

Simulation numérique d'une vague générée par glissement de terrain de sa phase de formation à l'impact à la côte. Influence de la forme initiale et de la déformabilité du glissement.

Denis MORICHON¹, Stéphane ABADIE¹

¹ Université de Pau et des Pays de l'Adour, LaSAGeC²,

1 Allée du parc Montaury, 64 600 Anglet, France

denis.morichon@univ-pau.fr

stephane.abadie@univ-pau.fr

Résumé:

Les glissements de terrain induits par des instabilités de pente sont fréquents dans les réservoirs d'eau mais peuvent également se produire en zones côtières. Cet article présente les résultats d'une étude portant sur l'influence de la forme et de la déformation de ce type de glissement sur les caractéristiques des vagues générées et les hauteurs d'inondation associées. L'approche repose sur un canal numérique basé sur un solveur Navier-Stokes VOF. Le glissement est simulé par un fluide newtonien. Les résultats montrent que la forme initiale du glissement a peu d'effet sur les caractéristiques finales des vagues pour une viscosité donnée mais influence l'inondation. En revanche, dans la gamme de glissements simulés, l'effet de la viscosité est déterminant sur l'ensemble des paramètres de risque.

Abstract:

Mass failures occurring on water reservoirs margins and on coastal slopes may generate large water waves. This study investigates the influence of landslide shape and deformability on the subsequent generated waves and run-up. The approach is based on a 2D Navier-Stokes VOF numerical flume. The paper is focused on impulse waves generated by landslides with critical impact Froude number. The slide is modeled by a Newtonian fluid. Results indicate that initial slide shape, for a given viscosity value, has little influence on final wave characteristics, in the propagation zone, but can significantly modify run-up extent. Slide deformability seems to be a critical parameter. Waves and run-up are highly dependent on viscosity.

Mots-clés:

Glissement de terrain – Vagues – Inondation – Navier-Stokes VOF

1. Introduction

Les glissements de terrain induits par des instabilités de pente sont fréquents dans les réservoirs d'eau, tels que les fjords et les lacs alpins, mais peuvent également se produire en zones côtières. Les importants volumes de terrain, associés à des vitesses d'impact élevées (nombre de Froude: $F = V_i / \sqrt{gh} > 1$ où V_i est la vitesse du glissement à l'impact et h la profondeur du bassin), peuvent générer des vagues particulièrement énergétiques qui constituent un risque d'inondation pour les zones situées à proximité de la zone de génération. La détermination de facteurs de risque fiables nécessite une description détaillée des processus physiques au cours des phases de génération, de propagation et d'inondation. L'approche expérimentale est classiquement utilisée dans cette optique (e.g. FRITZ, 2002). Elle peut cependant s'avérer relativement lourde lorsqu'il s'agit de prendre en compte la diversité des paramètres mis en jeu.

L'approche numérique est un complément idéal à l'expérimental. Elle est simple à mettre en oeuvre et permet une analyse en profondeur des phénomènes. Elle nécessite cependant de nombreuses validations qui seront souvent issues d'expériences en modèle physique.

Le modèle que nous présentons dans cet article est basé sur un solveur Navier-Stokes VOF (Volume of Fluid). Dans la première partie, nous présentons rapidement le modèle. Nous proposons ensuite son application pour la simulation de glissement déformable en se plaçant dans la configuration de l'expérience de Fritz (2002). La seconde partie porte sur l'étude de l'influence de la forme à l'impact et de la déformabilité du glissement sur les caractéristiques des vagues générées et les hauteurs d'inondation associées. La dernière partie présente les conclusions de l'étude et les perspectives.

2. Méthodologie

2.1 Présentation du modèle

Le modèle utilisé est le modèle Aquilon développé à l'UMR 8508 Trefle. Dans notre cas, le domaine de calcul est composé de trois fluides : l'eau, l'air et le glissement de terrain. Ces trois fluides obéissent aux équations de conservation de la quantité de mouvement (2) et à la condition d'incompressibilité (1) :

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial U}{\partial t} + (U \cdot \nabla) U \right) = \rho g - \nabla P + \nabla (\mu (\nabla U + \nabla \cdot U)) \quad (2)$$

Dans l'équation (2), la présence de plusieurs fluides, se traduit par des variables masse volumique et viscosité dépendantes du point considéré. (1) et (2) sont

exactes en tout point sauf aux interfaces entre les fluides où des approximations résultent de la discrétisation et des hypothèses sur le calcul de ρ et μ . Dans cet article ρ et μ sont discontinues (e.g. $\rho = \rho_{\text{eau}}$ et $\mu = \mu_{\text{eau}}$ si la fraction d'eau dans la maille C_{eau} est supérieure à 0.5). Les équations (1) et (2) sont résolues par la mise en œuvre d'un algorithme de lagrangien augmenté à paramètre numérique variable dans l'espace (LUBIN *et al.*, 2006). La position respective de chaque fluide est connue en résolvant par un schéma TVD (LUBIN *et al.*, 2006), les équations d'advection pures (3) et (4) portant sur les fractions volumiques.

$$\frac{\partial C_{\text{eau}}}{\partial t} + (U \cdot \nabla) C_{\text{eau}} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial C_{\text{gli}}}{\partial t} + (U \cdot \nabla) C_{\text{gli}} = 0 \quad (4)$$

Abadie *et al.* (2007, 2008a et b) ont validé ce modèle par comparaison aux données expérimentales disponibles dans la littérature. Ces données portent sur des expériences en canal effectuées à partir de blocs rigides (MONAGHAN & KOS, 2000; HEINRICH, 1992).

2.2 Glissement de terrain déformable

Les travaux de Fritz (FRITZ, 2002), basés sur des mesures réalisées dans un canal 2D, ont permis de mettre en évidence l'influence des caractéristiques à l'impact d'un glissement de terrain granulaire déformable sur la nature des régimes de vagues générées. Toutefois, la configuration de l'expérience n'a pas permis d'étudier leurs effets sur l'inondation en aval de la zone de génération.

Dans cette section, le modèle est utilisé à l'instar d'une expérimentation (canal numérique). Les simulations sont destinées à compléter les travaux de Fritz. Le glissement est un fluide Newtonien. L'idée est d'utiliser ce modèle grossier de glissement pour contrôler facilement la déformabilité à partir de μ . Comparé au canal de Fritz (FRITZ, 2002), nous avons ajouté une pente de 45° , située en aval de la rampe de glissement (Figure 1). Les caractéristiques du glissement correspondent à une des expériences de Fritz (FRITZ, 2002). La vitesse de glissement à l'impact est telle que $F = 2.8$. Le glissement de terrain, de longueur $l_s = 1.4$ m et d'épaisseur $s = 0.1$ m, a une masse volumique $\rho = 1610$ kg/m³. L'analyse de l'enregistrement vidéo de la forme du glissement à l'impact, réalisé par Fritz (2002), permet de déterminer la valeur de l'angle $\alpha = 8^\circ$ (Figure 1). La valeur de la viscosité du glissement est fixée de manière à coller au mieux à la première vague obtenue dans l'expérience de Fritz. La valeur obtenue est $\mu = 150$ Pa.s. Toutes les grandeurs spatiales sont adimensionnées (*) par h et les vitesses par $c = \sqrt{gh}$.

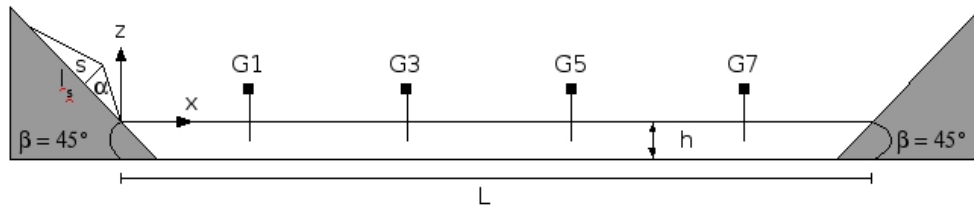


Figure 1: Schéma du canal numérique de longueur $L=9$ m et de profondeur $h=0.3$ m, indiquant les paramètres de la géométrie initiale du glissement de terrain (s : épaisseur, l_s : longueur, α : angle).

La figure 2 présente l'évolution temporelle de la surface libre calculée à partir de la position de l'interface air/eau au niveau des sondes G1(a), G3(b) et G5(c) (Figure 1). Le glissement de terrain génère au niveau de la sonde G1 une vague solitaire d'amplitude positive A^*_{\max} (A_{\max} / h) = 0.42, suivi d'un creux d'amplitude $A^*_{\min} = 0.22$. Au niveau des sondes G3 et G5, on observe une diminution et une stabilisation de la valeur de l'amplitude de la crête. On peut donc considérer qu'à ce stade la phase de génération est terminée et qu'on se trouve dans la zone de propagation. Le résultat du modèle présente de fortes similitudes avec les mesures réalisées par Fritz dans le cas d'un glissement granulaire. Les caractéristiques de la première vague sont identiques. Toutefois, le régime de vague est différent. On observe dans l'expérience la présence de vagues secondaires en amont de la vague principale correspondant à un régime non-linéaire transitoire (FRITZ, 2002). Ce train d'onde secondaire n'apparaît pas dans les simulations. Cette différence montre l'importance de la rhéologie du glissement sur la nature du régime de vagues générées à volume et Froude d'impact donné.

La figure 2d présente l'évolution des hauteurs d'inondation adimensionnelles, calculées sur la rampe de glissement (R^*_1) et le long de la rive opposée (R^*_2). A la fin de la phase de pénétration du glissement dans l'eau, la rampe est totalement découverte puis la hauteur d'inondation atteint une valeur équivalente à 84 % de la profondeur du canal. La hauteur maximale d'inondation sur la rive opposée est légèrement plus faible de l'ordre de 63%.

3. Résultats

3.1 **Forme du glissement à l'impact**

Dans la section précédente, on a mis en évidence l'influence de la rhéologie d'un glissement de terrain sur la phase de génération des vagues. L'objet de cette section est d'étudier l'impact de la forme du glissement au moment de l'impact sur les caractéristiques des vagues générées et des inondations consécutives. Quatre

cas sont envisagés. Dans chaque cas, on considère un glissement initial triangulaire (cf. Figure 1) à Froude d'impact $F=2.8$, de même volume, même ratio épaisseur sur longueur. Seul le paramètre α varie (8° , 16° , 32° , 45°). En jouant sur cet angle on peut produire des cas de génération de vague différents. Dans les premiers instants des simulations, correspondant à la pénétration du glissement dans l'eau, le glissement se déforme rapidement et la surface linéaire de départ devient vite courbe.

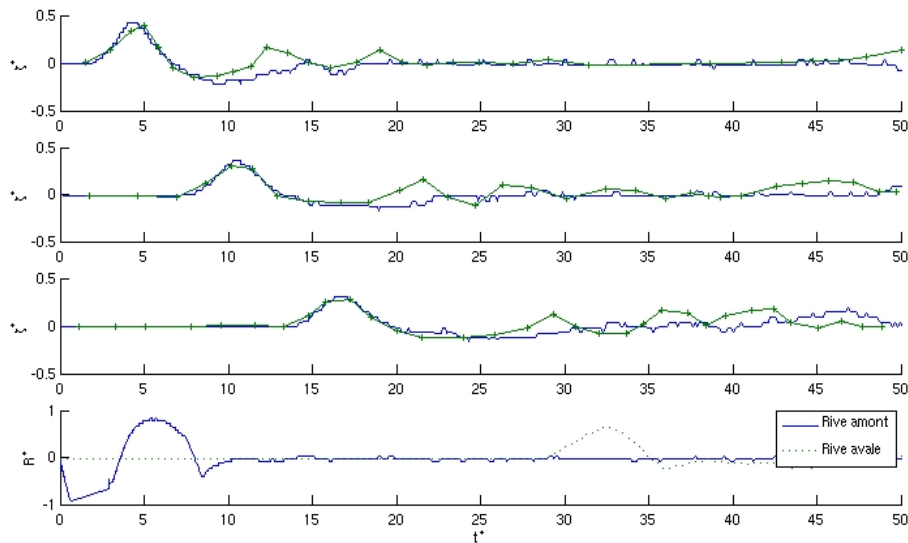


Figure 2: Les graphiques (a), (b) et (c) représentent l'évolution de la surface libre au niveau des sondes G1, G3 et G5 (figure 1). (modèle en trait continu et mesures de Fritz en pointillés). Les hauteurs d'inondation R_1^* (rive amont) et R_2^* (rive aval) figurent sur le graphique (d).

Nous présentons en figure 3 les résultats des simulations sous la forme de clichés séparant la phase de génération en 4 partie égales. Cette phase de génération est mesurée pour chaque cas par t_f^* qui est le temps (adimensionnel) limite où la vague peut être clairement distinguée de l'éclaboussure (figure 3 d et h). Les valeurs de t_f^* reportées sur la légende de la Figure 3 sont presque identiques pour les cas $\alpha=16,32$ et 45° . Les formes du glissement lors de la génération sont très proches pour les cas $\alpha=32$ et 45° , ce qui induit des déformations de surface libre également comparables. Les cas $\alpha = 8$ et 16° sont plus différents. Pour expliquer ces différences, on peut supposer qu'il existe pour la valeur de viscosité utilisée dans ces simulations un profil d'équilibre à l'impact. Il semblerait que la forme initiale avec $\alpha=8^\circ$ soit la plus éloignée de ce profil d'équilibre. Les interfaces eau/air sont donc assez différentes dans les cas

représentés sur le côté gauche. Alors que pour $\alpha=8^\circ$, on observe un recollement de l'interface derrière le glissement, emprisonnant au passage un volume d'air important. Dans le cas $\alpha=16^\circ$, l'ensemble du volume d'eau est déplacé vers l'aval et participe donc de façon plus importante à la formation de la vague. Les cas $\alpha=2^\circ$ et 45° sont également des cas où il n'y a pas réellement recollement derrière le glissement.

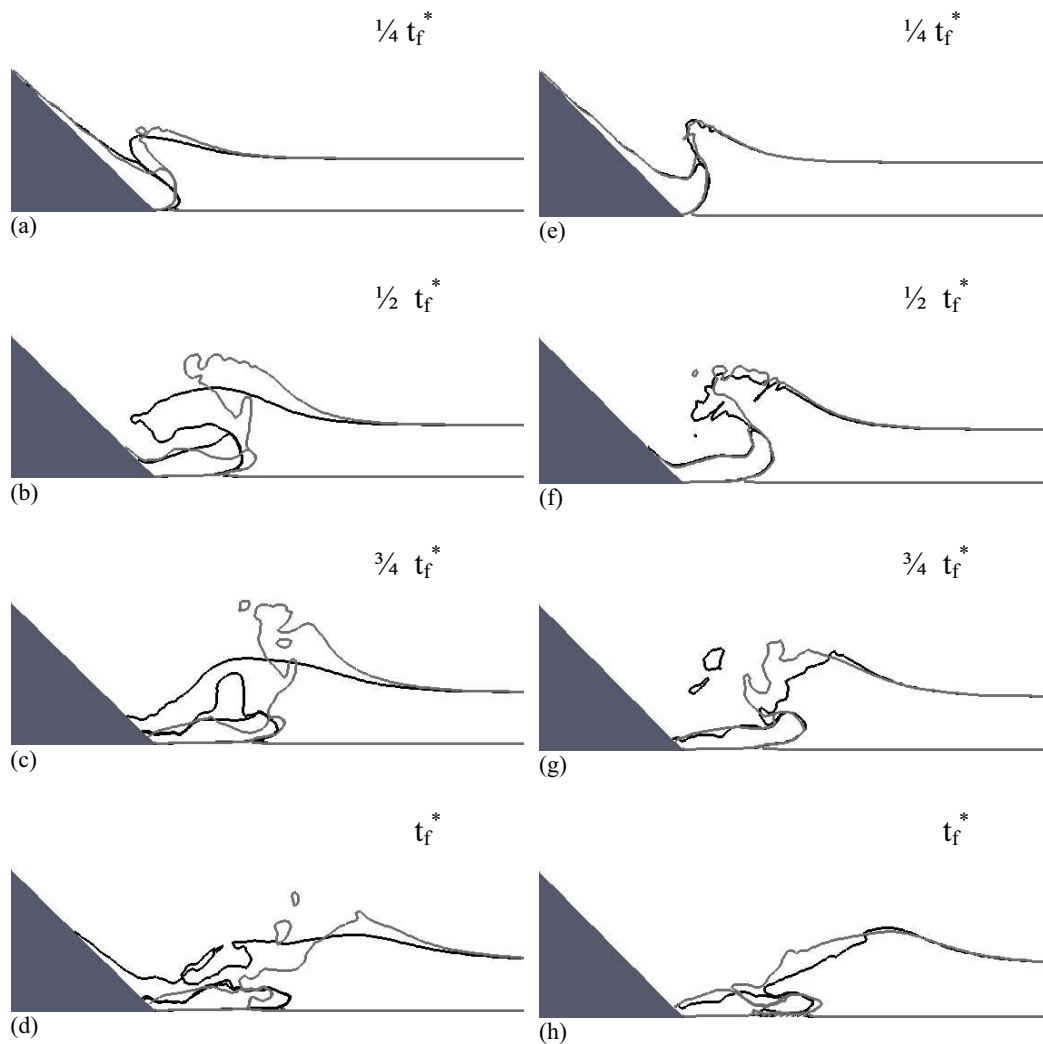


Figure 3: Déformation d'un glissement de terrain et évolution de la surface libre au cours de la phase de génération d'une vague (t_f^* : fin de la phase de génération) pour différentes formes initiales: (a), (b), (c), (d) $\alpha=8^\circ$ (contours noirs), ($t_f^*=4.2$), $\alpha=16^\circ$ (contours gris) ($t_f^*=3.8$), et (e), (f), (g), (h), $\alpha=2^\circ$ (contours noirs) ($t_f^*=3.7$), $\alpha=45^\circ$ (contours gris) ($t_f^*=3.8$). Viscosité identique = 150 Pa.s

Tableau 1. Valeurs adimensionnelles des amplitudes maximales et minimales des crêtes et creux (sondes G1 et G5) et des hauteurs d'inondation sur chaque pente. Δt^* mesure la durée du passage de la surface libre par deux zéros successifs encadrant le creux.

α°	$A^*_{\max}(G1)$	$A^*_{\min}(G1)$	$\Delta t^*(G1)$	$A^*_{\max}(G5)$	$A^*_{\min}(G5)$	$\Delta t^*(G5)$	$R^*_{1\max}$	$R^*_{2\max}$
8	0.42	0.22	11.45	0.31	0.17	12.9	0.84	0.63
16	0.84	0.5	17.4	0.42	0.23	20.8	0.03	0.84
32	0.63	0.28	16.5	0.32	0.18	19.5	0.03	0.68
45	0.53	0.24	11.5	0.37	0.17	17	0.46	0.79

L'influence des différences observées lors de la phase de génération sur la hauteur de vague et de hauteur d'inondation, est illustrée par les valeurs reportées dans le tableau 1. A la position correspondant à la sonde G1 (figure 1), le maximum d'amplitude est obtenu pour $\alpha = 16^\circ$. Les différences d'amplitudes varient du simple au double. Au fur et à mesure de la propagation, les caractéristiques des vagues tendent à s'homogénéiser pour ce qui est de la hauteur. L'étalement des ondes mesuré par Δt^* reste cependant assez différent.

Les répercussions en terme d'inondation sur chaque rive sont présentées dans les deux dernières colonnes du tableau 1. Les hauteurs d'inondation apparaissent très différentes pour ce qui est du flanc où le glissement s'est produit. Sur ce côté, on observe pour chaque cas un retrait initial de l'eau suivi uniquement dans les cas $\alpha=8^\circ$ et $\alpha=45^\circ$, d'une remontée des eaux qui peut être très importante comme dans le cas $\alpha=8^\circ$. Pour le côté aval, le signal d'inondation est à l'image des hauteurs de vagues générées, assez proche pour tous les cas. Le maximum d'inondation étant relié au hauteurs de vagues maximales.

3.2 Influence de la déformabilité

On étudie maintenant l'influence de la déformabilité du glissement (paramétrée par μ) sur les caractéristiques des ondes générées. Les paramètres des simulations sont les mêmes que précédemment. On fixe en revanche $\alpha=8^\circ$ et l'on fait varier μ (1, 250, 500 et 1000 Pa.s).

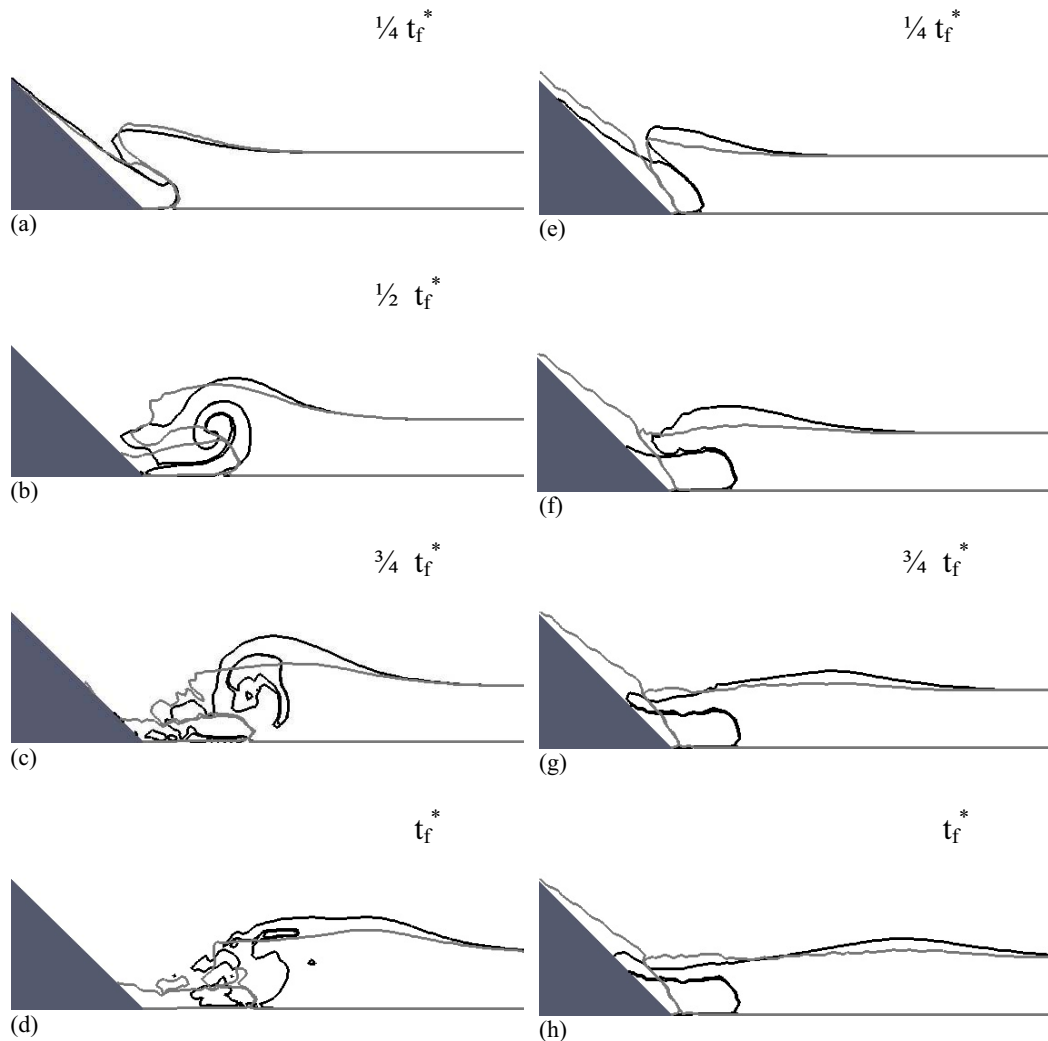


Figure 4: Déformation d'un glissement de terrain et évolution de la surface libre au cours de la phase de génération d'une vague (t_f^* : fin de la phase de génération) pour différentes viscosités initiales: (a), (b), (c), (d) $\mu=1$ Pa.s (contours noirs), ($t_f^*=4.2$), $\mu=250$ Pa.s (contours gris) ($t_f^*=4.6$), et (e), (f), (g), (h), $\mu=500$ Pa.s (contours noirs) ($t_f^*=4.9$), $\mu=1000$ Pa.s (contours gris) ($t_f^*=5.5$). Angle initiale $\alpha=8^\circ$.

La figure 4 présente les résultats des simulations pour différentes valeurs initiales de viscosité. On remarque que la durée de la phase de génération des vagues, représentée par t_f^* , augmente avec μ . Au moment de la pénétration du glissement dans l'eau ($\frac{1}{4} t_f^*$), la forme de la surface libre est quasiment identique pour les cas de viscosité 1, 250 et 500 Pa.s (figure 4 a, 4e). A ce stade, le glissement de terrain avec une viscosité de 1000 Pa.s génère une plus faible perturbation de la surface libre. Cette tendance se poursuit tout au long de la phase

de génération. L'analyse de la forme du glissement montre qu'il s'arrête une fois qu'il atteint le fond du canal contrairement au trois autres cas où il poursuit son mouvement. Pour une viscosité de 1 Pa.s, le glissement en se déformant propose une surface d'attaque très supérieure aux autres (figure 4 b et f), qui se traduit par une perturbation plus importante de la surface libre. Dans la phase suivante ($\frac{3}{4} t_f^*$), le mouvement rotationnel et élongationnel conduit à la dislocation du glissement.

Tableau 2. Même légende que pour le tableau 1 mais avec $\alpha=8^\circ$ et μ variant.

μ (Pa s)	$A_{\max}^*(G1)$	$A_{\min}^*(G1)$	$\Delta t^*(G1)$	$A_{\max}^*(G5)$	$A_{\min}^*(G5)$	$\Delta t^*(G5)$	$R_{1\max}^*$	$R_{2\max}^*$
1	0.58	0.39	13.2	0.41	0.22	19	1.2	0.8
250	0.37	0.23	12.8	0.26	0.17	16.4	0.1	0.6
500	0.31	0.13	8.6	0.21	0.12	10.1	0.2	0.4
1000	0.09	-	-	0.05	-	-	-	0.09

Le Tableau 2 montre que le caractère déformable du glissement joue un rôle important dans les caractéristiques de l'onde générée que ce soit proche de la zone de génération ou plus loin. Les amplitudes positives et négatives sont très différentes pour les deux positions de sondes. Le cas le plus visqueux, quasi rigide et ne pénétrant pas entièrement dans l'eau, ne génère que de très faibles ondes. Le cas le moins visqueux engendre la vague et la hauteur d'inondation maximales.

Cette répartition des hauteurs apparaît liée à deux effets: la dissipation visqueuse et la surface d'attaque. Les cas les plus visqueux, dissipant automatiquement plus d'énergie par cisaillement que les autres, transfèrent moins d'énergie à l'eau. L'effet de la forme apparaît aussi lié à la viscosité. Le cas $\mu=1$ Pa.s est une illustration claire de cet effet de forme qui favorise les transferts par pression. A cette étape de notre travail, l'étude précise de la contribution de chaque terme dans les transferts énergétiques apparaît fondamentale. Le modèle proposé dans cet article est un outil tout à fait adapté pour ces investigations futures.

4. Conclusions

Ce article propose une étude basée sur la simulation numérique des équations de Navier-Stokes du phénomène de génération de vague par un glissement de terrain à Froude d'impact super critique. Les effets de la forme à l'impact et de la déformabilité ont été étudiés à partir de glissements newtoniens. Pour une même viscosité, l'effet de la forme à l'impact, pour la gamme de cas réalisés, est limitée

à la zone de génération. Au delà, les caractéristiques des ondes sont assez proches. En revanche, les différences en terme de hauteur d'inondation sont importantes sur le flanc amont. L'effet de la viscosité apparaît plus significatif. Dans la gamme de glissements testés, le résultat en terme d'amplitude d'onde est très variable. Le cas le moins visqueux génèrent une surface d'attaque similaire à celle d'un piston qui se traduit par des amplitudes et des hauteurs d'inondation maximales. Cette étude illustre l'intérêt de l'approche numérique pour la compréhension et l'évaluation des risques liés aux vagues générées par des glissements de terrain.

5. Références

- ¹ FRITZ, H.M., 2002. *Initial Phase of Landslide Generated Impulse Waves*. Thesis Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, Swiss ETH No. 14'871. Swiss Federal Inst. Techn., Zürich, ISSN 0374-0056.
- ² LUBIN, P, VINCENT, S., ABADIE, S., CALTAGIRONE, J.P., 2006. *Three dimensional Large Eddy Simulation of air entrainment under plunging breaking waves*. Coastal Engineering, 53, 8, 631-655.
- ³ MONAGHAN, J.J., KOS, A., 2000. *Scott Russell's wave generator*. Physics of Fluids, 12, 3, 622-630.
- ⁴ HEINRICH, P., 1992. *Non linear water waves generated by submarine and aerial landslides*. J. Waterways, Port Coastal and Ocean Eng. 118, 249-266.
- ⁵ ABADIE, S, MORICHON, D., GRILLI, S., GLOCKNER, S., 2008. *VOF/Navier-Stokes numerical modeling of surface waves generated by subaerial landslides*. La Houille Blanche, 1, 21-26.
- ⁶ ABADIE, S, GRILLI, S., GLOCKNER, S., 2006. *A coupled numerical model for tsunami generated by subaerial and submarine mass failures*. 30th International Conference on Coastal Engineering 2006, San Diego, California, USA. 1420-1431.
- ⁷ ABADIE, S, MORICHON, D., GRILLI, S., GLOCKNER, S.. *A three fluid model to simulate waves generated by subaerial landslides*. Soumise à Coastal Engineering.