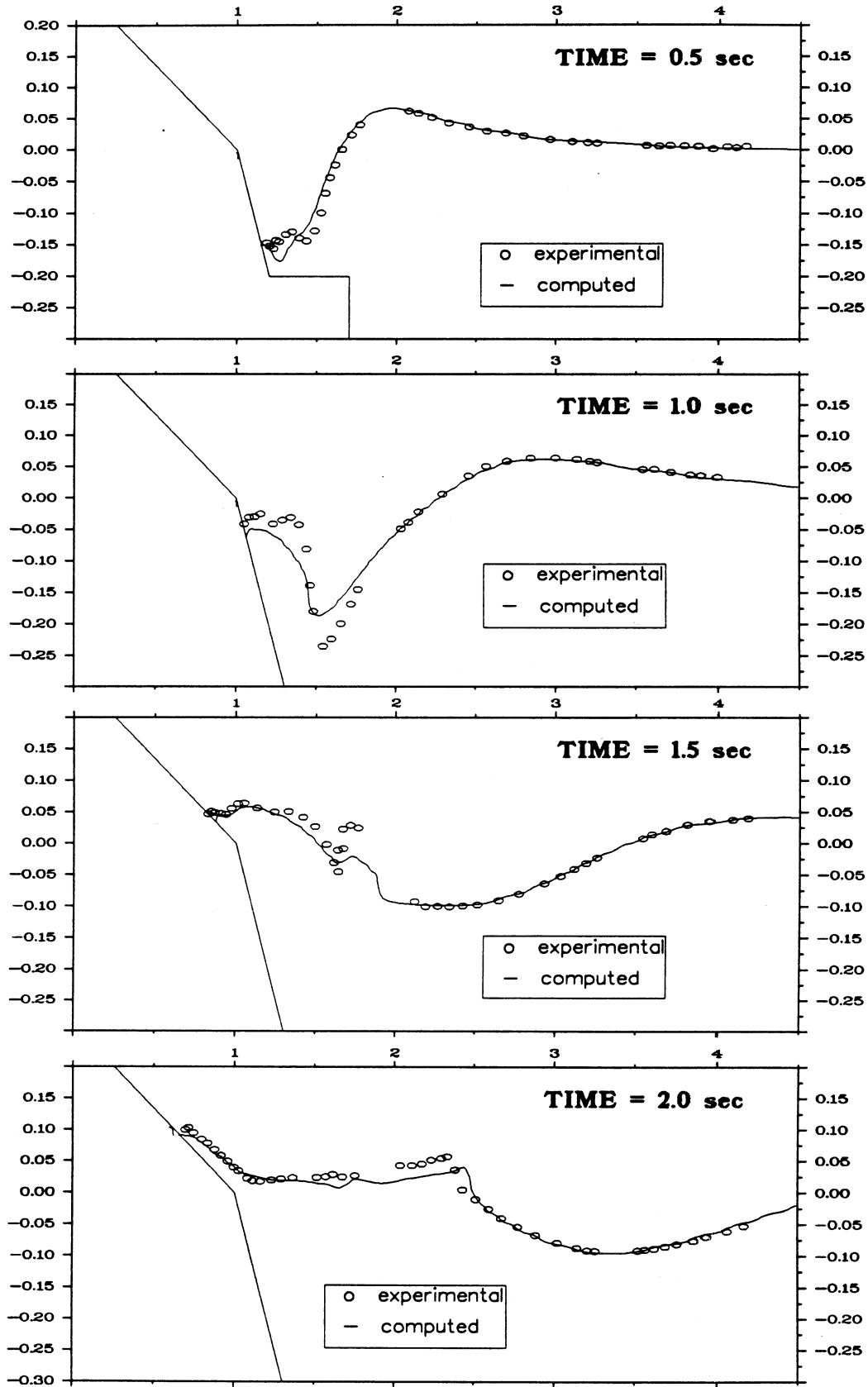


Fig 6. Comparaison des surfaces libres expérimentales et numériques (unités en mètres).



On constate que le code restitue de façon très convenable l'expérience aussi bien sur le rivage que dans la zone de génération. On note toutefois des différences d'amplitude au voisinage du bloc ( $1 < x < 2$ ), alors que les deux surfaces libres sont quasi identiques pour  $x > 2$ . Ces écarts s'expliquent de deux façons:

- 1- la détermination de la surface libre expérimentale dans la zone de déferlement, est entachée d'une grande incertitude (cf fig 7).
- 2- le modèle numérique ne peut pas reproduire la turbulence observée.

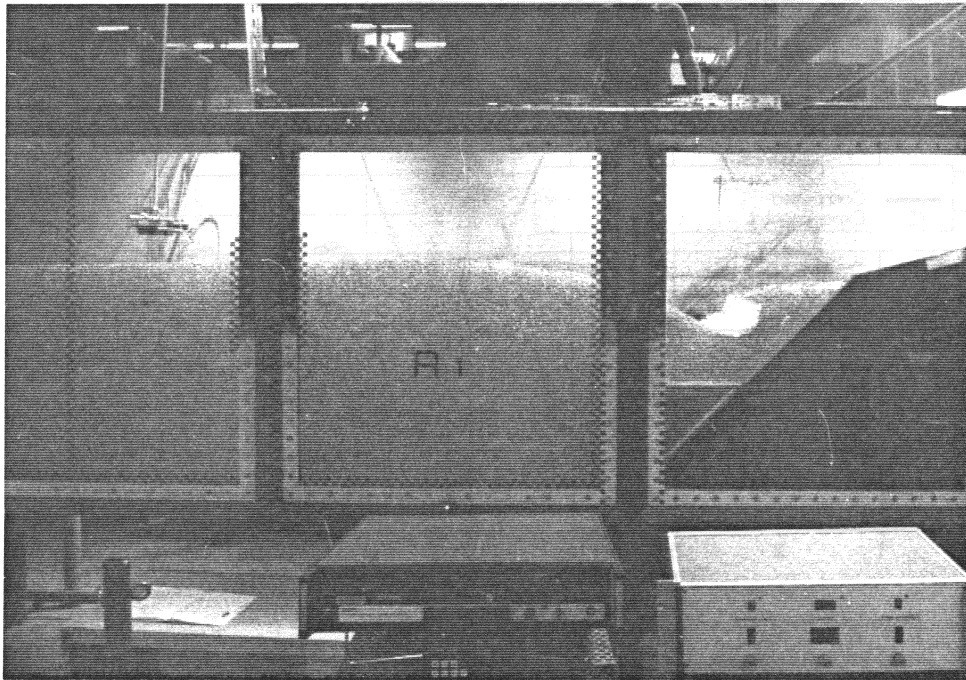
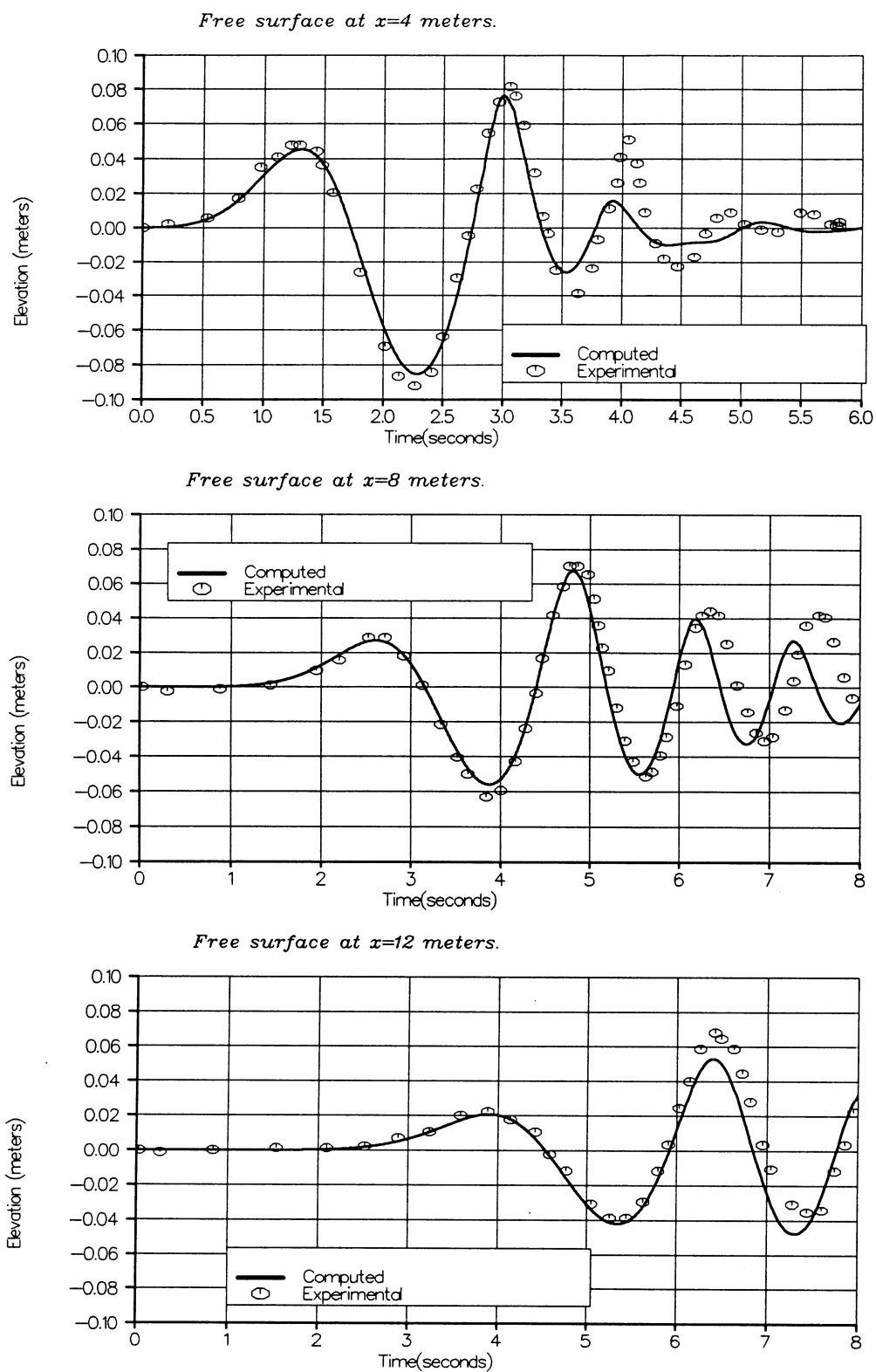


Fig.7 . Photographie de l'expérience à l'instant  $t=1$  sec.

Les résultats des sondes sont comparés sur la figure 8, à ceux obtenus numériquement aux abscisses  $x=4m$ ,  $x=8m$  et  $x=12m$

On observe sur cette figure, comme pour l'ensemble des effondrements sous-marins effectués, la création d'un train d'ondes, qui s'explique par le caractère dispersif des



**Fig. 8 .** Comparaison des résultats des sondes au calcul numérique.

On observe sur cette figure, comme pour l'ensemble des effondrements sous-marins effectués, la création d'un train d'ondes , qui s'explique par le caractère dispersif des

vagues générées. Les plus grosses différences d'amplitude et de phase concernent les vagues de fréquence élevée. Lorsqu'on diminue la vitesse du bloc, les écarts entre le modèle numérique et l'expérience s'atténuent à proximité de la source, et on constate que les différences affectant les vagues de fréquence élevée disparaissent.

### V Conclusion

Le programme d'hydrodynamique Nasa-Vof2D a été modifié, afin d'étudier le problème des vagues engendrées par des effondrements de terrain. Cette extension de Nasa-Vof2D, qui consiste à déplacer les frontières du domaine fluide au cours du temps, a été validée de deux façons différentes. D'une part, nous avons étudié le problème du bloc rectangulaire chutant verticalement, pour lequel nous disposons d'une solution analytique, déterminée dans le cadre de la théorie linéaire. D'autre part, les résultats numériques ont été confrontés à des résultats expérimentaux dans des domaines non linéaires et pour des géométries complexes. Dans les conditions de l'expérience, on constate que les vagues calculées numériquement sont très proches des vagues mesurées, tant que la turbulence de surface générée au cours de la chute du bloc, n'est pas trop importante.

Jusqu'à présent, notre étude est restreinte aux phénomènes bidimensionnels (ou axisymétriques) dans le plan vertical. Afin de traiter des problèmes plus réalistes, l'extension analogue est en cours de développement dans le programme tridimensionnel Nasa-Vof3D (1987).

### Bibliographie

Kennard, E. H., 1949. Generation of Surface Waves by a Moving Partition. *Quart. J. of Appl. Math.*, Vol.7, pp. 303-312.

Noda, E., 1970. Water waves generated by landslides. *J. of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, Proc. Am. Soc. Civ. Eng.* WW4, pp.835-853.

Torrey, M. D., Cloutman, L. D., Mjølness, R. C., and Hirt, C. W., 1985. Nasa-Vof2D : A computer program for incompressible flows with free surfaces. Los Alamos National Laboratory Report LA-10612-MS.

Torrey, M. D., Mjølness, R. C., and Stein, L. R., 1987. Nasa-Vof3D : A three-dimensional computer program for incompressible flows with free surfaces. Los Alamos National Laboratory Report LA-11009-MS.

Welch, J. E., Harlow, F. H., Shannon, J. P., and Daly, B. J., 1965. The MAC Method : A computing technique for solving viscous incompressible, transient fluid flow problems involving free surfaces. Los Alamos National Laboratory Report LA-3425.