

Ronald A. Remmerswaal

NUMERICAL MODELLING OF VARIABILITY IN LIQUID
IMPACTS

CONTENTS

ACRONYMS	iii
1 INTRODUCTION	1

— Part 1 —

THIS IS WHAT THE FIRST PART IS ABOUT

2 A CHAPTER	5
2.1 Introduction	5
2.1.1 Specifics	5
2.1.2 Volume of fluid method	6
2.A Super hard proofs	6

— *Part 2* —

THE SECOND PART IS EVEN MORE INTERESTING

3	TRANSPORT OF MASS AND MOMENTUM	11
3.1	Introduction	11
3.2	Results	11
4	CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS	15
	BIBLIOGRAPHY	17

ACRONYMS

RT	Rayleigh–Taylor	11
VoF	volume of fluid	6

INTRODUCTION

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt



A. Droplet formation.



B. A breaking wave.

FIGURE 1.1. Examples of two-phase flow on different scales.

tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

— First part —

THIS IS WHAT THE FIRST PART IS ABOUT

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

A CHAPTER

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

2.1 INTRODUCTION

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

2.1.1 SPECIFICS

The following has a very difficult proof [2], which can be found in appendix 2.A.

THEOREM 1 (VERY IMPORTANT THEOREM). *For real numbers $x, y, z \in \mathbb{R}$ it holds that*

$$|x - z| \leq |x - y| + |y - z|. \quad (2.1)$$

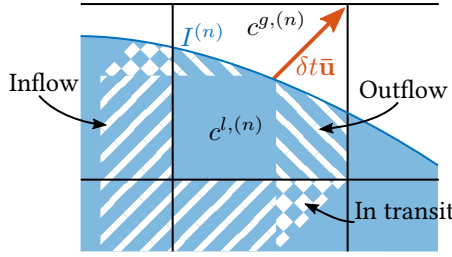


FIGURE 2.1. Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

COROLLARY 1 (OBVIOUS CONSEQUENCE).

$$|1 - 3| \leq |1 - 2| + |2 - 3|.$$

Proof. Let $x = 1, y = 2$ and $z = 3$ in theorem 1. □

2.1.2 VOLUME OF FLUID METHOD

The volume of fluid (VoF) method aims at tracking the volume of fluid per control volume, or equivalently the volume fraction in time. Conservation of the total liquid (or equivalently gas) volume amounts to conservation of mass for incompressible fluids, as are considered here, and therefore the VoF method is a popular choice when mass conservation is of interest. See also IMO [1], Popinet and collaborators [3].

If I want the acronym to be written in full, I use volume of fluid, and if I want it to be written short: VoF, and both: volume of fluid (VoF). To have a clickable full reference we can use volume of fluid (VoF).

APPENDIX 2.A SUPER HARD PROOFS

THEOREM 1 (VERY IMPORTANT THEOREM). *For real numbers $x, y, z \in \mathbb{R}$ it holds that*

$$|x - z| \leq |x - y| + |y - z|. \quad (2.1)$$

Proof. The proof is left as an exercise for the reader. □

Definition of \mathcal{Q}_j					
j	$\mathcal{S}_{\partial c}^{ \cdot }(\mathbf{x}_0)$	$\mathbf{x}_0 \in$			
		c	$\bar{\Delta}_c^+$	$\bar{\Delta}_c^-$	\mathcal{P}_c
1	0	N	N	N	N
2	0	Y	N	N	Y
3	1	N	Y	N	Y
4	1	Y	N	Y	N
5	2	N	Y	Y	N
6	2	Y	Y	Y	Y

TABLE 2.1. Nice table

— Second part —

THE SECOND PART IS EVEN MORE INTERESTING

*Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor
lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus.
Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae
ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut
massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et
magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna.
Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.*

TRANSPORT OF MASS AND MOMENTUM¹

Suspendisse vitae elit. Aliquam arcu neque, ornare in, ullamcorper quis, commodo eu, libero. Fusce sagittis erat at erat tristique mollis. Maecenas sapien libero, molestie et, lobortis in, sodales eget, dui. Morbi ultrices rutrum lorem. Nam elementum ullamcorper leo. Morbi dui. Aliquam sagittis. Nunc placerat. Pellentesque tristique sodales est. Maecenas imperdiet lacinia velit. Cras non urna. Morbi eros pede, suscipit ac, varius vel, egestas non, eros. Praesent malesuada, diam id pretium elementum, eros sem dictum tortor, vel consectetur odio sem sed wisi.

3.1 INTRODUCTION

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris. Figure 3.1A is nice.

3.2 RESULTS

Is there a Rayleigh–Taylor (RT) instability?

¹Based on a paper.

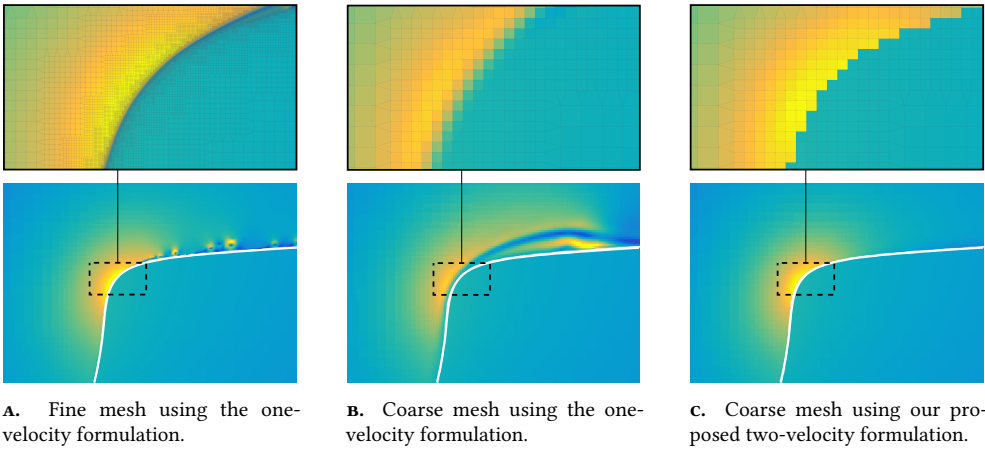


FIGURE 3.1. Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.

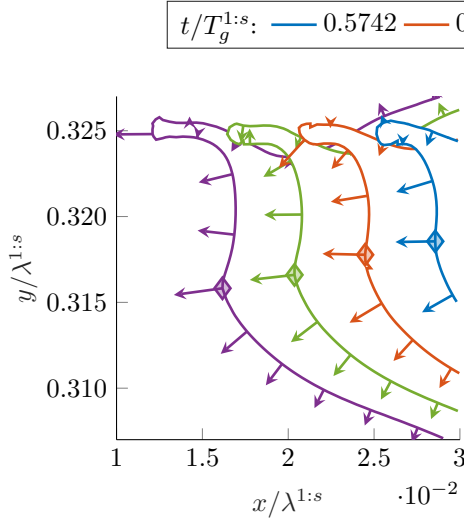


FIGURE 3.2. The interface profile several time instances. The arrows indicate the interface normal, with magnitude proportional to the interface normal velocity u_η . The solid marker indicates the left-most position of the lower part of the wave tip, and is used in fig. 3.3 to determine the wave tip acceleration.

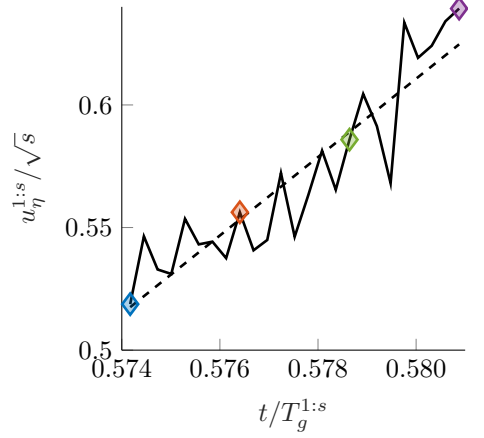


FIGURE 3.3. The interface normal velocity as function of time, at the wave tip position as indicated by the markers in fig. 3.2. The dashed line shows a linear least-squares fit with slope given by $\ddot{x}_{\text{Tip}} \approx -89\text{M/s}^2$, which we subsequently use as the wave tip acceleration resulting in $\lambda_{\text{RT}} \approx 9.8\text{mm}$.

CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

CONCLUSIONS

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

RECOMMENDATIONS

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.

BIBLIOGRAPHY

- [1] IMO (2020). Imo 2020 – cutting sulphur oxide emissions. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Sulphur-2020.aspx>. Accessed: 2021-12-17.
- [2] Lagrée, P.-Y., Staron, L., and Popinet, S. (2011). The granular column collapse as a continuum: validity of a two-dimensional Navier–Stokes model with a μ (I)-rheology. *Journal of Fluid Mechanics*, 686:378–408.
- [3] Popinet, S. and collaborators (2013–2020). Basilisk. <http://basilisk.fr>.