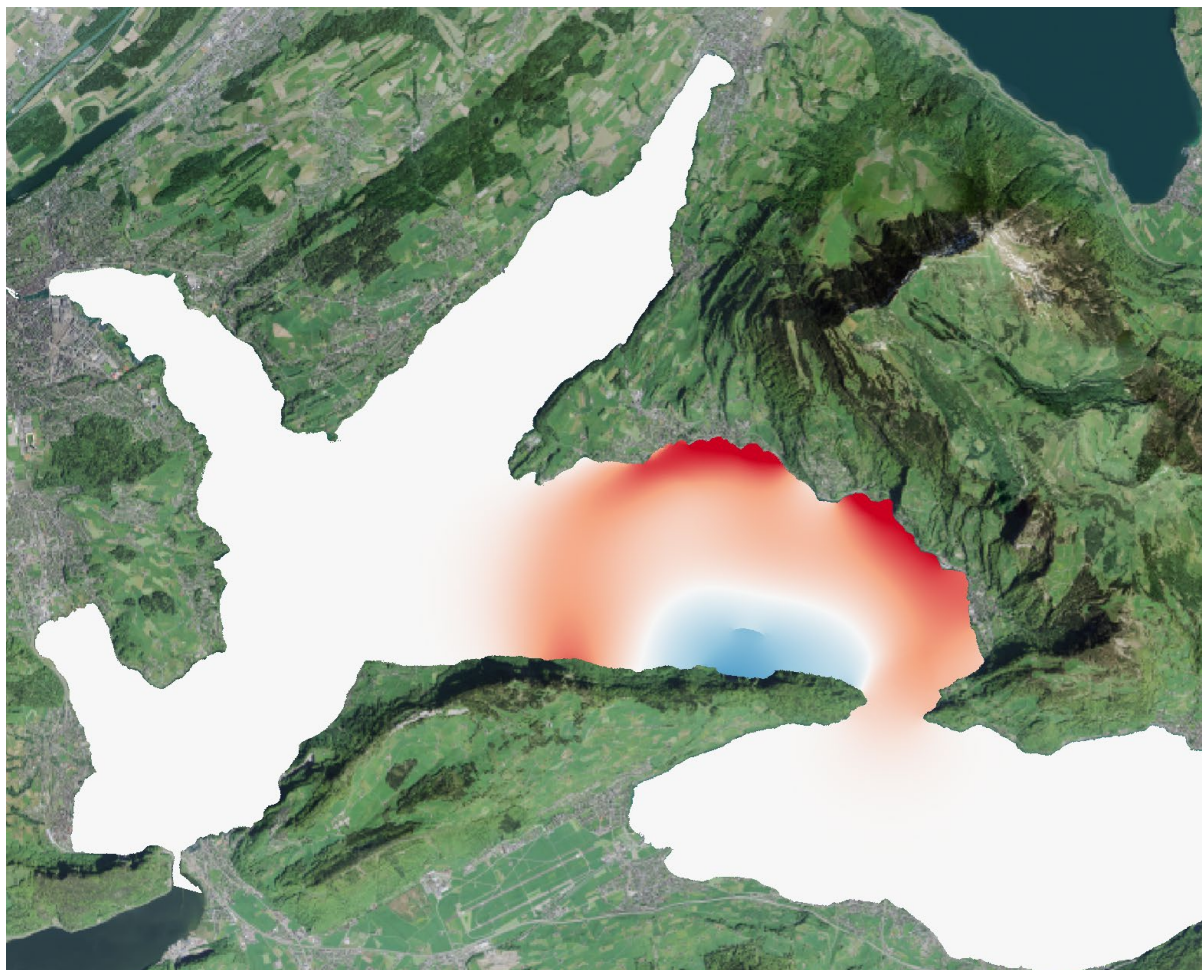


Guide pratique pour l'évaluation du danger lié aux tsunamis lacustres

Théorie et application



Zurich / Berne, 31.08.2026

Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV)

Image de couverture: Simulation de la propagation des vagues suite à l'éboulement d'Obermatt, au bord du lac des Quatre-Cantons.

Mentions légales

Mandant: Office fédéral de l'environnement (OFEV), division Prévention des dangers, CH-3003 Berne.

L'OFEV est un office du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC).

Mandataire: Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW),
ETH Zürich
Institut für Geologie, Universität Bern

Auteur: Jana C. Schierjott, Michael Strupler, Katrina Kremer, Flavio Anselmetti,
David F. Vetsch

Accompagnement OFEV: Eva Gertsch-Gautschi

Accompagnement: Amin Askarinejad, Florian Aubry, Piotr Bednarz, Paolo Bergamo, Thierry Bussard, Stéphane Commend, Christophe Dénervaud, Marc Diebold, Blaise Duvernay, Guillaume Favre-Bulle, Sacha Gaillet, Sébastien Gaudillere, Christian Gerber, Stéphanie Girardclos, Philippe Heller, Christoph Knellwolf, Michel Kuhrmann, Antoine Magnollay, Etienne Monbaron-Jalade, Thomas Schneider, Gabrielle Schwab Rouge, David Siffert, Christian Volz, Olivier Watts

Remarque: La présente étude a été réalisée sur mandat de l'OFEV. Seul le mandataire porte la responsabilité de son contenu.

Proposition de citation

Jana C. Schierjott, Michael Strupler, Katrina Kremer, Flavio Anselmetti, David F. Vetsch (2026) :
Guide pratique pour l'évaluation du danger lié aux tsunamis lacustres. Théorie et application.
<https://doi.org/10.3929/ethz-c-000804606>

La version française du manuel a été traduite à l'aide de DeepL, et de chatGPT puis révisée par Katrina Kremer.

Préface

Ce manuel présente une méthode d'évaluation du danger lié aux tsunamis lacustres. Les auteur(e)s se sont inspiré(e)s des manuels d'évaluation existants et financés par l'OFEV traitant les dangers d'inondation ou des mouvements de masse. En Suisse, des tsunamis lacustres ont eu lieu sur plusieurs lacs durant les derniers ~1500 ans, comme en témoignent les archives historiques. Nous pouvons notamment citer l'exemple de l'évènement du lac des Quatre-Cantons en 1601, lors duquel un tsunami d'environ 4 mètres de haut a submergé une partie de la ville de Lucerne. En raison de la situation et de la topographie des lacs suisses, les tsunamis lacustres constituent un danger potentiel. La question n'est pas "si" mais "quand" le prochain tsunami aura lieu. Pour que la population, qui continue d'augmenter depuis les évènements historiques, puisse être avertie suffisamment tôt et que d'éventuelles mesures préventives puissent être prises, il est essentiel d'évaluer le danger lié aux tsunamis lacustres. Une approche possible consiste à simuler numériquement les tsunamis lacustres et à traiter les résultats en conséquence, par exemple à l'aide de cartes de dangers. Ce manuel présente tout d'abord les bases théoriques de la simulation de trois mécanismes différents de déclenchement des tsunamis lacustres. Il décrit ensuite la méthode d'évaluation du danger lié aux tsunamis lacustres et en illustre l'application à l'aide d'exemples.

Remarque: Les exemples présentés dans ce manuel s'appuient sur BASEMENT version 4 et QGIS 3.40 (Bratislava). Les experts chargés du traitement sont responsables des éventuelles adaptations du flux de travail rendues nécessaires par les mises à jour logicielles.

Table des matières

Mentions légales	3
Préface.....	4
Table des matières.....	6
1 Introduction.....	9
1.1 Aperçu	9
1.2 Tsunamis lacustres en Suisse	10
1.3 Contexte	10
1.4 Objectif du guide pratique.....	11
1.5 Structure du guide pratique	12
2 Contexte théorique & approche de modélisation	15
2.1 Aperçu	15
2.2 Génération de tsunamis par TERM.....	16
2.3 Génération de tsunamis par SAQM	17
2.4 Contexte de l'approche probabiliste	17
2.4.1 Latin-Hypercube Sampling	18
2.4.2 Distribution log-normale.....	18
2.4.3 Percentile.....	18
3 Analyse de la situation	20
3.1 Données de base communes aux TERM et aux SAQM.....	20
3.2 Données spécifiques aux TERM.....	20
3.2.1 Disposition aux TERM	20
3.2.2 Calcul du paramètre du produit d'impulsion	20
3.2.3 Calculs pour l'entrée de l'onde dans le modèle	21
3.3 Données spécifiques aux SAQM	23
3.3.1 Disposition aux SAQM non deltaïques.....	24
3.3.2 Disposition aux SAQM deltaïques.....	28
3.4 Carte de disposition.....	28
3.4.1 Événements passés.....	29
4 Elaboration des scénarios	30
4.1 Scénarios de base	30
4.2 Scénarios avancés	30
4.3 Autres facteurs dans l'élaboration des scénarios.....	31
5 Analyse des effets	32

5.1 Préparation de la simulation.....	32
5.1.1 Zone d'étude.....	32
5.1.2 Condition aux limites interne pour les TERM.....	34
5.1.3 Domaines pour SAQM.....	35
5.1.4 Génération de grilles de calcul.....	36
5.2 Simulation.....	36
5.2.1 Modèle initial.....	36
5.2.2 Sensibilité de la grille.....	36
5.2.3 Calibration et validation.....	37
5.2.4 Analyse de sensibilité et modélisation probabiliste	37
5.2.5 Application avec le logiciel de simulation BASEMENT.....	37
5.3 Évaluation et visualisation des résultats.....	38
6 Exemple d'application	40
6.1 Prérequis matériels et logiciels	40
6.2 Analyse de la situation	40
6.2.1 Données spécifiques pour les TERM.....	41
6.2.2 Données spécifiques pour les SAQM	43
6.2.3 Elaboration des scénarios.....	47
6.3 Analyse des effets.....	47
6.3.1 Préparation de la simulation.....	47
6.3.3 Évaluation	58
Annexe A : Base de données.....	60
Annexe B Exemple d'approche de simulation probabiliste.....	61
8 Bibliographie	62

1 Introduction

1.1 Aperçu

Le mot tsunami vient du japonais et est composé de deux mots : "tsu" (port) et "nami" (vague) (Darbyshire and Ishiguro, 1957 ; Goff et al., 2016). Le terme a été utilisé pour la première fois par des pêcheurs japonais qui, à leur retour de la mer, ont découvert des villages côtiers détruits par des vagues. Bien que les pêcheurs n'aient pas observé de vagues extraordinaires en pleine mer, les destructions causées par les masses d'eau sur la côte étaient énormes. Caractéristiques importantes des tsunamis sont leur grande longueur d'onde et leur faible hauteur de vague par rapport à la profondeur de l'eau dans laquelle ils se propagent. De ce fait, les tsunamis passent inaperçus en eau profonde, et ne sont perceptibles que par des bouées de mesure. Mais dès qu'un tsunami s'approche d'une zone riveraine moins profonde, la vague s'amplifie considérablement et le tsunami peut inonder de vastes zones. Une autre caractéristique importante des tsunamis est leur vitesse de propagation élevée. Il peut donc être difficile d'avertir de l'arrivée d'un tsunami, surtout lorsque la distance entre le lieu d'origine et la rive est courte, comme c'est le cas dans les lacs.

Un tsunami, ou plus précisément la vague associée, est généré par une modification soudaine du niveau de l'eau. Cela peut notamment résulter d'un déplacement vertical du fond du lac lors d'un séisme, mais aussi d'un glissement de terrain ou de l'effondrement d'un flanc de volcan déplaçant un grand volume d'eau (fig. 1.1).

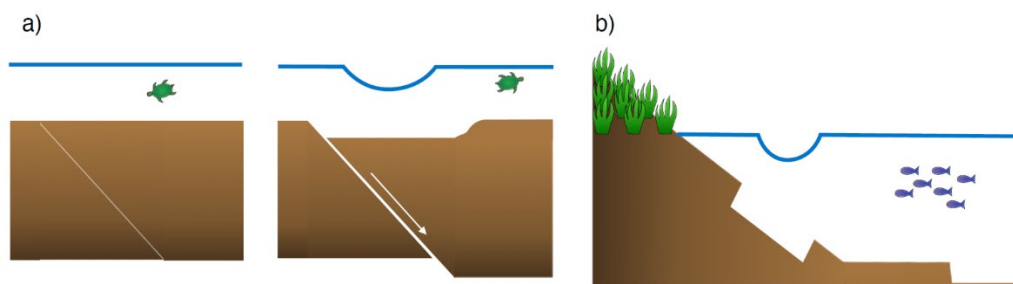


Figure 1.1 : Deux exemples de mécanismes déclencheurs possibles d'un tsunami. a) par le déplacement soudain du fond du lac lors d'un séisme; b) par un mouvement de masse soudain le long d'une pente sous-lacustre, qui provoque le déplacement du niveau de l'eau.

L'origine japonaise du mot indique que les tsunamis sont un phénomène considéré souvent comme marin. Cependant, les archives historiques montrent que les tsunamis peuvent se produire aussi en milieu lacustre.

Comme en milieu marin, les tsunamis lacustres peuvent avoir de multiples causes : déplacement vertical du fond du lac dû à un séisme (p. ex. en 1858, Lac Patzcuaro au Mexique, (Garduño-Monroy et al., 2011)), une variation de la pression atmosphérique (Great Lakes, États-Unis (Bechle et al., 2016)) ou par des éruption volcaniques (Lac Taal, Philippines (Saderra Masó, 1904, 1911 ; Paris et al., 2014)). Selon une étude portant sur les tsunamis lacustres historiques et préhistoriques, leur cause la plus fréquente, cependant, est le mouvement de masse sur une pente qu'il se produise au-dessus ou en-dessous du niveau de l'eau (Kremer et al., 2021). Ces mouvements de masse peuvent être déclenchés non seulement par une surcharge sédimentaire (lorsque le taux de sédimentation est élevé, ce qui résulte en un mouvement de masse « spontané »), mais aussi par des séismes

Un exemple d'évènement est le tsunami de 4 m de haut survenu dans le lac Chehalis au Canada en 2007, déclenché par un glissement de terrain terrestre au-dessus du niveau d'eau du lac (Roberts et al., 2013). La vague de tsunami a détruit tous les campings qui se trouvaient au bord du lac et a atteint une hauteur de run-up (hauteur maximale de remontée sur la rive) atteignant 37,8 m au-dessus du niveau moyen du lac. De plus, la vague s'est encore propagée sur plusieurs kilomètres vers l'aval dans la rivière Chehalis. Un autre exemple est la vague de tsunami d'une amplitude de 2.5 m qui a inondé la ville de Bariloche et a causé 2 morts. Cette vague a été causée par des mouvements de masse sur les pentes sous-lacustres du lac Nahuel Huapi (Argentine), à la suite d'un tremblement de terre au Chili en 1960 (Barros and Sievers, 1961 ; Parsons, 2002 ; Chapron et al., 2006 ; Beigt et al., 2016). Un aperçu général des tsunamis lacustres, y compris le volume des mouvements de masse terrestre (au-dessus du niveau d'eau) et des victimes, est résumé dans Heller and Ruffini (2023).

1.2 Tsunamis lacustres en Suisse

La Suisse dispose à ce jour des archives sur les tsunamis lacustres les plus complètes à ce jour, comprenant à la fois des événements documentés historiquement et des événements préhistoriques reconstitués à partir des sédiments lacustres. Les documents historiques ainsi que les travaux de recherche géologique montrent qu'en Suisse, les tsunamis lacustres sont principalement dus à des mouvements de masse sur des pentes terrestres en bordure des lacs et sur des pentes subaquatiques. Quelques exemples sont cités ci-dessous.

En 563 AD, un éboulement dans la vallée du Rhône a entraîné un mouvement de masse subaquatique deltaïque (SAQM) dans le delta du Rhône. Selon une simulation numérique, cet événement a provoqué une vague de 13 m de haut, qui a inondé une partie de la vieille ville de Genève (Kremer et al., 2012). En 1601, un séisme de magnitude 5,9 a déclenché plusieurs SAQM non deltaïques simultanés et des éboulements terrestres dans le lac des Quatre-Cantons (Schnellmann et al., 2002 ; Siegenthaler et al., 1987). Les vagues du tsunami qui en a résulté ont atteint une hauteur allant jusqu'à 4 m et ont inondé une partie de la ville de Lucerne. En 1687, un tsunami d'une hauteur de 5 m a été observé dans le lac des Quatre-Cantons, dans les secteurs des bassins de Gersau et Uri. Un SAQM deltaïque dans le delta de la Muota est supposé en être la cause (Hilbe and Anselmetti, 2014). Un événement similaire est également décrit en 1996 pour le delta de l'Aar, dans le lac de Brienz, où une vague de 0,5 m de haut a été déclenchée (Girardclos et al., 2007). Ces exemples montrent que le danger de tsunami est bien réel en Suisse et qu'il peut entraîner des dommages humains et matériels considérables, notamment dans le contexte de la croissance des zones urbanisées le long des lacs.

1.3 Contexte

Le présent manuel s'inscrit dans le contexte du rapport « Gestion des dangers naturels en Suisse » de l'Office fédéral de l'environnement, publié en 2016, qui met en évidence la nécessité d'agir en matière de gestion des dangers naturels. La mesure n° 9 prévoit la mise à disposition de bases applicables à l'ensemble du territoire suisse pour tous les processus de danger pertinents. Il est apparu que ces bases faisaient encore défaut, notamment pour le processus hydrologique du tsunami. Ces bases comprennent l'élaboration de la méthodologie, des bases de dangers et du modèle de données, ainsi que leur intégration à l'échelle nationale dans les cartes de dangers des cantons et dans le géoportail suisse. Afin de développer une méthodologie uniforme pour l'évaluation de l'exposition au danger de tsunami en Suisse, l'OFEV a lancé en 2018 le projet de recherche TSUNAMI-CH puis a fait élaborer le présent manuel destiné à la pratique sur la base de ces travaux scientifiques. Ce manuel permet d'effectuer une évaluation uniforme des dangers liés aux tsunamis sur l'ensemble du territoire suisse. Grâce à la

méthodologie présentée dans ce guide, les cantons peuvent répondre aux exigences de l'OFEV en matière d'évaluation des dangers liés aux tsunamis. Ces exigences sont présentées de manière concrète dans l'aide à l'exécution « Évaluation des dangers » et dans l'instrument d'exécution « Évaluation des dangers liés à l'eau » (tous deux en cours d'élaboration, publication prévue en 2027).

Dans le cadre du projet de recherche TSUNAMI-CH financé par l'OFEV, une démarche d'évaluation de l'aléa tsunami (AET) a été développée pour les SAQM non deltaïques, afin de simuler (1) la génération des ondes (2) leur propagation et (3) le run-up des vagues sur les rives, y compris les inondations qui en résultent. Pour avoir un meilleur aperçu, nous référons à l'étude de Strupler et al. (2020b). L'AET a ensuite été étendue afin de prendre également en compte les dangers liés aux mouvements de masse terrestres (TERM) et aux mouvements de masse subaquatiques deltaïques (SAQM deltaïques) (Strupler et al., 2024).

Le fait que les tsunamis lacustres représentent un danger pour les personnes et les infrastructures n'est toutefois pas nouveau. Ainsi, dès 1988, des calculs portant sur la génération et la propagation des ondes dans le lac du Klöntal ont été effectués pour le compte de la Nordostschweizerische Kraftwerke AG (NOK) (Huber and Chervet, 1988). Cette étude avait été motivée à la suite de mouvements de masse rocheuse mesurés sur les versants bordant le lac, susceptibles de conduire à un éboulement et, par conséquent, de générer des tsunamis. L'objectif était d'évaluer les dommages matériels au barrage de Rodannenbergr et à la centrale hydroélectrique de Löntsch.

Depuis lors, les modèles numériques de simulation de tsunamis ont considérablement évolué, et la propagation des ondes peut aujourd'hui être calculée efficacement à l'échelle de lacs entiers. Par ailleurs, les capacités de calcul actuellement disponibles sont généralement suffisantes pour réaliser des simulations numériques. Ce manuel synthétise les résultats des recherches menées à ce jour ainsi que les démarches qui en découlent pour évaluer le danger lié aux tsunamis lacustres. Il vise plus précisément à fournir aux spécialistes une base pour l'évaluation de ce danger.

1.4 Objectif du guide pratique

Ce manuel décrit la démarche à suivre pour évaluer le danger lié aux tsunamis lacustres. L'objectif n'est pas seulement d'estimer la hauteur des vagues à l'aide de modélisation, mais aussi de représenter de manière aussi réaliste que possible les effets potentiels des inondations sur les rives. A cette fin, le modèle numérique prend en compte la bathymétrie du lac ainsi que la topographie des zones riveraines, y compris les bâtiments. La simulation du run-up des vagues permet d'estimer les zones potentiellement inondées ainsi que les profondeurs d'eau et les vitesses d'écoulement, afin de permettre une évaluation détaillée du danger. Des mesures préventives peuvent être définies sur la base de ces résultats.

Ce manuel considère deux principaux types de mouvements de masse. D'une part, il traite des mouvements de masse dont l'origine se situe au-dessus de la surface de l'eau (p. ex. les éboulements, les glissements de terrain, les éboulements glaciaires, les avalanches de neige, etc.), regroupés ici sous le terme de mouvements de masse terrestres (**TERM**). D'autre part, il considère des mouvements de masse dont l'origine se situe sous la surface de l'eau, désignées comme mouvements de masse subaquatiques (SAQM). Parmi les SAQM, une distinction est faite entre ceux qui se produisent sur une pente subaquatique latérale non deltaïque (**SAQM non deltaïques**) et ceux qui se produisent dans la zone du delta d'un cours d'eau (**SAQM deltaïques**).

1.5 Structure du guide pratique

La structure du manuel s'inspire de l'approche générale de l'Office Fédéral de l'Environnement (OFEV) en matière d'évaluation du danger naturels (fig. 1.2). Le manuel est structuré comme suit: (1) le chapitre consacré à la méthodologie présente les bases de la modélisation des vagues de tsunami ainsi que les principes théoriques relatifs aux différents mécanismes de déclenchement; (2) le chapitre "Analyse de la situation" présente les données de base nécessaires à l'élaboration des scénarios puis à leur simulation; (3) le chapitre "Elaboration des scénarios" décrit les différents mécanismes de déclenchement en tenant compte de leurs causes potentielles (p. ex. les séismes) ainsi que la sélection des mouvements de masse potentiels déterminants à partir de la carte de disposition; (4) le chapitre "Analyse des effets" présente la préparation et la réalisation des simulations ainsi que la visualisation des résultats; (5) enfin, un exemple d'application illustre de manière concrète l'ensemble de la démarche.

Analyse de la situation

L'analyse de la situation comprend plusieurs étapes. Outre la recherche bibliographique et, éventuellement les relevés de terrain, qui ne sont pas décrits dans ce manuel, elle comprend les étapes suivantes:

1. Acquisition des données de base relatives au lac à étudier (chapitre 2)
2. Calcul des paramètres et préparation des jeux de données relatifs aux TERM (chapitre 3.2.2)
3. Cartographie des SAQM potentiels (chapitre 3.3.1)
4. Elaboration des cartes de disposition

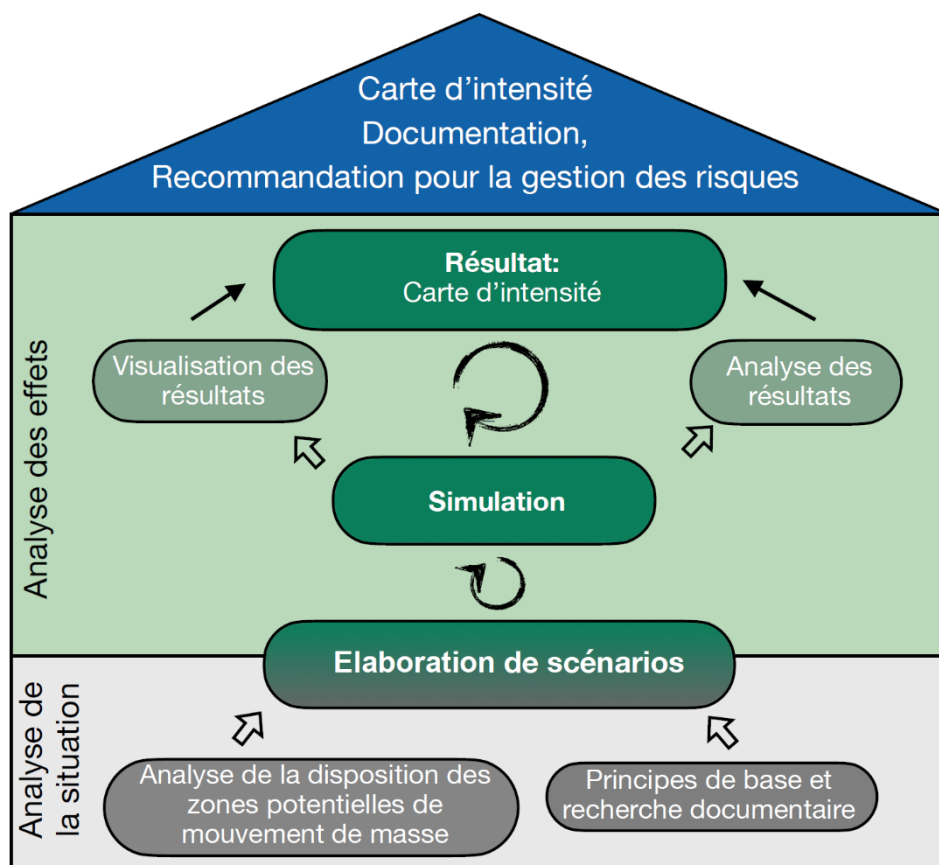


Figure 1.2: Approche générale de l'évaluation du danger liés aux tsunamis lacustres. Ce graphique illustre la structure de base de l'évaluation du danger. La structure retenue s'oriente à celle utilisée pour d'autres dangers naturels (manuels FAN). L'analyse de la situation constitue la base. Elle comprend une recherche bibliographique initiale et éventuellement des relevés de terrain et une cartographie. A l'aide de ces informations, différents scénarios peuvent être élaborés. Dans le cadre de l'analyse des effets, ces scénarios sont modélisés et les résultats des simulations sont visualisés et analysés. Des cartes d'intensité peuvent ensuite être établies à partir de ces résultats. Celles-ci, ainsi que la documentation, constituent le résultat de l'évaluation du danger et servent de base à la gestion du risque.

Elaboration des scénarios

L'élaboration des scénarios fait le lien entre l'analyse de la situation, qui consiste principalement à collecter les données nécessaires, et l'analyse des effets, qui comprend la simulation et l'évaluation. Elle constitue ainsi un élément central de l'évaluation du danger lié aux tsunamis lacustres. Cette étape consiste à analyser les cartes de disposition et à définir les scénarios déterminants pour la simulation.

Analyse des effets

Après l'élaboration des scénarios, l'étape suivante consiste à préparer et à réaliser les simulations dans le cadre de l'analyse des effets, puis à en évaluer les résultats de la simulation et à les adapter à la forme de représentation souhaitée.

Cette dernière partie de l'évaluation du danger lié aux tsunamis lacustres est comparable à la démarche utilisée pour l'élaboration des cartes d'intensité des inondations.

1. Préparation de la simulation (chapitre 5.1) :
 - Création du domaine de modélisation du lac
 - Définition des conditions initiales et des conditions aux limites
 - Création de la grille de calcul en tenant compte des zones associées aux mouvements de masse et des conditions aux limites
2. Réalisation de la simulation (chapitre 5.2)
3. Evaluation et visualisation des résultats (chapitre 5.3).

Les différentes étapes sont présentées plus en détail à la Fig. 1.3.

Évaluation des dangers : tsunamis déclenchés par SAQM et TERM

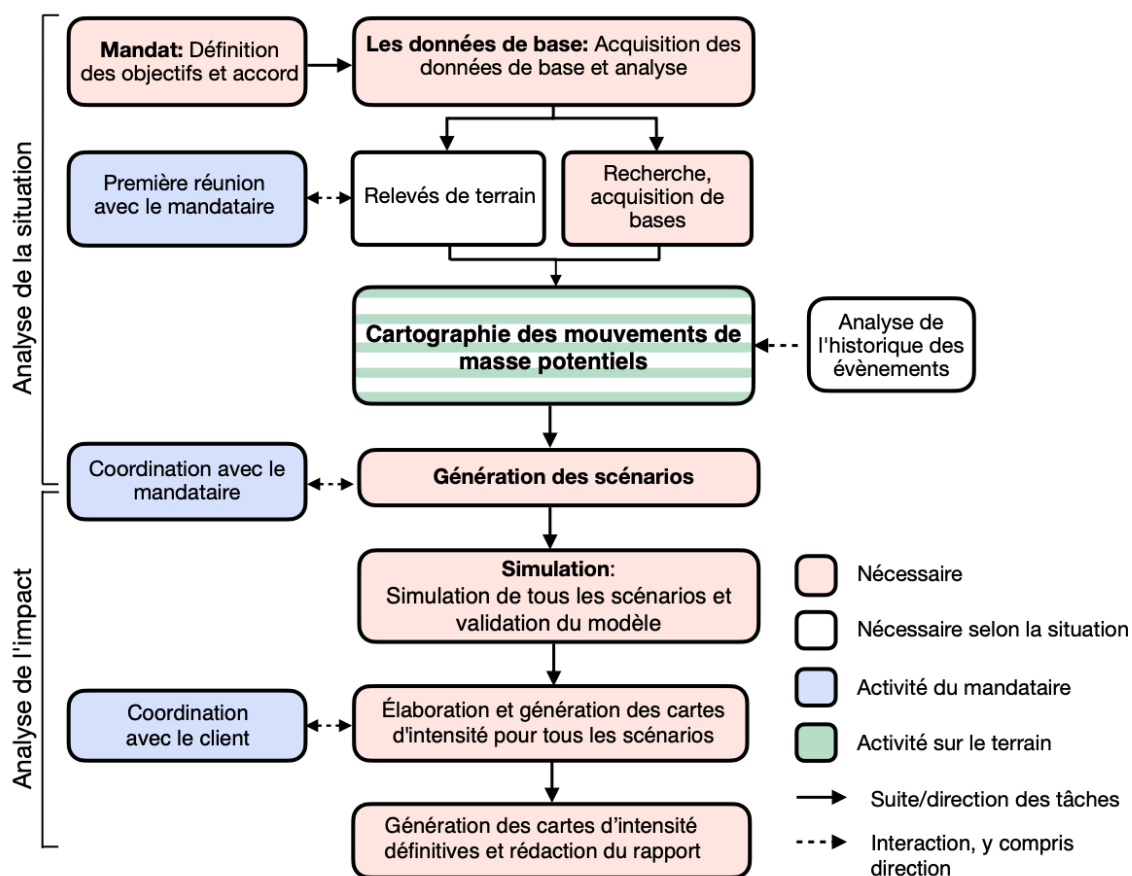


Figure 1.3: Démarche générale pour l'évaluation du danger liés aux tsunamis lacustre.

2 Contexte théorique & approche de modélisation

2.1 Aperçu

La démarche d'évaluation de l'aléa tsunami (AET) a été développée afin de simuler (1) la génération des vagues par des TERM et des SAQM, (2) leur propagation et (3) le run-up des vagues sur les rives, y compris les inondations qui en résultent (voir fig. 2.1). Les données de base nécessaires comprennent des informations cartographiées et des estimations relatives à des mouvements de masse passés ou potentiels ainsi qu'à leurs caractéristiques, notamment leur localisation, leur étendue et leur épaisseur.

Les principales incertitudes de l'AET concernent l'estimation de la localisation et des caractéristiques des mouvements de masse potentiels. Les analyses de sensibilité montrent l'épaisseur du mouvement de masse exercent une influence considérable sur le vague généré. Comme l'épaisseur exacte d'un mouvement de masse est difficile à prévoir, les effets de mouvements de masse présentant différentes épaisseurs peuvent être étudiés à l'aide de plusieurs scénarios. Si nécessaire, une approche probabiliste peut également être utilisée. Ce chapitre présente les méthodes utilisées pour modéliser la génération des ondes par des TERM et SAQM deltaïques et non deltaïques.

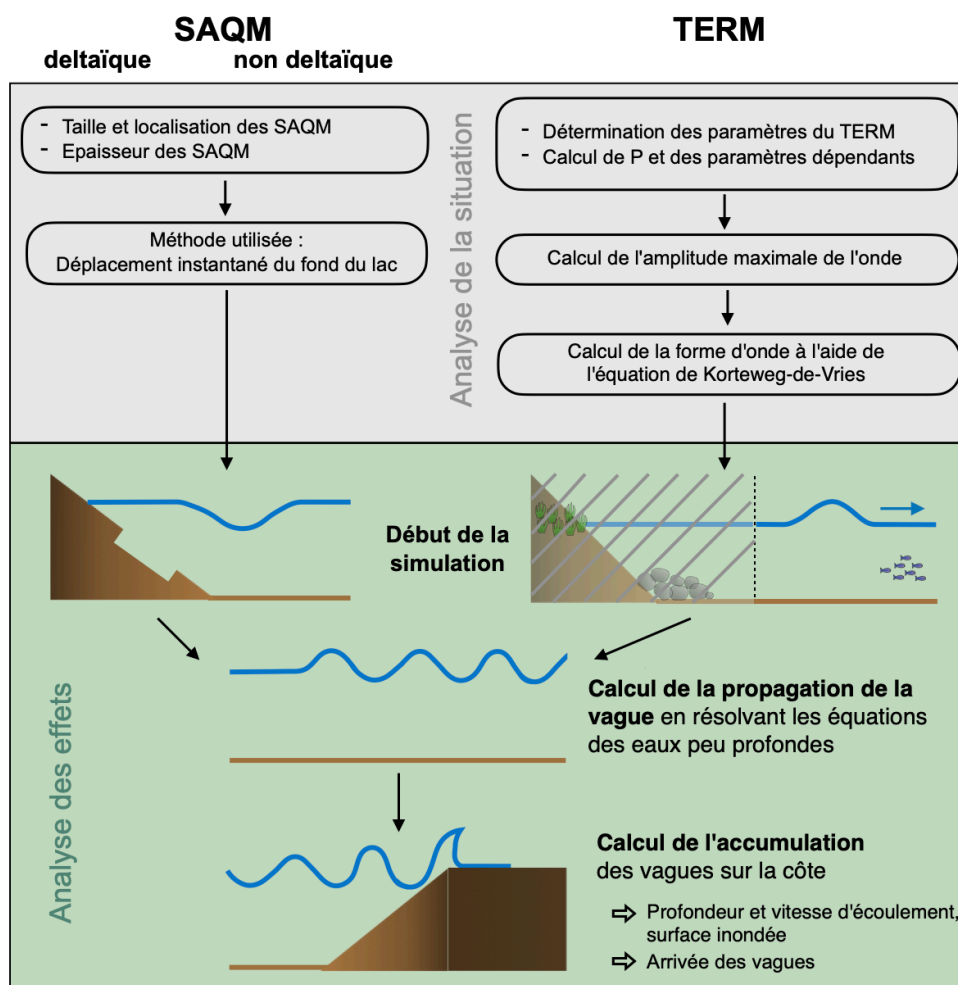


Figure 2.1 : Représentation conceptuelle du processus de simulation d'un tsunami lacustre pour différents mécanismes de déclenchement. SAQM et TERM se distinguent par leur approche physique, et par conséquent, par leur approche numérique.

2.2 Génération de tsunamis par TERM

Les mouvements de masse terrestres (TERM) entraînent la chute de masses de terre, de roches, de neige ou de glace dans un lac avec une certaine vitesse, et, par conséquent, une certaine impulsion (fig. 2.2). Ces mouvements de masse résultent souvent de la combinaison d'une prédisposition géologique et d'un facteur déclenchant, tel que de fortes précipitations, des processus de gel-dégel, de fortes chutes de neige, une surcharge due à l'accumulation de la couche de sédiments, des modifications anthropiques (p. ex. carrières instables, dynamitage), des séismes ou encore des éruptions volcaniques. Dans ce type de scénario, le tsunami qui en résulte est modélisé sous la forme d'une onde d'impulsion. Il existe différents types d'ondes de d'impulsion, notamment l'onde solitaire, le bore ou mascaret, l'onde cnoïdale et l'onde de Stokes (Evers et al., 2019a). L'onde solitaire est le type d'onde d'impulsion le plus fréquemment utilisé jusqu'à présent pour la modélisation des tsunamis (Madsen et al., 2008). Cela s'explique notamment par le fait que les ondes solitaires possèdent une solution mathématique univoque et que, malgré leur caractère non linéaire, elles peuvent être décrites à l'aide de seulement deux paramètres (p. ex. Madsen et al., 2008). Ces propriétés les rendent particulièrement intéressantes pour l'élaboration de solutions analytiques et numériques. Par ailleurs, Hammack Jr et Raichlen (1972), Hammack (1973), Segur (1973) et d'autres auteurs ont pu montrer qu'une variation impulsive, positive ou négative, du niveau de l'eau à profondeur constante entraîne la formation d'une onde solitaire. Goring (1978) et Yeh et al. (1994) avancent des arguments similaires et indiquent qu'après une longue période de propagation, l'onde de tsunami tend à prendre la forme d'une onde solitaire.

Les tsunamis déclenchés par des TERM ont été étudiés non seulement sur le plan théorique, mais également en laboratoire dans des canaux et bassins à houle (Evers et al., 2019b ; Heller, 2007 ; Heller and Hager, 2011). L'institut d'hydraulique, d'hydrologie et de glaciologie (VAW) de l'école polytechnique de Zurich joue un rôle important dans ce domaine, car il a acquis une vaste expertise dans l'estimation des ondes d'impulsion générées par des TERM (p. ex. Heller et al., 2009 ; Heller and Hager, 2010, 2014). Ces études ont notamment abouti au guide "Landslide-generated Impulse Waves in Reservoirs : Basics and Computation" (Evers et al., 2019a), qui décrit l'approche physique sur laquelle repose la méthode numérique utilisée ici. Evers et al. (2019a) indiquent également qu'une onde solitaire ne possède pas de creux, ce qui signifie que son amplitude correspond à sa hauteur. Elle est également classée comme une onde en eau peu profonde, car le rapport entre la longueur d'onde et la profondeur d'eau moyenne est généralement supérieur à 20.

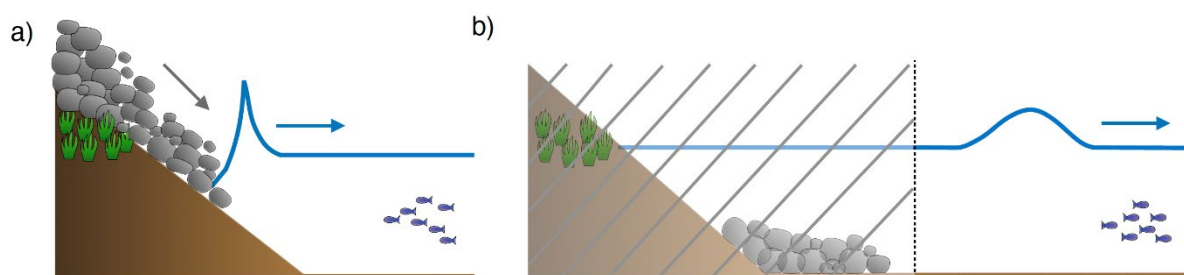


Figure 2.2 : La figure illustre le concept de génération d'un tsunami par un TERM. a) montre l'état pendant le glissement de terrain ou l'éboulement ; b) illustre l'onde qui se forme à la suite de l'interaction avec l'eau et qui se propage

Dans le cas des TERM, l'immersion de la masse en mouvement dans le lac entraîne un transfert d'impulsion, qui génère une onde. La génération d'un tsunami peut être divisée en deux phases: 1) l'interaction initiale de la masse en mouvement avec l'eau initialement au repos, et 2) la réaction de l'eau qui en résulte sous la forme d'une onde (Evers et al., 2019b). Dans le présent manuel, la première phase n'est pas prise en compte, car l'interaction entre la masse en mouvement et l'eau constitue un

processus physique extrêmement complexe qui n'est pas déterminant pour l'approche proposée ici pour l'évaluation du danger lié aux tsunamis lacustres. L'accent est mis sur la génération de l'onde qui en résulte, puis sur la modélisation de sa propagation et de son run-up sur les rives.

La hauteur du tsunami au lieu de sa génération est calculée à l'aide d'équations empiriques tirées d'Evers et al. (2019b), qui sont utilisées comme condition de départ pour la modélisation hydrodynamique. L'approche empirique issue d'expériences 3D est retenue, car un lac ressemble plutôt à un bassin à houle qu'à un canal à houle. Ce choix a une influence importante sur la propagation des ondes, car en raison de la possibilité de propagation latérale, les vagues sont nettement plus atténuées dans un environnement 3D que dans un environnement 2D, de sorte que la hauteur des vagues peut être jusqu'à un ordre de grandeur plus faible en 3D que 2D (p. ex. Heller and Ruffini, 2023). En outre, l'approche retenue ici consiste à modéliser deux vagues. La première est plus petite mais sa taille est associée à une incertitude moindre que celle de la seconde (Evers et al., 2019b).

2.3 Génération de tsunamis par SAQM

Dans ce manuel, deux mécanismes de déclenchement sont pris en compte pour les tsunamis qui sont générés par des SAQM : 1) les mouvements de masse sur des pentes sous-lacustres latérales non deltaïques présentant généralement une inclinaison d'environ 10 à 25°, et 2) les mouvements de masse subaquatiques dans les zones deltaïques. L'approche de modélisation retenue est fondamentalement la même pour les deux types; la démarche générale ne diffère que par les hypothèses relatives à l'épaisseur des sédiments en mouvement et par la méthode de cartographie des zones concernées.

La procédure comprend deux étapes. Tout d'abord, les zones associées à des mouvements de masse potentiels sont cartographiées ou sélectionnées sur la base d'une expertise, p. ex. sur la base de mouvements de masse antérieurs ou de calculs de stabilité des pentes, puis préparées en vue de la simulation des ondes. La propagation des ondes dans le lac et le run-up des vagues sur les rives sont ensuite simulées. A cette fin, un SAQM est approximé par un déplacement instantané du fond du lac. Le déplacement est défini par l'épaisseur et l'étendue de la zone érodée. Ce déplacement vertical due au déplacement instantané déclenche l'onde (fig. 2.3).

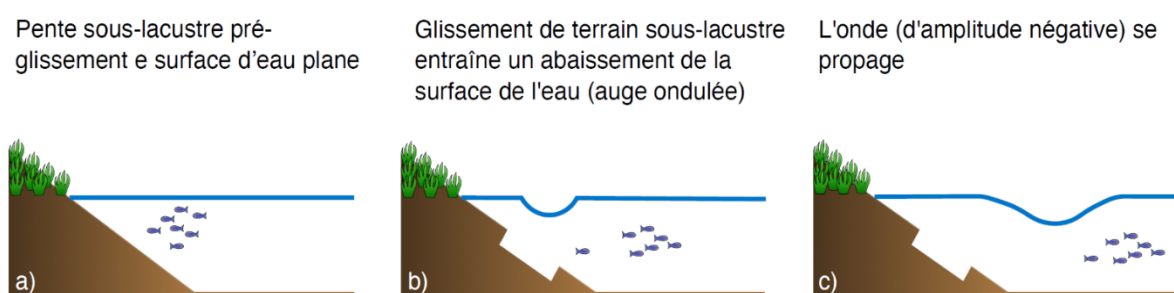


Figure 2.3 : La figure illustre le concept de génération d'un tsunami par un SAQM. a) montre l'état avant le mouvement de masse subaquatique ; b) illustre comment le glissement des sédiments entraîne un abaissement de la surface de l'eau et génère un creux d'onde ; c) montre la propagation de l'onde qui en résulte.

2.4 Contexte de l'approche probabiliste

Cette section présente brièvement les bases théoriques d'une approche probabiliste pouvant être utilisée lorsque certains paramètres sont entachés d'incertitudes. La méthode présentée ici constitue l'une des nombreuses possibilités permettant de prendre en compte les incertitudes dans la modélisation.

De manière générale, une approche probabiliste permet de déterminer les probabilités associées à des combinaisons données au sein d'un espace de paramètres, tout en tenant compte des incertitudes propres à chacun des paramètres. Cette approche est particulièrement utile lorsque les paramètres ne sont pas connus avec précision, mais sont associés ont une plage d'incertitude ou d'erreur.

La méthode proposée ici pour prendre en compte ces incertitude repose sur la simulation Monte-Carlo, qui consiste à sélectionner de manière répétée et aléatoire des valeurs dans une plage d'incertitude définie. Ces valeurs sont ensuite utilisées pour réaliser un grand nombre de simulations. La démarche devient toutefois plus complexe lorsque de nombreux paramètres présentent une plage d'incertitude. Dans ce cas, une méthode particulière d'échantillonnage utilisée dans le cadre des simulations de Monte-Carlo se prête particulièrement bien à l'analyse: l'échantillonnage par hypercube latin (Latin-Hypercube Sampling (chap. 2.4.1)). Cette approche est présentée plus en détail ci-après.

2.4.1 Latin-Hypercube Sampling

Une méthode d'échantillonnage utilisée dans le cadre des simulations de Monte-Carlo est l'échantillonnage par hypercube latin (Latin-Hypercube Sampling (Minasny et McBratney, 2006)), qui, en raison de son efficacité, se prête particulièrement bien à la démarche décrite ici. Le nombre de paramètres pris en compte est noté k . A chacun de ces k paramètres présentant une plage d'incertitude est associé un écart-type (p. ex. Sur la base de l'incertitude de mesure ou de l'estimation d'une expertise). Pour chaque paramètre, la plage d'incertitude est ensuite divisée en n intervalles de même probabilité. Une valeur aléatoire est tirée dans chacun de ces intervalles. Nous obtenons ainsi un nombre de modèles égal à $n \times k$.

2.4.2 Distribution log-normale

La distribution log-normale est la distribution privilégiée ici pour l'étude des incertitudes en combinaison avec l'échantillonnage par hypercube latin. Il s'agit d'une distribution de probabilité continue applicable à une variable qui ne peut prendre que des valeurs positives. Une variable aléatoire X suit une loi log-normale lorsque la variable aléatoire transformée $Y = \ln(X)$ suit une loi normale. Autrement dit, si Y peut être représentée sous la forme d'une courbe en cloche de Gauss (distribution normale standard) dans le cas décrit ci-dessus, alors X suit une distribution log-normale. Dans les sciences naturelles, les sciences de l'ingénieur et la médecine, la distribution log-normale joue un rôle important, car elle permet de représenter de nombreux processus de manière plus appropriée qu'une distribution normale standard.

L'analyse statistique de grandeurs suivant une loi log-normale s'effectue de préférence en logarithmes les valeurs, puis en appliquant aux valeurs ainsi transformées les méthodes usuelles de la distribution normale. Lorsque cela est pertinent, les résultats, tels que les intervalles de prédiction, peuvent ensuite être retransformés sur l'échelle d'origine.

2.4.3 Percentile

Dans le cas d'une simulation déterministe, chaque cellule de calcul ne fournit qu'une seule valeur pour chaque grandeur simulée, par exemple "la profondeur d'écoulement est de 1 m dans cette cellule de calcul". En revanche, les résultats des simulations de Monte-Carlo comprennent un grand nombre de valeurs pour chaque grandeur et chaque cellule de calcul. L'utilisation de percentiles constitue une manière de représenter cet ensemble de valeurs. Les percentiles sont une forme particulière de quantiles,

qui constituent des indicateurs de position en statistique. Pour déterminer des quantiles, les valeurs d'un jeu de données sont classées par ordre croissant, puis réparties en un nombre donné de parts égales. Dans le cas des percentiles, le jeu de données est divisé en 100 parts égales

Le 5^e percentile signifie, par exemple, que 5 % de toutes les valeurs sont inférieures ou égales à la valeur correspondant à ce percentile. Inversement, 95% des valeurs de la distribution sont supérieures à ce seuil. Dans le cas concret de scénarios d'inondation par tsunami comprenant $n=100$ simulations, cela correspond ici, à la 5^e valeur la plus basse. Un autre percentile fréquemment utilisé est la médiane, ou 50^e percentile: 50% des valeurs, classées par ordre croissant, sont inférieures ou égales à la médiane.

3 Analyse de la situation

3.1 Données de base communes aux TERM et aux SAQM

Pour toutes les simulations de tsunamis, des données **altimétriques** combinant des données topographiques et bathymétriques sont nécessaires. Elles peuvent être fournies sous la forme d'un modèle altimétrique numérique (digital élévation model, DEM), d'un modèle numérique de surface (MNS) ou modèle numérique de terrain (MNT) dans un format compatible avec un SIG. En Suisse, les données topographiques et bathymétriques de base peuvent être obtenues auprès de [swisstopo](https://www.swisstopo.ch). Il est important que toutes les données utilisent le même système de coordonnées. le même système de coordonnées.

3.2 Données spécifiques aux TERM

Les données initiales spécifiques nécessaires à l'élaboration de la carte de disposition et à la simulation ultérieure des tsunamis déclenchés par des TERM comprennent essentiellement la localisation (disposition) et les **paramètres caractéristiques de la masse en mouvement** qui chute dans le lac. Ces paramètres comprennent notamment la masse volumique, l'étendue, le nombre de Froude, l'épaisseur, la largeur et l'angle d'impact, et doivent être déterminés sur la base d'une expertise. Le niveau de détail souhaité pour l'étude détermine si une simple estimation de ces paramètres (p. ex. à l'aide de la littérature existante) est suffisante ou si des reconnaissances et des mesures sur le terrain sont nécessaires. Il est important de noter que toutes les valeurs mesurées ou estimées sont entachées d'incertitudes. Par conséquent, les conditions initiales calculées pour l'entrée de l'onde dans le modèle présentent elles aussi des incertitudes. Afin d'évaluer la sensibilité, il est donc recommandé de définir des zones d'incertitude et d'effectuer, sur cette base, plusieurs calculs avec différentes conditions initiales.

En outre, le **niveau moyen du lac** (wse) et la **profondeur d'eau de référence absolue du lac** (h_{ref}) sont nécessaires pour la simulation. Le paramètre du produit de l'impulsion P ainsi que les paramètres qui en dépendent sont également nécessaires pour calculer la condition initiale du tsunami. La méthode de calcul des différents paramètres requis est présentée en détail ci-après. Ces calculs doivent être effectués pour chaque tsunami déclenché par TERM.

3.2.1 Disposition aux TERM

La cartographie des TERM devrait être réalisée sur la base d'une expertise. Les cartes de dangers existantes peuvent servir de support. Les TERM cartographiés devraient ensuite être regroupés avec les SAQM cartographiés dans un projet SIG afin d'élaborer une carte de disposition. Dans un premier temps, il suffit de déterminer l'étendue, la localisation et quelques caractéristiques des TERM sur les versants terrestres. Pour chaque TERM cartographié, les calculs décrits dans les sections suivantes (3.2.2 et 3.2.3) doivent être réalisés.

3.2.2 Calcul du paramètre du produit d'impulsion

La hauteur du tsunami à son lieu de génération est calculée à l'aide des équations empiriques tirées d'Evers et al. (2019b). Elle est utilisée comme condition initiale pour la modélisation hydrodynamique.

Plusieurs étapes de calcul sont nécessaires. Tout d'abord, le paramètre du produit d'impulsion P est calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$P = F \sqrt{S_r} \sqrt[4]{M_r} \sqrt{\cos\left(\frac{6}{7}\alpha\right)}, \quad (3.1)$$

F est le nombre de Froude de la masse en mouvement qui pénètre dans l'eau, S_r son épaisseur relative, M_r sa masse relative (Evers et al., 2019a) et α l'angle d'impact, c'est à dire l'angle avec lequel la masse en mouvement atteint la surface de l'eau. Le nombre de Froude se calcule à l'aide de l'équation $F = v/(gh_{ref})^{0.5}$ où g désigne l'accélération de la pesanteur ($9,81 \text{ m/s}^2$), v la vitesse d'immersion de la masse, et h_{ref} la profondeur d'eau de référence.

La masse relative est calculé selon $M_r = (\rho_s V_b)/(\rho_w b h_{ref}^2)$, où V_b désigne le volume apparent ("bulk volume"), ρ_s la masse volumique de la masse en mouvement, et ρ_w la masse volumique de l'eau. L'épaisseur relative S_r est obtenue en divisant l'épaisseur absolue par la profondeur de l'eau de référence h_{ref} .

La profondeur d'eau de référence est une grandeur très importante pour la génération de l'onde d'impulsion et exerce une influence considérable sur l'amplitude de la vague du tsunami résultante. La profondeur d'eau de référence doit être suffisamment grande, c'est-à-dire au moins 10 fois supérieurs aux amplitudes maximales des vagues $a_{1,2}$. Dans le cas contraire, les conditions de validité des équations en eau peu profonde ne sont pas remplies et les processus physiques intervenant dans la propagation des vagues ne sont pas correctement représentés. Des itérations sont éventuellement nécessaires pour déterminer h_{ref} , car les amplitudes maximales des vagues ne sont pas encore connues au début des calculs décrits ici. Pour déterminer une profondeur de vague de référence correcte, il faut tenir compte des deux amplitudes de vague. Autrement dit, la condition mentionnée ci-dessus ($\epsilon = a_{1,2}/h_{ref} \leq 0.1$) doit être satisfaite pour les amplitudes maximales de la première et de la deuxième vague. En outre, il convient de veiller à ce que la profondeur de l'eau soit relativement constante à proximité immédiate du point correspondant à la profondeur d'eau de référence, ce point ne devrait donc pas se situer sur une pente sous-lacustre. Une carte bathymétrique devrait être consultée à cet effet lors des calculs.

3.2.3 Calculs pour l'entrée de l'onde dans le modèle

Le paramètre P est ensuite utilisé pour estimer l'amplitude maximale de la vague immédiatement en aval de la zone d'immersion de la masse en mouvement. Avec les équations 3.2 et 3.3

$$a_1 = 0.2 P^{\frac{1}{2}} B_r^{\frac{3}{4}} \left(\cos\left(\frac{6}{7}\alpha\right) \right)^{\frac{1}{4}} h_{ref} \quad (3.2)$$

$$a_2 = 0.14 \left(P B_r \cos\left(\frac{6}{7}\alpha\right) \right)^{\frac{1}{4}} h_{ref} \quad (3.3)$$

les amplitudes maximales de la première (a_1) et de la deuxième vague (a_2) peuvent être décrites empiriquement (Evers et al., 2019b). Dans ces équations, Br décrit la largeur relative de la masse en mouvement ($Br = b/h_{ref}$). Les amplitudes des vagues sont très sensibles à la largeur b ; il est donc important d'estimer celle-ci avec un soin particulier lors des travaux préparatoires. Pour la suite des calculs, nous supposons que l'amplitude des vagues est identique dans toutes les directions de

$$c_1 = 0.95(1 + a_1)^{0.5} (gh_{ref})^{0.5} \quad (3.4)$$

$$c_2 = 0.7(1 + a_2)^{0.5} (gh_{ref})^{0.5} \quad (3.5)$$

propagation. L'amplitude de la première, ou de la deuxième vague peut ensuite être utilisée pour déterminer leur vitesse respective ($c_{1,2}$) :

A l'aide des amplitudes maximales et des vitesses de propagation déterminées précédemment, la hauteur de l'onde est ensuite calculée en fonction du temps, c'est-à-dire sa forme d'onde. Pour cela, l'équation de Korteweg-de-Vries (KdV) (équation 3.7) est utilisée, pour laquelle il existe une solution sous la forme d'une onde solitaire (Lo et al., 2013). L'utilisation de l'équation KdV implique ici que les ondes de tsunami sont décrites sous la forme de solitons. La solution pour un soliton avec l'équation KdV (Goring, 1978) est la suivante

$$\eta(t) = a_{1,2} \cdot \text{sech}^2(\kappa(x_{compl} - t \cdot c_{1,2})) \quad (3.6)$$

$$q(t) = h_{ref} \cdot \eta(t) \cdot \sqrt{g/h_{ref}} \quad (3.7)$$

où x_{compl} est la distance nécessaire pour décrire une onde complète. Pour qu'une onde complète soit indexée, il faut en outre que la période de temps t soit suffisamment longue pour que la hauteur de l'onde puisse passer de 0 m à l'amplitude maximale, puis redescendre jusqu'à 0 m.

Enfin, le paramètre κ , est déterminé à l'aide de l'équation suivante (Goring, 1978) :

$$\kappa = \sqrt{\frac{3}{4} \frac{a_{1,2}}{h_{ref}^3}}. \quad (3.8)$$

Dans une dernière étape, la hauteur de l'onde est additionnée à la cote absolue du niveau du lac (m au-dessus du niveau de la mer ou NN, selon le système de coordonnées). Les deux séries temporelles résultantes ($q(t)$ et $\eta(t)$) sont utilisées comme données d'entrée pour la simulation.

A retenir !

1. Pour la génération de tsunamis sur la base de TERM, il faut

- F Nombre de Froude de la roche
- S_r épaisseur relative
- M_r masse relative
- B_r largeur relative, à estimer avec précision
- α angle d'impact

On calcule ainsi le **paramètre du produit d'impulsion** P , puis les **amplitudes maximales** a_1 et a_2 ainsi que les vitesses de propagation de la première et de la deuxième onde. Ces paramètres sont utilisés pour calculer la hauteur de vague $\eta(t)$ et le débit $q(t)$.

2. La **profondeur d'eau de référence** h_{ref} doit être choisie suffisamment grande, soit au moins dix fois supérieure à l'amplitude maximale de la vague. La condition aux limites doit donc être placée suffisamment loin dans le lac, à un endroit où la profondeur d'eau varie peu et qui ne se situe pas sur une pente.
3. Il s'agit d'un processus itératif visant à déterminer une **distance** x_{compl} et une période t qui, ensemble, décrivent une onde solitaire complète.
4. En raison des données sur lesquelles reposent les calculs, les valeurs obtenues présentent des incertitudes plus ou moins importantes. Il est donc recommandé de définir et d'utiliser des **plages d'incertitudes** et de réaliser une **analyse de sensibilité**.

3.3 Données spécifiques aux SAQM

Pour simuler des tsunamis générés par des SAQM, il est nécessaire de connaître, outre le modèle de terrain, **l'épaisseur, la localisation et l'étendue du mouvement de masse attendu**. L'estimation de ces paramètres représente toutefois un défi majeur en raison de leur localisation sous l'eau (p. ex. Harbitz et al., 2014). Comme il n'est pas toujours possible de faire des mesures géophysiques et/ou sédimentologiques, il existe plusieurs approches alternatives permettant de définir l'ampleur et la répartition des SAQM. Comme pour toute estimation et mesure, quelle que soit la technique utilisée, des incertitudes subsistent et devraient idéalement être prises en compte, par exemple, en effectuant des calculs avec différentes valeurs comprises dans des plages d'incertitude.

Dans le cadre du projet Tsunami-CH, une [base de données SAQM](#) (Vendetuolli et al., 2026). a été créée afin de recenser les données géophysiques, géotechniques et sédimentologiques disponibles pour les lacs suisses et susceptibles d'être utilisées pour l'évaluation des SAQM. La base de données SAQM comprend les lacs suisses dont la prédisposition aux tsunamis a été étudiée dans Strupler et al. (2020a,c). Pour chaque lac, les types de données disponibles, leur localisation ainsi que les sources correspondantes sont répertoriées. La localisation des points et des profils de mesure est regroupée dans un [projet QGIS](#) accompagné d'une documentation publiée dans Vendetuolli et al. (2026).

Les données recensées comprennent notamment : (1) des profils de sismique réflexion à haute résolution, avec une résolution verticale d'environ 10 à 20 cm, principalement acquis à l'aide de systèmes pinger et sparker ; (2) des carottes sédimentaires longues, d'une longueur d'au moins environ 3 m ; (3) des essais de pénétration au cône (Cone Penetration Test, CPT) ; et (4) des données bathymétriques à haute résolution. La base de données SAQM ne contient pas les données brutes, mais renvoie aux sources correspondantes. Les données bathymétriques à haute résolution peuvent être obtenues directement auprès de swisstopo via SwissBATHY3D.

La figure [3.1](#) donne un aperçu des lacs répertoriés dans la [base de données SAQM](#). Le tableau A1, présenté en annexe, résume les données disponibles pour chaque lac, ainsi que les auteurs correspondants. Les lacs pour lesquels aucune donnée n'a été acquise à ce jour ne sont pas représentés.

Dans tous les cas, il est recommandé de commencer par une cartographie géomorphologique du fond du lac, c'est-à-dire par l'établissement d'une carte géomorphologique de l'ensemble du domaine lacustre. Les traces de mouvements de masse antérieurs, telles que les niches d'arrachement, les surfaces de glissement, les chenaux d'érosion et les anciens dépôts peuvent y être reportées et documentées. Les deltas doivent également être cartographiés. Cette carte sert de base à des analyses plus approfondies au moyen d'autres méthodes. Les sections suivantes présentent en outre d'autres méthodes permettant de cartographier les SAQM sans effectuer de mesures supplémentaires.

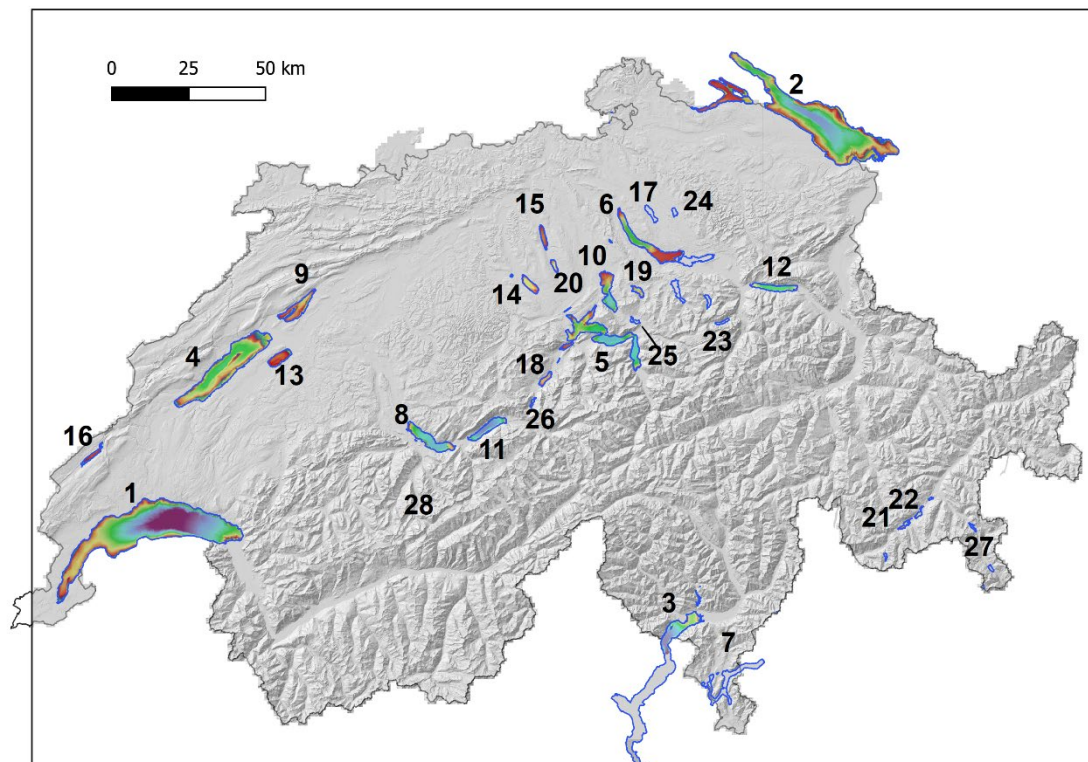


Figure 3.1 : Carte générale des jeux de données sur les lacs contenus dans la base de données SAQM. Les numéros renvoient au tableau A1. La sélection des lacs se base sur Strupler et al. (2020a,c).

3.3.1 Disposition aux SAQM non deltaïques

Les SAQM non deltaïques peuvent avoir différentes causes naturelles et anthropiques (p. ex. séisme, surcharge sédimentaire, variations du niveau d'eau, exfiltrations d'eau hors des sédiments ou activités de construction sur les rives). Dans la plupart des cas, une couche de faiblesse est présente dans la séquence sédimentaire, le long de laquelle les sédiments sus-jacents glissent vers le bas de la pente. La détermination de cette couche de faiblesse et de l'épaisseur des sédiments sus-jacents susceptibles de glisser peut-être réalisée au moyen de méthodes de complexité variable. Le niveau de détail souhaité pour l'étude, ainsi le temps et les coûts qui y sont associés déterminent si une estimation grossière rapide avec des hypothèses simplifiées de mécanique des sédiments est suffisante (p. ex. Strupler et al., 2020a) ou si des analyses plus approfondies de la stabilité des pentes (p. ex. au moyen de méthodes de modélisation numérique et des mesures locales des paramètres de mécanique des sédiments) sont nécessaires pour identifier les SAQM non deltaïques potentiels.

Estimation grossière simple

Les mesures géophysiques et sédimentologiques réalisées ces dernières années dans les lacs péri-alpins (Strasser et al., 2011 ; Strupler et al., 2017, 2018 ; Shynkarenko et al., 2022a,b) ont montré que les SAQM non deltaïques se sont principalement produits sur des pentes d'une inclinaison d'environ 10° à 25°. La surface de glissement de nombreux mouvements de masse documentés se situe dans une couche de faiblesse constituée d'argiles tardiglaciaires. Selon l'inclinaison de la pente et la profondeur d'eau,

cette couche de faiblesse potentielle peut être surmontée d'une couverture sédimentaire holocène d'environ 3 à 10 m d'épaisseur. Ces informations peuvent être utilisées pour réaliser une simple estimation grossière.

On suppose en principe que toutes les pentes encore recouvertes de sédiments et présentant une inclinaison de 10° à 25° (10° à 35° pour les lacs de Zurich et Léman) constituent des zones où des mouvements de masse sont susceptibles de se produire, comme cela a été observé lors d'événements passés. En tenant compte des informations bathymétriques (p. ex. en excluant, sur la base d'une expertise, les zones ayant déjà glissé) et en supposant des épaisseurs fondées sur les mesures antérieures, il est possible d'estimer grossièrement les SAQM attendus.

Estimation rapide à l'aide des conditions d'équilibre limite

Une méthode plus élaborée, fréquemment utilisée, consiste à estimer la stabilité des pentes à l'aide de conditions d'équilibre limite en supposant une pente infinie, c'est-à-dire au moyen d'une équation d'équilibre limite pour une pente infinie (en anglais : « Limit equilibrium equation on an infinite slope »). La stabilité de pente est exprimée par un facteur de sécurité (FS, équation 3.9). Un facteur de sécurité $FS < 1$ signifie que les forces dirigées vers le bas de la pente sont supérieures aux forces résistantes et que la pente est instable. Inversement, $FS > 1$ signifie que la pente est stable. La stabilité des pentes dépend de leur inclinaison, de l'épaisseur des sédiments, de leurs caractéristiques mécaniques ainsi que du mécanisme de déclenchement. Si le mouvement de masse est déclenché par une surcharge sédimentaire, une **estimation statique de la stabilité de la pente peut être réalisée**. Dans le cas de déclencheurs externes (p. ex. un séisme), une **analyse pseudo-statique de la stabilité de la pente est effectuée**, c'est-à-dire que le tremblement de terre est représenté par une force statique agissant horizontalement (Morgenstern and Price, 1967).

Dans sa forme la plus simple, le facteur de sécurité (pseudo)-statique se calcule comme suit pour les sédiments fins saturés en eau

$$FS = s_u \left[\left(\int_0^z \gamma' dz \right) \sin(\alpha) \cos(\alpha) + f k PGA \left(\int_0^z \gamma' + \gamma_w dz \right) \cos^2(\alpha) \right]^{-1}, \quad (3.9)$$

s_u est la résistance au cisaillement non drainée [Pa], γ' le poids volumique déjaugé des sédiments potentiellement mobiles [Nm^{-3}], γ_w le poids volumique de l'eau [Nm^{-3}], α l'inclinaison de la pente, g est l'accélération de la pesanteur ($9,81 \text{ m/s}^2$) et PGA l'accélération maximale du sol (peak ground acceleration). Dans cette équation, PGA est utilisée en fonction de g (l'unité est [g]). Il peut également arriver que l'accélération du sol PGA soit indiquée en [m/s^2] (comme dans le tableau 3.2). Dans ce cas, il faut en plus diviser PGA par l'accélération de la pesanteur g dans l'équation ci-dessus. k est le coefficient pseudo statique, qui varie souvent entre 0,05 et 0,5 (p. ex. Melo and Sharma, 2004). Pour les analyses statiques, $k=0$. Le facteur d'amplification f peut varier au sein d'un même lac ainsi que d'un lac à l'autre; il doit être choisi par des expert(e)s et, le cas échéant, testé afin d'évaluer l'ampleur de son influence sur FS . Il est recommandé de choisir un produit de fk dans une plage comprise entre 0,5 et 1. Ce choix est cohérent avec Strupler et al. (2017) et Shynkarenko et al. (2023), ainsi qu'avec les hypothèses retenues pour d'autres paramètres physiques des sédiments lacustres dans l'équation d'équilibre limite (masse volumique et résistance au cisaillement non drainée).

La mesure de la résistance au cisaillement non drainée est complexe et coûteuse. A ce jour, des valeurs mesurées ne sont disponibles que pour les pentes latérales des lacs de Zurich et des Quatre-Cantons (voir [base de données SAQM](#)). Si l'on suppose que la stratigraphie et les propriétés géotechniques des lacs péri-alpins étudiés jusqu'à présent sont très similaires, ces valeurs peuvent également être utilisées, avec les réserves nécessaires, pour d'autres lacs péri-alpins suisses.

En suivant Strupler et al. (2020a), et en supposant que tous les lacs péri-alpins suisses présentent les mêmes caractéristiques géotechniques, les valeurs suivantes peuvent être utilisées pour une estimation rapide: Une **“bulk density” (masse volumique apparente) d'environ 130 kg/m³ au fond du lac, augmentant jusqu'à environ 1600 kg/m³ à la base des sédiments potentiellement mobiles**, ainsi qu'une **résistance au cisaillement non drainée d'environ 8 kPa** au niveau de la surface de glissement potentielle. La bulk density et la résistance au cisaillement non drainées sont des facteurs dans l'équation qui sont les mêmes pour les pentes étudiées en raison des hypothèses simplifiées.

$$M_{sed}(S) = \Delta t 0.01a(x, y) + bd_w(x, y) - ca(x, y) \quad (3.10)$$

Par conséquent, l'estimation de la stabilité des pentes à l'aide de l'équation 3.9, nécessite, comme paramètres d'entrée, l'inclinaison de la pente, l'épaisseur des sédiments potentiellement mobiles ainsi que l'accélération du sol attendue. L'inclinaison des pentes peut être calculées directement dans un SIG à partir d'un modèle de terrain et est ainsi disponible pour chaque point du domaine de modélisation. L'accélération du sol peut être obtenue à partir du modèle d'aléa sismique "SuiHaz15" Wiemer et al. (2016). Les données ponctuelles doivent être interpolées afin de couvrir l'ensemble du domaine de modélisation. L'épaisseur des sédiments potentiellement mobiles au-dessus de la couche de faiblesse peut être estimée en fonction de la profondeur d'eau d_w et de l'inclinaison de la pente α à l'aide d'un modèle linéaire de sédimentation calibré sur le lac de Zurich (Strupler et al., 2018). L'épaisseur des sédiments M_{sed} peut être calculée, pour chaque type de sédiment S, à l'aide de l'équation 3.10 selon Strupler et al. (2020a), où a , b , c sont des coefficients déterminés empiriquement et Δt est le temps d'accumulation des sédiments en années.

En partant du principe que la séquence de sédimentation est plus ou moins similaire dans les lacs suisses, nous pouvons utiliser approximativement les valeurs suivantes (tab. 3.1) dans l'équation 3.10.

Type de sédiment S	Temps d'accumulation Δt [ans]	Coefficient a	Coefficient b	Coefficient c
Couche sédimentaire holocène inférieure/plus ancienne	5000	0.047	0.000175	0.001305
Couche sédimentaire holocène supérieure/plus jeune	7000	0.021	0.000104	0.000654

Tableau 3.1 : Valeurs pour le modèle de sédimentation linéaire (Strupler et al., 2020a).

Les calculs peuvent être effectués dans un programme externe (p.ex. Python, R) ou directement dans un SIG. Il est recommandé d'adapter, si possible, le modèle de sédimentation au lac étudié, en particulier lorsque des apports importants de sédiments détritiques sont attendus. Idéalement, les informations issues des carottes sédimentaires sont corrélées avec les données sismiques afin d'en déduire les taux de sédimentation sur les pentes. Il appartient aux expert(e)s chargé(e)s de l'analyse d'adapter, si nécessaire, les valeurs et les combinaisons de paramètres présentées ici à titre d'exemple et/ou d'utiliser d'autres méthodes pour la cartographie des SAQM.

Accélération du sol [m/s ²]	Pente du terrain [°]	Épaisseur [m]
0.0-0.1	5-10	8
	10-15	6
	15-25	5
0.1-0.2	5-10	7
	10-20	5
	20-25	4
0.2-0.3	5-10	6
	10-15	5
	15-25	4
0.3-0.4	5-10	5
	10-25	4
0.4-0.5	5-15	4
	15-25	3
0.5-0.6	5-10	4
	10-25	3
0.6-0.9	10-25	3
0.9-1.0	5-20	3
	20-25	2
1.0-1.1	5-10	3
	10-25	2
1.1-2.0	5-25	1

Tableau 3.2 : Valeurs pour certaines combinaisons de PGA, d'inclinaison de la pente et d'épaisseur des sédiments potentiellement mobiles qui, en supposant les propriétés mécaniques des sédiments de Strupler et al. (2020a), conduisent à une pente potentiellement instable pour laquelle $FS < 1$.

Le tableau 3.2 propose différentes combinaisons d'accélération du sol PGA (doit être divisé par g pour être représentée en fonction de g , resp. en unité g), d'inclinaison de la pente et d'épaisseur de sédiments (Strupler et al., 2020a), qui conduisent en principe à un facteur de sécurité $FS < 1$, en tenant compte des densités en vrac et des résistances au cisaillement mentionnées ci-dessus. Les pentes sont considérées comme potentiellement instables si ces combinaisons de paramètres sont présentes.

Toutes les zones de pente potentiellement instables (exprimées p. ex. comme $FS < 1$) devraient être reportées dans un projet SIG. Si une autre méthode de cartographie a été utilisée, les SAQM potentiels devraient y être représentés. Le résultat constitue la carte de disposition des SAQM non deltaïques. Il

A retenir !

Il existe différentes approches pour cartographier les zones de SAQM non deltaïques potentiels. Une approche consiste à estimer la stabilité des pentes à l'aide des équations d'équilibre limite en supposant une pente infinie (en anglais : « Limit equilibrium equation on an infinite slope »). Pour cela, les paramètres suivants sont nécessaires:

- densité en vrac des sédiments au fond du lac
- résistance au cisaillement non drainée
- inclinaison de la pente
- épaisseur de la couche sédimentaire potentiellement mobile
- accélération du sol, p. ex. accélération maximale du sol (PGA)

Quelle que soit la méthode de cartographie utilisée, les incertitudes liées aux paramètres des SAQM devraient être prises en compte.

est toutefois important de garder à l'esprit que l'estimation rapide suppose que toutes les pentes du lac étudié n'ont pas encore subi de glissement. Les zones ayant déjà glissé doivent donc être identifiées sur la carte bathymétrique et/ou géomorphologique et, le cas échéant, exclues sur la base d'une expertise. Une analyse de sensibilité du calcul de stabilité peut également être réalisée afin d'obtenir des résultats plus précis. La carte de disposition doit être adaptée en conséquence.

3.3.2 Disposition aux SAQM deltaïques

On suppose que les processus associés à un SAQM deltaïque sont similaires à ceux d'un SAQM non deltaïque et qu'ils sont donc modélisés de la même manière (voir section 2.3). Cela signifie que, pour la simulation de tsunamis causés par des SAQM deltaïques, **l'épaisseur, la localisation et l'étendue du mouvement de masse potentiel** sont également nécessaires. Contrairement aux SAQM non deltaïques, pour lesquels la surface de glissement et, par conséquent, l'épaisseur du mouvement de masse potentiel peut être estimée, les SAQM deltaïques présentent des incertitudes beaucoup plus importantes concernant l'épaisseur.

La sensibilité des résultats à l'épaisseur devrait donc être mise en évidence lors de la simulation

La cartographie des SAQM deltaïques ne peut pas être réalisée à l'aide d'une estimation rapide, car il n'existe pas de modèles de sédimentation. Toutefois, une [base de données des types des deltas](#) pour l'identification des SAQM deltaïques potentiels. Pour son élaboration, les lacs suisses d'une superficie d'au moins 1 km² disposant d'une bathymétrie à haute résolution (SwissBATHY3D) ont été pris en compte. Parmi ceux-ci, les zones deltaïques associées à des cours d'eau identifiables dans le réseau hydrographique suisse (REN) et présentant, dans la bathymétrie à haute résolution, des structures morphologiques et caractéristiques de deltas actifs (p. ex. ondes sédimentaires, canyons) ont été inventoriées. Les régions deltaïques sont réparties en deux types: le type 2 qui présente généralement un faible potentiel de mouvements de masse, et le type 1, davantage associé à des mouvements de masse de plus grande ampleur. La base de données contient les régions deltaïques délimitées, leur classification en types 1 et 2 ainsi que les profils utilisés pour leur caractérisation morphologique. Elle contient également des Shapefiles dans lesquels les zones correspondant aux deux types de deltas sont déjà délimitées et peuvent être utilisées directement pour la cartographie, l'élaboration des cartes de disposition et l'élaboration des scénarios.

A retenir !

Pour générer des tsunamis sur la base de SAQM (deltaïques et non deltaïques), il faut connaître:

- la position
- l'épaisseur
- l'étendue des zones susceptibles d'être mobilisées

3.4 Carte de disposition

La carte de disposition regroupe l'ensemble des SAQM non deltaïques cartographiés, les SAQM deltaïques de type 1 issus de la [base de données des types des deltas](#) ainsi que les zones identifiées comme susceptibles de générer des TERM. Tous ces éléments doivent être regroupés dans un projet SIG, qui sert ensuite de base à l'élaboration des scénarios.

3.4.1 Événements passés

Une approche entièrement manuelle permet également de cartographier des événements passés et de les simuler par la suite. Ces événements peuvent être ajoutés manuellement à la carte de disposition. Cela peut être particulièrement utile pour la validation modèle.

4 Elaboration des scénarios

L'élaboration des scénarios comprend la sélection et, le cas échéant, le regroupement de pentes potentiellement instables ainsi que la combinaison de TERM et de SAQM, afin de définir les scénarios déterminants pour l'évaluation du danger ainsi que des scénarios avancés.

4.1 Scénarios de base

Dans un premier temps, les différents mécanismes de déclenchement sont traités séparément afin de comprendre la situation étudiée et de comparer leurs effets respectifs. La sélection des SAQM et des TERM repose sur la carte de disposition, qui résulte de la cartographie des SAQM deltaïques et non deltaïques ainsi que des TERM. Son aspect varie selon la méthode de cartographie utilisée (estimation grossière, estimation rapide ou autre méthode). Les scénarios suivants devraient être simulés :

- le plus grand SAQM deltaïque et le plus grand SAQM non deltaïque cartographiés
- si possible, des groupes de 2-4 SAQM non deltaïques situés à proximité les uns des autres
- si possible, de chaque côté du lac (N, S, E, O) un SAQM deltaïque et un SAQM non deltaïque
- tous les TERM existants, simulés individuellement; s'ils sont très nombreux, appliquer la même démarche que pour les SAQM ci-dessus.

Ces scénarios de base permettent au ou à la responsable du projet d'identifier les scénarios susceptibles d'être déterminants pour la situation étudiée et d'évaluer notamment la vitesse de propagation des ondes, leur temps de propagation et leur temps d'arrivée sur les rives ainsi que l'ampleur des inondations qu'elles peuvent provoquer.

4.2 Scénarios avancés

Sur la base des scénarios de base et des connaissances ainsi acquises, des scénarios avancés peuvent être définis en combinant plusieurs SAQM et/ou TERM déterminants. Contrairement aux scénarios de base, il n'est pas nécessaire de retenir systématiquement le plus grand SAQM, mais plutôt ceux qui sont les plus susceptibles de se produire simultanément ou qui ont le plus grand impact sur les inondations. Le choix dépend fortement du lac considéré et repose notamment sur la carte de disposition élaborée, dont l'aspect peut varier selon la méthode de cartographie utilisée, ainsi que sur les connaissances acquises lors de l'élaboration des scénarios de base. Si des événements historiques indiquent, par exemple, que certaines régions autour du lac sont particulièrement de connaître des TERM et/ou aux SAQM, il peut être pertinent de regrouper plusieurs SAQM et /ou TERM dans un même scénario.

Les scénarios avancés devraient également tenir compte de l'hypothèse d'un séisme fort, si cela n'a pas déjà été pris en compte dans les scénarios de base. Pour les SAQM non deltaïques, il est nécessaire d'utiliser une méthode de cartographie qui tienne compte de la période de retour du séisme. Selon la méthode présentée dans ce manuel, il s'agit d'une estimation rapide à l'aide des équations d'équilibre limite. Pour les SAQM deltaïques, il n'existe actuellement aucune méthode permettant de distinguer les mouvements de masse spontanés des mouvements de masse induits par un séisme. Pour simplifier l'élaboration des scénarios, on suppose donc qu'en cas de séisme, tous les SAQM deltaïques se produisent simultanément. Aucune distinction selon la période de retour du séisme n'est effectuée pour les SAQM deltaïques. Pour les TERM, l'expert ou l'experte devrait préciser dans quelle mesure un

séisme pourrait avoir une influence. En l'absence d'informations à ce sujet, on suppose que tous les TERM potentiels peuvent être déclenchés par un séisme et aucune distinction selon la période de retour du séisme n'est effectuée.

Les scénarios avancés suivants pourraient être considérés :

- tous les SAQM non deltaïques déterminants ensemble (respectivement pour des périodes de retour 475 et 2475 ans)
- tous les SAQM deltaïque déterminants ensemble
- tous les SAQM non deltaïques déterminants (respectivement pour des périodes de retour 475 et 2475 ans) combinés avec les TERM
- tous les SAQM deltaïques et non deltaïques déterminants ensemble (respectivement pour des périodes de retour 475 et 2475 ans)
- tous les mouvements de masse déterminants ensemble (respectivement pour des périodes de retour 475 et 2475 ans).

Les résultats devraient préciser quelle méthode de cartographie et quelle méthode d'élaboration des scénarios ont finalement été utilisées.

4.3 Autres facteurs dans l'élaboration des scénarios

Un autre facteur à prendre en compte lors de l'élaboration des scénarios est le niveau absolu du lac. Selon les circonstances, différents niveaux d'eau devraient être simulés afin de tenir compte des situations de crue ou d'étiage, car l'interaction entre les ouvrages de protection des rives ou l'inclinaison des rives, les vagues et le niveau du lac peut entraîner des ampleurs d'inondations différents. Il est également important de tenir compte d'autres conditions aux limites, telles que les ouvrages de régulation ainsi que les débits entrants et sortants des cours d'eau. Il convient de noter que l'écoulement d'un petit cours d'eau dans un delta de grande taille peut généralement être négligé tandis que celui d'un cours d'eau relativement important peut exercer une influence dans une petite zone deltaïque. Il peut être judicieux d'intégrer les cours d'eau dans le modèle soit comme conditions aux limites en imposant un débit entrant ou sortant moyen, soit en définissant la ligne de rive et la limite du domaine de modélisation de manière que l'embouchure ou la source du cours d'eau ne coïncide pas directement avec la limite du modèle.

5 Analyse des effets

Ce chapitre décrit les étapes de travail à effectuer avant la simulation. Il s'agit notamment de choisir de manière adéquate le périmètre du modèle et l'étendue de la zone riveraine, ainsi que de déterminer les éventuelles conditions aux limites. Comme décrit au chapitre 3.1, des **données topographiques et bathymétriques** couvrant l'ensemble du périmètre du modèle sont nécessaires. En outre, les zones cartographiées associées aux SAQM potentiels (chapitre 3.3), ainsi que la localisation et les caractéristiques des TERM (chapitre 3.2) doivent être prises en compte. En résumé, la préparation de la simulation comprend les étapes suivantes :

1. Définition de la zone d'étude et création du jeu de données raster comprenant les valeurs d'altitude topographiques et bathymétriques (modèle numérique de terrain), prise en compte des bâtiments selon le degré de détail de l'analyse, et définition des éventuelles conditions aux limites (débits entrants et sortants, ouvrages de régulation, etc.).
2. Définition des conditions aux limites internes pour les TERM
3. Définition des zones associées à des mouvements de masse potentiels (SAQM)
4. Création de grilles de calcul intégrant les informations définies ci-dessus et servant de base aux simulations.

5.1 Préparation de la simulation

5.1.1 Zone d'étude

La zone d'étude est définie par les limites du modèle et doit être déterminée de manière à couvrir au moins les zones susceptibles d'être inondées, c'est-à-dire l'ensemble des zones riveraines de faible pente. Une ligne de rive du lac peut être déduite du modèle de terrain ou d'un jeu de données existant comme [swissTLM3D](#). Aux transitions entre les différents modèles altimétriques et la bathymétrie, des zones de chevauchement ou des lacunes de données peuvent apparaître et doivent alors être interpolées manuellement. A l'interface entre la bathymétrie et le modèle altimétrique, il peut également être nécessaire de reconstituer manuellement la bathymétrie du cours d'eau, car les modèles altimétriques ne représentent que la surface et non le lit du cours d'eau. En outre, les limites du modèle doivent être définies (fig. 5.1). Pour la simulation, l'ensemble des conditions aux limites et des limites du modèle doit former un contour fermé, c'est-à-dire que la grille de calcul ne doit présenter aucune lacune ni aucun trou. Afin de représenter plus précisément la zone riveraine, il est recommandé d'y utiliser des éléments de maillage plus petits que dans le lac lui-même.

En général, il faut les informations suivantes pour créer la grille de calcul :

- Limites du modèle
- Ligne de rive
- Zone riveraine/zone urbanisée
- Conditions aux limites (débit entrant, débit sortant, éventuelle régulation du niveau du lac, etc.)
- Zones cartographiées associées aux SAQM
- Bâtiments (facultatif)

- Rugosité des différentes zones
- Emplacement de la condition aux limites interne associée aux TERM dans le lac

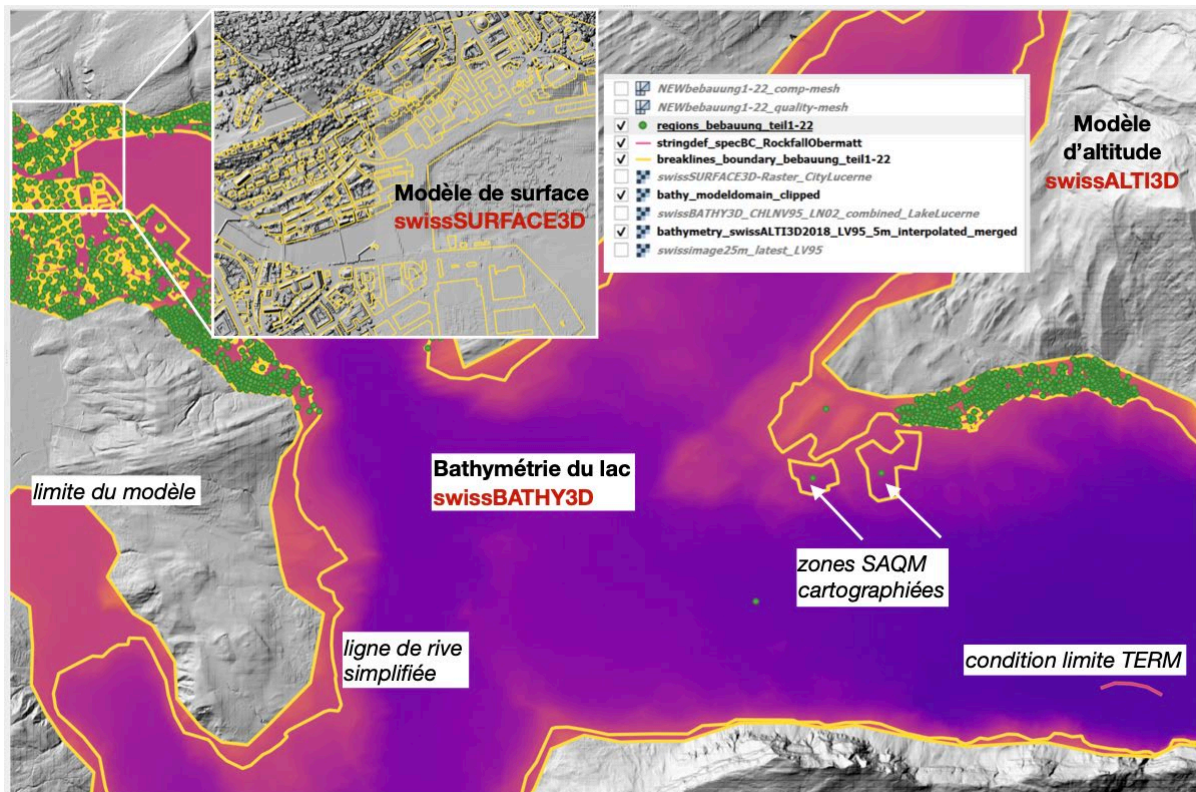


Figure 5.1 : Les différents éléments nécessaires à la création de la grille de calcul sont présentés ici. Les données de swisstopo relatives au modèle altimétrique (swissALTI3D), à la bathymétrie (swissBATHY3D) ainsi qu'éventuellement aux bâtiments (swissSURFACE3D, swissALTI3D) et à la ligne de rive (swissTLM3D), constituent la base. La ligne de rive du lac et le périmètre du modèle peuvent être déduits de ces données. Les zones associées aux SAQM sont soit déterminées à l'aide de la méthode décrite au chapitre 3.3.1, soit définies d'une autre manière (événements historiques, autre méthode de cartographie). La condition aux limites interne (condition aux limites associée aux TERM) utilisée pour la génération d'un tsunami causé par un TERM est située dans le lac, à une certaine distance de la rive (fig. 5.2).

Prise en compte des bâtiments

Afin de représenter aussi précisément que possible l'étendue des zones inondées, il convient de tenir compte des bâtiments. Deux approches permettent de prendre en compte leur influence. La variante la plus simple consiste à utiliser un modèle numérique de surface (p. ex. swissSURFACE3D) à la place du modèle altimétrique habituellement utilisé (swissALTI3D). Dans l'autre approche, les bâtiments peuvent être intégrés individuellement sous forme de polygones lors de la préparation de la simulation. swissTLM3D fournit des données (swissTLM3D_TLM_GEBAEUDE_FOOTPRINT.shp) qui peuvent être utilisées dans le SIG lors de la préparation de la simulation afin d'intégrer les bâtiments dans le modèle. Cette approche est décrite [ici](#) (adaptée à l'utilisation du logiciel de simulation hydrodynamique BASEMENT). En combinaison avec les données swissTLM3D, il faut alors utiliser le modèle altimétrique numérique et non le modèle de surface.

Ces deux approches présentent chacune des avantages et des inconvénients. Avec swissTLM3D, où les emprises des bâtiments sont exclues du domaine de calcul, la position et la forme des bâtiments peuvent être représentées avec une grande précision. Dans cette approche, les bâtiments sont toutefois considérés comme ayant une hauteur infinie. Avec swissSURFACE3D, les bâtiments sont traités

comme des éléments de topographie: leur hauteur correspond approximativement à la réalité, mais leur position et leur forme sont représentées avec une précision moindre.

Conditions aux limites

Parmi les conditions aux limites figurent les éventuels débits entrants et sortants ainsi que les ouvrages de régulation du lac. Lorsque leurs caractéristiques sont connues, ils peuvent être pris en compte dans la modélisation et définis en conséquence lors de la création de la grille de calcul.

5.1.2 Condition aux limites interne pour les TERM

Dans la réalité, la masse en mouvement chute le plus souvent dans l'eau directement au niveau de la rive. En raison de la complexité des processus en jeu et de l'approche de la modélisation choisie, ce processus ne peut toutefois pas être reproduit exactement de cette manière (cf. chap. 3.2.2, 3.2.3). Il est donc nécessaire de déplacer légèrement vers l'intérieur du lac la zone dans laquelle le mouvement de masse se produit effectivement (fig. 5.2). La valeur de référence est le rapport ϵ entre l'amplitude maximale calculée de la vague ($a_{1,2}$) et la profondeur d'eau de référence (h_{ref}), qui doit être inférieur ou égal à 0,1 à l'endroit où la condition aux limites du tsunami est définie. Il convient de vérifier que les amplitudes de deux vagues satisfont cette condition. Comme décrit au chapitre 3.2, la profondeur d'eau de référence appropriée n'est pas immédiatement évidente, car elle influence l'amplitude maximale de la vague, qui intervient elle-même dans le calcul de ϵ . Une démarche itérative est donc nécessaire. Il faut également veiller à ce que la condition aux limites du tsunami, et donc la profondeur d'eau de référence, ne soit, dans la mesure du possible, pas située sur une pente sous-lacustre, mais sur une zone plane. Il est utile à cet effet de consulter une carte bathymétrique pendant le calcul.

Pour les lacs suisses, qui présentent généralement des pentes sous-lacustres abruptes, il n'est en principe pas difficile de trouver une profondeur d'eau de référence suffisamment grande. Il convient néanmoins de vérifier que le rapport entre l'amplitude des vagues et la profondeur d'eau de référence choisie satisfait la condition de $\epsilon \leq 0,1$. Si ce n'est pas le cas, la simulation des vagues peut tout de même être effectuée. Lors de l'analyse des résultats, il convient alors de tenir compte du fait que les incertitudes peuvent être plus importantes. Un autre point concerne l'orientation et la forme de la condition aux limites interne à partir de laquelle l'onde générée par le TERM est produite. Sa taille et sa forme devraient correspondre approximativement à celles de l'onde attendue; il convient donc de tracer une *stringdef* courbe dans le maillage. La « direction » de la *stringdef* est générée automatiquement par BASEMESH lors de la création du maillage, comme pour toutes les *stringdef* dans BASEMENT, et doit être déterminée à partir de la grille de calcul ou au moyen d'une simulation test.

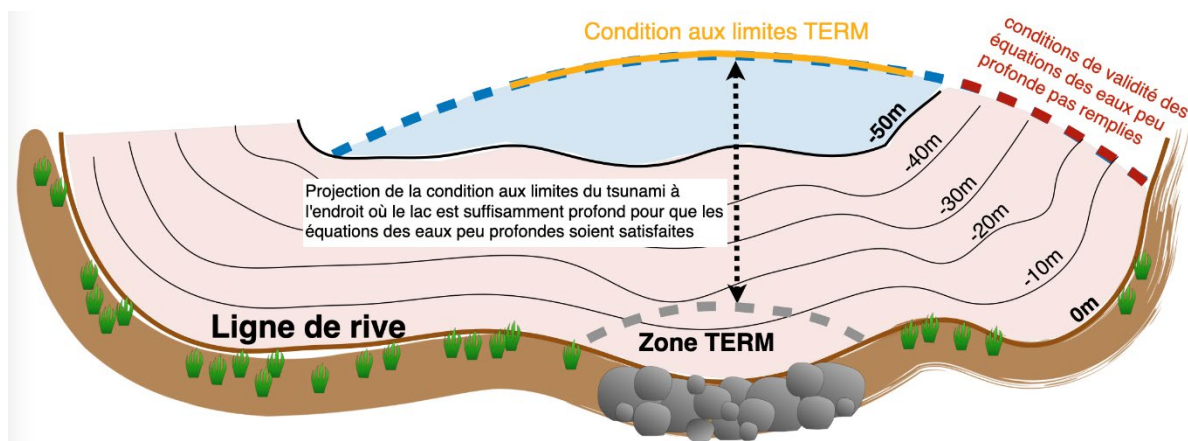


Figure 5.2 : Schéma décrivant comment la condition aux limites interne doit être définie pour la modélisation d'un tsunami causé par un TERM. La zone TERM, délimitée avec la ligne pointillée grise, correspond à la zone d'immersion du mouvement de masse. La ligne pointillée rouge représente la zone dans laquelle les conditions de validité des équations en eau peu profonde ne sont pas remplies; ϵ est donc trop grand. La ligne en pointillés bleue représente la zone dans laquelle ces conditions sont remplies. Au niveau de la ligne bleue, la condition aux limites interne associée au TERM peut être définie.

Deux séries temporelles décrivant la forme de l'onde du tsunami doivent être créées pour les TERM : une série temporelle représentant l'évolution de la hauteur de l'onde η et une série temporelle représentant le débit q . Ces deux séries temporelles doivent être établies pour la première et la deuxième vague. Pour cela, le paramètre du produit d'impulsion P est d'abord calculé, ainsi que les amplitudes maximales qui en résultent a_1 et a_2 . Ces valeurs sont ensuite introduites dans l'équation KdV afin d'obtenir l'évolution de la hauteur de l'onde η en fonction du temps t . Pour calculer le débit q , l'amplitude de la vague obtenue est multipliée par la profondeur d'eau de référence et par un autre facteur supplémentaire (voir chap. 3.2.2, 3.2.3). Cette procédure est appliquée à la première comme à la deuxième vague. Pour plus de détails sur les équations, voir le chapitre 3.2.

Un aspect important est l'intervalle de temps entre les deux vagues générées. En général, cet intervalle doit être aussi court que possible. Lors de la création des séries temporelles de l'amplitude des vagues et du débit, il faut veiller à ce que l'amplitude et le débit de la première vague soient revenues à zéro avant le début de la deuxième vague.

5.1.3 Domaines pour SAQM

Dans le cas des SAQM, les zones associées aux mouvements de masse potentiels sont cartographiées dans le SIG à l'aide de polygones (*polylines*) et enregistrées dans un Shapefile sous forme de *breaklines* (lignes de rupture), avec les *breaklines* de la zone riveraine, de la zone lacustre et des constructions bâtiments. À chaque zone sont attribués un *ID*, un *matID*, une *maxArea* et, le cas échéant, un *hole* (lorsqu'une partie de la zone, p. ex. un bâtiment, doit être exclue lors de la simulation). Certaines informations sont ensuite réutilisées comme référence lors de la configuration de la simulation, notamment le *matID*.

5.1.4 Génération de grilles de calcul

Pour générer les grilles de calcul, toutes les informations recueillies concernant les mouvements de masse, les conditions aux limites, les bâtiments ainsi que le périmètre général du modèle et du lac doivent être réunies dans un fichier de grille (fichier .2dm). Une grille de calcul contient également les informations altimétriques du modèle ainsi que la taille des cellules de la grille. Si la grille de calcul est créée dans QGIS, l'outil *BASEmesh* peut être utilisé; il est compatible avec le logiciel de simulation BASEMENT utilisé dans le présent manuel. Le chapitre 6 présente, à l'aide d'un exemple, la procédure détaillée de préparation de la simulation.

A retenir !

Pour toutes les simulations, les éléments suivants sont nécessaires :

1. Modèle numérique de terrain, modèle altimétrique, modèle numérique de surface (données swisstopo utilisables dans un SIG) → permettent de définir les limites du modèle, la zone riveraine / zone urbanisée et la ligne de rive
2. Conditions aux limites (débits entrants/sortants, ouvrages de régulation, etc.)
3. Localisation du TERM dans le lac (si disponible) + forme d'onde calculée
4. SAQM cartographiés (si disponible) + leur épaisseur
5. Tous les éléments ci-dessus réunis dans la grille de calcul sous la forme d'un fichier .2dm

5.2 Simulation

5.2.1 Modèle initial

Un "modèle initial" doit être créé comme point de départ pour toutes les simulations ultérieures. Il consiste à effectuer une simulation sans aucun mécanisme de déclenchement de tsunami, mais en tenant compte des éventuels débits entrants et sortants ainsi que des autres conditions aux limites. Le niveau du lac ne devrait pas varier de manière significative pendant la durée de la simulation, sauf si une telle variation est attendue en raison des débits entrants et sortants. Aucune onde ne devrait être générée. Le modèle initial sert de base aux autres simulations et peut être adapté si certains débits entrants et sortants ne sont plus pertinents ou si de nouveaux doivent être ajoutés.

5.2.2 Sensibilité de la grille

Avant de choisir la grille de calcul définitive, il convient de tester différentes tailles de cellules de grille et d'évaluer leur influence sur les résultats de la simulation. En général, il est recommandé d'utiliser des cellules de grille plus petites dans la zone riveraine que dans la zone lacustre, afin de représenter plus précisément l'étendue de l'inondation sans excessivement augmenter le temps de calcul. L'influence de la taille des cellules devrait être testée de manière itérative jusqu'à ce que le ou la responsable du projet puisse évaluer de manière fiable son effet sur les résultats de la simulation. Les événements historiques se prêtent particulièrement bien à ce type d'analyse (voir ci-dessous). Pour chaque modification de la taille des cellules de la grille, une grille de calcul définitive doit être créée (voir 5.1.4.).

5.2.3 Calibration et validation

Le modèle mis en place peut, si possible, être calibré et validé à l'aide d'événements historiques. Si des événements ayant provoqué un tsunami dans le lac à étudier sont connus, ceux-ci peuvent être reproduits par simulation. Il est ainsi possible d'évaluer si la grille de calcul créée présente une résolution suffisante pour reproduire l'événement avec la précision requise, aussi bien sur le lac qu'à terre. Dans le cas contraire, la taille des cellules de la grille peut être adaptée de manière itérative. Il est également possible d'évaluer si la simulation tend, par exemple, à surestimer ou à sous-estimer l'épaisseur du mouvement de masse entraînant ainsi des vagues respectivement trop grandes ou trop petites. Cette étape des travaux préliminaires peut également permettre d'examiner l'influence des débits entrants ou sortants sur la propagation et l'amplitude des vagues.

Pour mieux comprendre ce phénomène et pouvoir évaluer la hauteur des ondes, nous tenons à préciser qu'une onde générée par un TERM et une autre générée par un SAQM ont à peu près la même amplitude, à condition que le volume, la masse volumique et d'autres paramètres spécifiques du glissement de terrain soient identiques ou similaires.

5.2.4 Analyse de sensibilité et modélisation probabiliste

Pour évaluer les incertitudes liées à la simulation des tsunamis lacustres, une analyse de sensibilité ou une modélisation probabiliste peut être réalisée. Une analyse de sensibilité met généralement en évidence l'évolution des résultats en fonction d'un paramètre ou d'une grandeur du modèle, mais ne permet pas une évaluation générale des incertitudes. Elle se prête bien à la comparaison des effets de différents scénarios. Afin de tenir compte plus généralement des incertitudes, une approche probabiliste peut être utilisée. Elle repose sur un grand nombre de simulations qui diffèrent par un ou plusieurs paramètres. Dans un premier temps, un écart-type représentant une plage d'incertitude est attribué à chaque paramètre à évaluer, sur la base de l'expertise portant sur le mouvement de masse. Ces informations permettent ensuite de réaliser des simulations utilisant la valeur moyenne ainsi qu'un nombre approprié de percentiles du paramètre considéré. Si plusieurs paramètres présentent une plage d'incertitude, l'approche du Latin Hypercube Sampling (2.4.1) peut être utilisée pour réduire le nombre de combinaisons à simuler.

5.2.5 Application avec le logiciel de simulation BASEMENT

Pour les simulations, le logiciel BASEMENT (Vetsch et al., 2020 ; Vanzo et al., 2021) est utilisé. Il résout les équations en eau peu profondes afin de modéliser les conditions hydrodynamiques (p. ex. dans un lac ou un cours d'eau). Les équations utilisées pour la simulation supposent que le rapport entre la profondeur d'eau moyenne (profondeur d'eau de référence) h_{ref} et la longueur d'onde du tsunami λ est très inférieur à 1 ($h_{ref} / \lambda \ll 1$). Cela signifie que la profondeur de l'eau doit être nettement inférieure à la longueur d'onde caractéristique.

Les paragraphes suivants décrivent uniquement les particularités à prendre en compte dans BASEMENT pour la génération de tsunamis. Pour plus de détails sur l'utilisation de BASEMENT, il convient de se référer au [manuel d'utilisation](#). Le chapitre 6 présente en outre, à l'aide d'un exemple, la démarche à suivre pour la simulation étape par étape.

TERM

Dans le cas d'un TERM, deux séries temporelles doivent être disponibles: une série temporelle décrivant la forme de l'onde avec l'amplitude A , et une série temporelle décrivant la forme d'onde à l'aide du débit q . Une condition aux limites interne est utilisée pour générer le tsunami. Celle-ci est définie dans le bloc BOUNDARY, sous INTERNAL. La condition aux limites interne spécifique aux TERM s'appelle *zqhydrograph_internal*. Lorsque cette condition est sélectionnée, les deux séries temporelles (A et q) peuvent être chargées, ainsi que les paramètres *name* et *stringdef* de la condition aux limites. Le paramètre *stringdef* correspond au nom attribué à la condition aux limites dans le SIG. Le paramètre *name* correspond au nom attribué à cette condition dans le bloc STRINGDEF. Une fois la configuration terminée, celle-ci peut être validée à l'aide de l'interface graphique ou dans le terminal. Lorsque la grille de calcul est très grande, cette validation peut prendre plusieurs secondes.

La simulation est ensuite définie, les paramètres de sortie sont ajoutés ou supprimés, et la durée de simulation est fixée. Le calcul proprement dit de la propagation des ondes peut alors être lancé avec BASEMENT. Selon la taille de la grille et le type et le nombre de cœurs de calcul utilisés, la simulation peut durer plusieurs heures. Enfin, le fichier de résultats doit être généré.

SAQM

Dans le cas des SAQM, il faut connaître l'épaisseur moyenne des mouvements de masse potentiels ainsi que les zones correspondantes. Le bloc MASSMOVEMENT est utilisé pour les SAQM. Les données d'entrée requises sont les *matID* des zones de mouvement de masse ainsi que l'épaisseur correspondante de chacune de ces zones. Les étapes suivantes de la simulation sont identiques à celles utilisées pour un TERM: configuration et exécution de la simulation, puis génération du fichier de résultats.

5.3 Évaluation et visualisation des résultats

La simulation numérique permet d'obtenir différents paramètres relatifs aux tsunamis, qui peuvent être représentés sous forme de séries temporelles ou de cartes d'intensité. Dans la zone lacustre, la hauteur des vagues et leur vitesse de propagation présentent un intérêt particulier, tandis qu'à terre, ce sont principalement la profondeur d'écoulement, la vitesse d'écoulement et le temps d'arrivée de la vague qui sont importants. Les résultats de la simulation peuvent être visualisés à l'aide de logiciels appropriés tels que ParaView ou des logiciels SIG.

Les cartes d'intensité constituent l'un des principaux produits de la démarche d'évaluation du danger lié aux tsunamis. Elles fournissent des informations sur l'intensité de l'aléa dans une région donnée, exprimée à l'aide des paramètres d'inondation suivants :

- h : profondeur de l'écoulement [m]
- v : vitesse d'écoulement [m/s]

Pour les cartes d'intensité, les valeurs maximales de h et v présentent un intérêt particulier. Ces paramètres permettent de déterminer la hauteur maximale de remontée au-dessus du niveau du lac ainsi que l'étendue de la zone inondée. Le produit de la profondeur d'écoulement par le carré de la vitesse d'écoulement (hv^2) correspond au flux de quantité de mouvement (le "momentum flux"), qui constitue un paramètre important pour les calculs de dommages. Sur les cartes d'intensité, les profondeurs d'écoulement peuvent être classées de manière analogue aux classes d'intensité utilisées pour les inondations : faible ($< 0,5m$), moyenne ($0,5 - 2m$) et grande ($> 2m$) profondeur d'écoulement ([Document OFEV Inondations](#)).

Des séries temporelles peuvent aussi être créées à l'aide d'un script Python fourni avec le logiciel BASEMENT. Le script Python *BMv4GaugeExtract.py* permet d'extraire, en fonction du temps, les paramètres d'inondation souhaités en un point quelconque de la grille, aussi bien à la surface du lac qu'à terre, puis de les représenter sous forme de séries temporelles. De plus amples informations sur l'utilisation de ce script et d'autres outils d'analyse sont disponibles sur le site web de BASEMENT: <https://basement.ethz.ch/download/tools.html>.

6 Exemple d'application

Ce chapitre présente en détail les différentes étapes de travail nécessaires à l'évaluation du danger lié aux tsunamis lacustres, à partir d'un exemple d'application au lac des Quatre-Cantons. IL prend en compte l'analyse de la situation (données de base, élaboration des scénarios) ainsi que l'analyse des effets (préparation de la simulation, simulation, évaluation des résultats).

6.1 Prérequis matériels et logiciels

Avant de présenter l'exemple d'application, nous donnons un bref aperçu des prérequis techniques nécessaires à la préparation et à l'exécution des simulations.

Le logiciel BASEMENT, développé à la VAW (Vetsch et al., 2020, entre autres), est bien adapté à la modélisation des tsunamis lacustres (Nigg et al., 2021). La flexibilité du maillage permet de modéliser de très grandes zones tout en représentant des géométries complexes avec un niveau de détail élevé. Grâce à l'architecture spécifique du logiciel, caractérisée par une forte capacité de calcul parallèle à l'aide de processeurs multicœurs (CPU) ou de processeurs graphiques (GPU), les calculs peuvent être effectués de manière très efficace. BASEMENT est disponible gratuitement et peut être téléchargé sur ce [site](#). Les systèmes d'exploitation Windows et Linux sont pris en charge. De plus amples informations sont disponibles sur la [page d'accueil de BASEMENT](#).

Le logiciel BASEMENT dispose d'une interface utilisateur graphique (GUI) qui facilite la configuration et l'exécution des simulations et permet de créer les trois fichiers model.json, simulation.json et result.json. Une version de QGIS compatible avec BASEmesh est également nécessaire. BASEmesh est une boîte à outils intégrée dans QGIS permettant de créer la grille de calcul utilisée pour les simulations avec BASEMENT. Des informations complémentaires sont disponibles dans le manuel d'utilisation de BASEMENT mentionné ci-dessus.

Pour simuler des tsunamis lacustres, il est indispensable d'utiliser la version la plus récente de BASEMENT. La version la plus récente du plugin QGIS BASEmesh doit également être installée. Une version de Python3 est en outre requise.

Matériel/logiciel utilisé pour l'exemple d'application

1. Matériel : GPU : Tesla P100-PCIE-12GB
2. Système d'exploitation : Linux *Ubuntu-Jammy*
3. BASEMENT Version 4.0.1
4. QGIS version 3.22 *Biatowieza*
5. QGIS BASEmesh Plugin version 2.2.0
6. Python version 3.10.12

6.2 Analyse de la situation

Dans ce sous-chapitre, nous suivons la structure des chapitres 3.1 et 4 et présentons, étape par étape, les tâches à effectuer et les réflexions à mener pour aboutir à une élaboration réussie des scénarios.

1. Collecte de données et localisation des TERM
2. Collecte de données et cartographie des SAQM
3. Elaboration des scénarios

6.2.1 Données spécifiques pour les TERM

Les travaux spécifiques aux TERM comprennent deux parties : la définition des TERM potentiels (c'est-à-dire leur localisation, leur taille, leur masse volumique, ...) et le calcul du paramètre du produit d'impulsion permettant d'établir les séries temporelles de l'amplitude et du débit de l'onde générée par les TERM. La définition d'un TERM potentiel relève de la compétence d'un(e) expert(e) en géologie/stabilité des pentes et devrait être confiée à un(e) expert(e). Cette étape n'est donc pas décrite dans cet exemple d'application. Dans la suite, nous examinons les étapes de calcul du paramètre du produit d'impulsion et des séries temporelles, à condition que des données relatives à un TERM potentiel soient disponibles. Nous utilisons donc, dans cet exemple, l'éboulement historique d'Obermatt dans le lac des Quatre-Cantons (Fuchs and Boes, 2010) comme exemple de TERM.

Calcul du paramètre du produit d'impulsion P

Comme décrit dans les chapitres 3.2 et 5.1.2, il faut d'abord calculer le paramètre du produit d'impulsion P . Dans cet exemple, nous utilisons les valeurs de l'éboulement historique d'Obermatt (Fuchs and Boes, 2010) pour calculer P (tab. 6.1). Dans le cas d'une simulation déterministe (c.-à.-d sans tenir compte des incertitudes liées aux paramètres), une valeur est attribuée à chaque paramètre (2e colonne du tableau 6.1). En utilisant l'équation 3.1, nous obtenons une valeur de $P = 0,0433366$, ce qui permet de calculer, conformément aux équations 3.2 et 3.3, les amplitudes de la première vague $a_1 = 2,65$ m et de la deuxième vague générée $a_2 = 6,88$ m.

Paramètres	Valeur	Écart-type	Unité
Vitesse d'immersion	30	6	m/s
Profondeur d'eau de référence h_{ref}	146	29.2	m
Angle d'impact α	30	6	$^{\circ}$
Volume V_B	5000	1000	m^3
Épaisseur S	5	1	m
Largeur B	50	10	m
Masse volumique ρ_s	2000	400	kg/m^3

Tableau 6.1 : Valeurs utilisées pour le calcul du paramètre du produit d'impulsion P . Ces valeurs proviennent de Fuchs and Boes (2010).

Calculs pour l'entrée de l'onde dans le modèle

Il est maintenant possible de calculer la hauteur de la vague en fonction du temps à partir des amplitudes maximales déterministes respectives (ou des amplitudes correspondant aux percentiles retenus). Ce calcul est effectué pour l'amplitude maximale de la première vague ($a_1 = 2.65$ m) et de la deuxième vague ($a_2 = 6.88$ m). Pour calculer la forme d'onde, nous utilisons les équations 3.6 et 3.7 en introduisant

une première fois les paramètres correspondant à la première vague, puis ceux correspondant à la deuxième. On obtient ainsi la forme d'onde et le débit du tsunami généré par un TERM. Il convient de noter que les deux variables, à savoir la distance x et la durée t sur laquelle la forme de l'onde est lue, doivent toujours être ajustées à chaque fois. Cela signifie que pour une onde étroite, une durée t plus courte peut être choisie tout en conservant une représentation complète de l'onde. La distance x a pour effet de décaler l'onde vers la droite, c'est-à-dire vers un instant ultérieur. Les deux variables doivent donc être ajustées de manière itérative. Plusieurs essais sont généralement nécessaires pour déterminer de combien l'onde est décalée et quelle durée t doit être choisie afin que la forme d'onde soit représentée dans son intégralité. La figure 6.1 montre, à titre d'exemple, pour le cas décrit ci-dessus, la première et la deuxième vague.

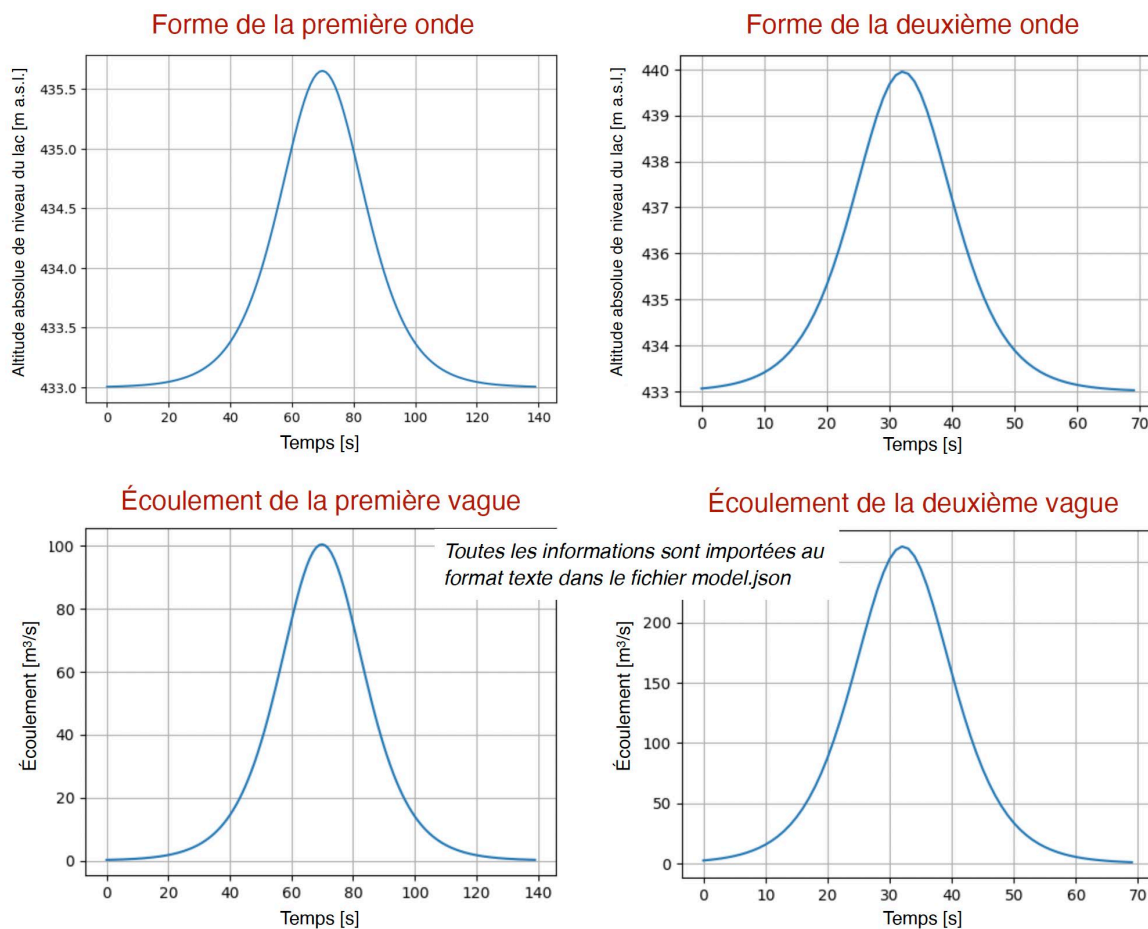


Figure 6.1 : Hauteur et débit de la première et de la deuxième onde et l'écoulement en fonction du temps (forme d'onde d'une onde solitaire), obtenus à partir de l'équation KdV.

Pour la simulation, les valeurs d'amplitude représentées pour les deux vagues, auxquelles s'ajoute le niveau absolu du lac, doivent être disponibles dans un fichier texte (fig. 6.2), afin de pouvoir être lues dans le fichier de configuration. L'intervalle entre les deux vagues, tant pour l'amplitude que pour le débit, doit être choisi aussi court que possible, tout en veillant à ce que l'amplitude et le débit de la première vague soient revenus à zéro avant le début de la deuxième vague (fig. 6.2). La forme d'onde peut être calculée à l'aide de l'équation KdV pour autant de scénarios que nécessaire, c'est à dire pour différents percentiles présentant un intérêt pour l'analyse. Comme indiqué ci-dessus, la distance x et la

Début de la première vague					
1	433.025629194522	Temps [s]	Amplitude [m]	133	433.022084675475
2	433.02856033733			114	433.019815620302
3	433.031824674364			115	433.017778907722
4	433.035459588763			116	433.015950900713
5	433.039506538623	50	435.361365705315	117	433.0143103368
6	433.044011472153	51	435.441376984795	Fin de la première vague	
7	433.049025277971	52	435.510374021015	120	433.010331561463
8	433.054604271624	53	435.566889533682	121	433.137972521321
9	433.060810718947	54	435.609674556734	Début de la deuxième vague	
10	433.06771339609	55	435.637755350307	124	433.240112633838
11	433.075388185105	56	435.650479616031	125	433.28850092367
12	433.08391870266	57	435.647548331279	126	433.34638533916
13	433.093396957804	58	435.629030572314	127	433.415515973319
14	433.103924032551	59	435.595360077326	128	433.497915035328
15	433.115610776374	60	435.547313840299	129	433.595896345575
16	433.128578502344			130	433.71207473635
17	433.142959668506			131	433.849358559806
18	433.158898523053	...		132	434.010916046166
19	433.176551685757			133	434.200103443649
20	433.196088630851			134	434.420340011621
...				135	434.674912655311

A ce stade, toutes les étapes nécessaires ont été réalisées. Les séries temporelles du niveau absolu du lac, incluant les amplitudes des vagues calculées ainsi que du débit sont désormais disponibles pour la simulation.

Les travaux spécifiques aux SAQM comprennent la cartographie et la délimitation des zones associées aux SAQM potentiels. Nous présentons ici, étape par étape, une méthode possible.

Dans cet exemple d'application, les SAQM potentiels du lac des Quatre-Cantons ont été cartographiés à l'aide de l'estimation rapide fondée sur les équations d'équilibre limite. Dans un premier temps, la bathymétrie du lac des Quatre-Cantons est examinée et certaines zones sont provisoirement exclues.

43

Pour l'estimation rapide à l'aide des équations d'équilibre limite, les zones présentant une inclinaison de la pente comprise entre 5°-10° sont également délimitées (fig. 6.4 a). Le facteur de sécurité FS est ensuite calculé (équation 3.9) à partir des données d'accélération du sol correspondant à une période de retour sismique de 2475 ans (valeur utilisée à titre d'exemple et à adapter en fonction du scénario), de l'inclinaison de la pente, de l'épaisseur des sédiments déduite à l'aide de l'équation 3.10 ainsi que des valeurs de bulk density moyenne et de résistance au cisaillement non drainée (voir section 3.3.1). Ce calcul peut être effectué dans n'importe quel programme ou directement dans le logiciel SIG. Dans cet exemple, il a été effectué directement dans QGIS. La figure 6.3 illustre les différentes étapes de la procédure. Tout d'abord, le fichier contenant les données d'accélération du sol doit être chargé dans QGIS. Il doit éventuellement être reprojeté dans le système de coordonnées approprié (*Reproject Layer*), puis enregistré sous forme de Shapefile de points. Les valeurs sont ensuite interpolées sur une grille raster. Cette opération peut, par exemple, être réalisée à l'aide de l'outil *TIN Interpolation*. Dans le présent exemple, une autre méthode a été utilisée: avec l'outil *Convert legacy layer (Point) de BASEmesh*, l'information relative à l'accélération du sol peut être attribuée à chaque point à la place de l'information altimétrique. L'outil *Elevation meshing*, permet ensuite de créer un maillage dans lequel l'accélération du sol est interpolée à partir des points. Ce maillage est ensuite converti en un fichier .TIF à l'aide de l'outil *Rasterize mesh dataset*.

Une taille de pixel de 100 m a été utilisée. Afin que l'accélération du sol interpolée ne soit représentée qu'à l'intérieur du lac, le raster correspondant a été limité à l'emprise du lac à l'aide de l'outil *Clip raster by mask layer* et de la ligne de rive simplifiée.

L'étape suivante consiste à calculer la profondeur d'eau à l'aide du *Raster calculator*, à partir de l'altitude de la ligne de rive et de la bathymétrie. L'outil *Slope* permet ensuite de calculer l'inclinaison de la pente du lac à partir de la bathymétrie. Enfin l'épaisseur des sédiments est calculée à l'aide de l'équation 3.9 et du *Raster calculator*. Il convient de noter que l'épaisseur des sédiments présente de fortes incertitudes. Il appartient donc aux spécialistes de décider, le cas échéant, s'il convient d'utiliser plusieurs valeurs d'épaisseur des sédiments dans les étapes et les simulations suivantes. Sur la base des combinaisons présentées dans le tableau 3.2 et des données ainsi calculées, il est possible de définir les zones pour lesquelles $FS < 1$ (fig. 6.3).

Les zones pour lesquelles $FS < 1$ sont affichées dans le SIG (fig. 6.4a, contours blancs). Elles se superposent toutefois en grande partie à des zones ayant déjà glissé (fig. 6.4b, flèches). Par conséquent, seuls quelques SAQM potentiels peuvent être retenus. Deux zones ont été identifiées à des endroits où ni niche d'arrachement marquée ni quantité importante de dépôts de glissement ne sont visibles et qui se trouvent en outre à l'intérieur des zones délimitées en blanc. Ces deux zones seront retenues comme zones associées aux SAQM qui seront examinés et simulés dans la suite de l'exemple d'application.

Le résultat de la cartographie des SAQM non deltaïques est la carte de disposition des SAQM non deltaïques. En la combinant avec les SAQM deltaïques potentiels issus de la [base de données des delta](#) (voir ci-dessous) ainsi qu'avec les TERM cartographiés par des spécialistes, on obtient la carte de disposition complète de l'ensemble des mouvements de masse.

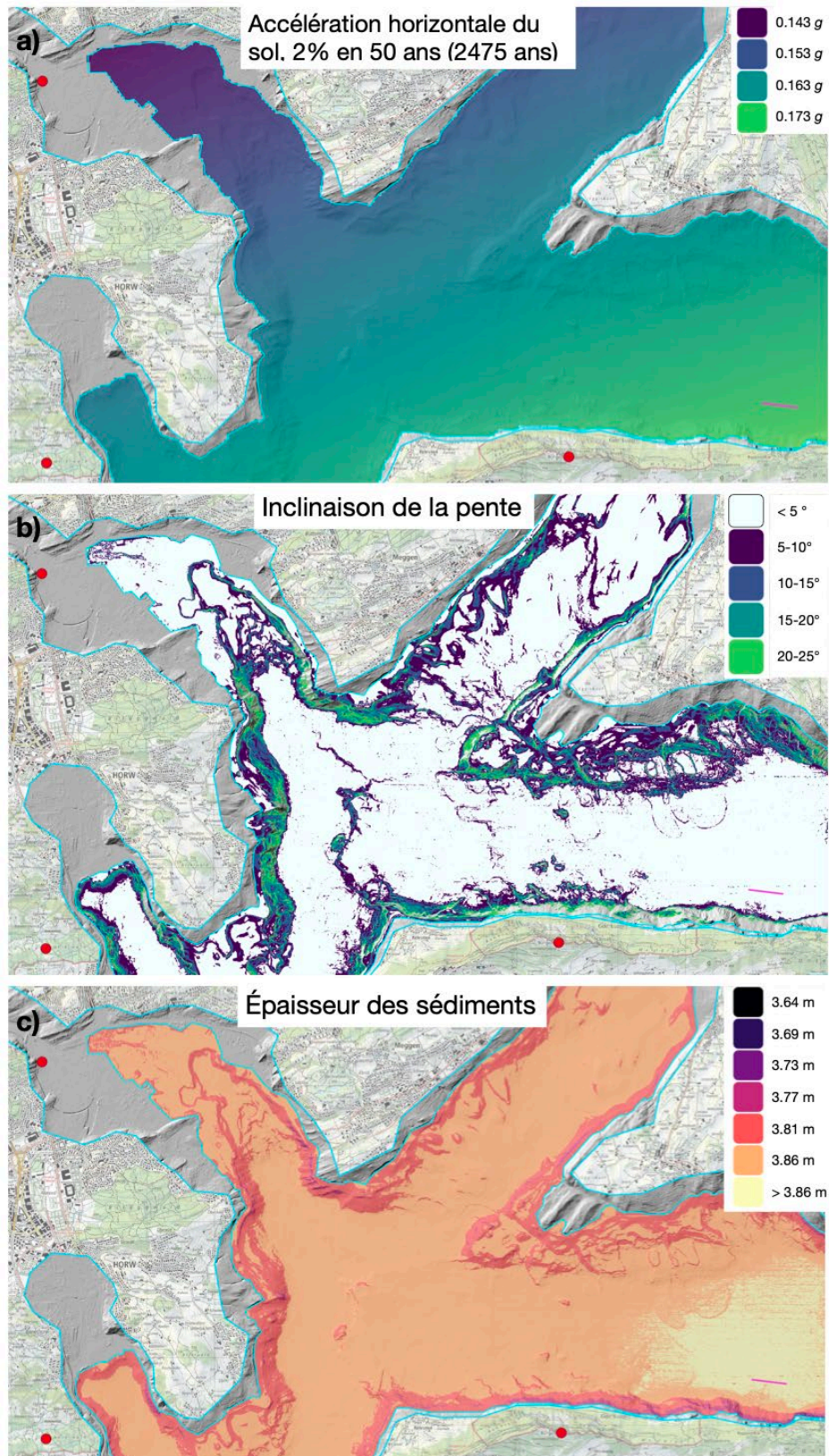


Figure 6.3 : a) montre l'accélération horizontale moyenne du sol (PGA par rapport à g) pour une période de retour sismique de 2475 ans, b) l'inclinaison de la pente et c) l'épaisseur des sédiments. A partir de la combinaison de ces 3 propriétés, il est possible, de définir des zones avec $FS < 1$, en utilisant le tableau 3.2.

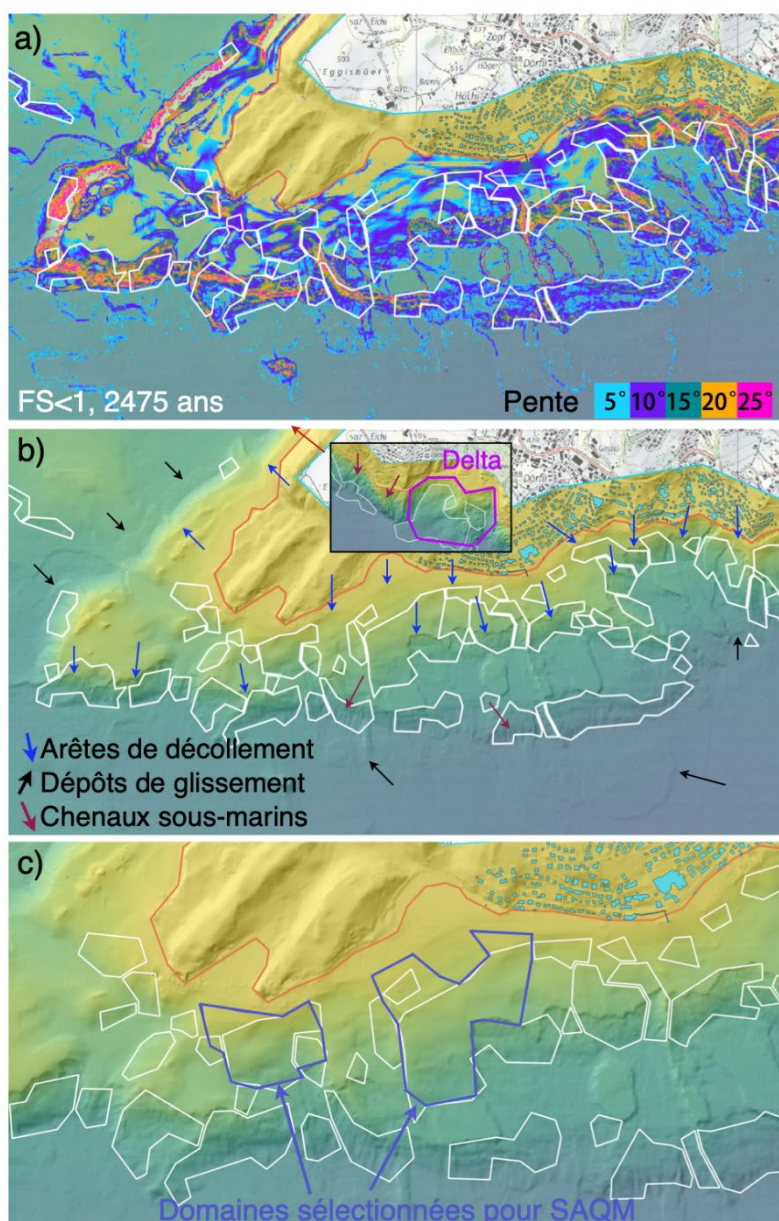


Figure 6.4 : La bathymétrie du lac est représentée en arrière-plan dans les trois panneaux. a) montre, au premier plan, l'inclinaison de la pente ainsi que, délimitées en blanc, les zones pour lesquelles $FS < 1$, en tenant compte d'une période de retour sismique de 2475 ans, de l'épaisseur des sédiments et de l'inclinaison de la pente, b) montre également les zones représentées en a) ainsi que, à titre d'exemple, les niches d'arrachement (flèches bleues), les dépôts de glissement sur fond du lac (flèches noires) et les chenaux sous-lacustres (flèches rouges). Ces informations sont utilisées pour exclure certaines zones de la sélection des SAQM potentiels. L'encadré illustre, à titre d'exemple, l'aspect bathymétrique d'une zone deltaïque. c) montre les zones finalement cartographiées et retenues pour les SAQM.

Cartographie des SAQM deltaïques

Pour la cartographie des SAQM deltaïques, les données existantes de la [base de données des deltas](#) peuvent être utilisées. Dans cet exemple d'application, nous ne prenons pas en compte les SAQM deltaïques, car la démarche appliquée par la suite est identique à celle utilisée pour les SAQM non deltaïques.

6.2.3 Elaboration des scénarios

Combinaison de TERM et de SAQM

Afin de ne pas devoir créer un nouveau projet SIG pour chaque scénario, il est possible de cartographier plusieurs SAQM sur un même shapefile sans utiliser, pour chaque simulation, toutes les zones associées aux mouvements de masse qui y sont représentées. Il est donc recommandé de noter les *matID* et les *name* des zones associées aux mouvements de masse potentiels et de créer un tableau regroupant tous les scénarios et les zones correspondantes. De même, il n'est pas nécessaire d'utiliser tous les TERM dans chaque simulation. Plusieurs conditions aux limites associées aux TERM peuvent également être représentées dans un même Shapefile sans être toutes utilisées dans chaque simulation; il convient alors de noter le *name* de chaque condition aux limites.

Il est ainsi possible de combiner différents TERM et SAQM dans différents scénarios et de n'utiliser que les zones et les conditions aux limites souhaitées pour la simulation correspondante. Dans la suite de cet exemple d'application, nous utilisons un TERM correspondant à un événement historique, ainsi que les deux SAQM cartographiés de manière non deltaïque. Le TERM pourrait par exemple servir d'événement de validation. Les SAQM non deltaïques pourraient, par exemple, avoir été déclenchés par un séisme. Cela correspond à l'hypothèse d'une période de récurrence sismique de 2475 ans formulée lors de la cartographie présentée en exemple ci-dessus.

6.3 Analyse des effets

6.3.1 Préparation de la simulation

Dans cette section, nous décrivons, à l'aide de l'exemple d'application, comment préparer les fichiers nécessaires à la création d'une grille de calcul. Pour créer ces fichiers, les informations suivantes sont nécessaires (fig. 6.5) :

- Limites du modèle
- Ligne de rive
- Conditions aux limites (débits entrants et sortants, éventuelle régulation du lac, etc.)
- Zones cartographiées associées aux mouvements de masse (SAQM)
- Bâtiments
- Emplacement de la condition aux limites associée au TERM dans le lac

Définition de la zone d'étude

Dans l'exemple présenté ici, la zone d'étude comprend l'ensemble de la zone riveraine du lac des Quatre-Cantons, avec un intérêt particulier pour trois localités voisines: Lucerne, Stansstad et Weggis. C'est pourquoi les bâtiments de ces zones ont été pris en compte ([swissTLM3D](#)), contrairement à ceux du reste du domaine de modélisation, car cela augmenterait excessivement le temps de calcul. La zone d'inondation est définie par les limites du modèle (en bleu clair) et comprend toutes les zones riveraines de faible pente. Un modèle numérique de terrain permet de définir l'étendue de la zone riveraine. Ce modèle sera également nécessaire pour la suite de la création de la grille de calcul. La ligne de rive (en orange) a été dérivée et simplifiée à partir d'un jeu de données existant ([swissTLM3D](#)), puis tracée. En outre, toutes les zones ont été préparées de manière à former des polygones fermés à l'aide de la fonction

Snapping, car la zone du modèle ne doit présenter aucun trou lors de la création de la grille de calcul. Toutefois, les polygones ne peuvent pas être utilisés directement: conformément aux exigences de BASEMENT, des polygones doivent impérativement être utilisées. Selon les besoins, d'autres zones peuvent être définies, par exemple afin d'attribuer une résolution de grille spécifique à une zone donnée. Toutes les *polylines* sont ensuite regroupées dans un shapefile de polygones. Lors de la création de la grille de calcul, les polygones de ce shapefile sont appelées *breaklines*. Pour simplifier, nous appelons donc ce shapefile *breaklines_boundary*. Un shapefile de points est ensuite créé, afin d'attribuer des propriétés spécifiques à chacune des zones délimitées par les *breaklines*. Dans cet exemple, ce shapefile est appelé *region_points*. Chaque zone doit recevoir les attributs *matID*, *name*, *area* (taille maximale des éléments de maillage dans cette zone), *hole* (indiquant si la zone est ignorée dans la simulation) et ID (attribué automatiquement par QGIS) (Fig. 6.7). Pour créer le shapefile de points, une entité ponctuelle (Point feature) est placée dans chaque zone (lac, zone riveraine, zones associées aux SAQM, ...) puis les attributs décrits ci-dessus sont ajoutés sous forme de colonnes dans la table d'attributs: *matID* (Material ID), *area*, *name* et *hole* en plus de la colonne *ID* créée automatiquement. Les attributs *name* et *matID* sont nécessaires à la simulation. Il est donc recommandé de noter les attributs *name* et les *matID* correspondants.

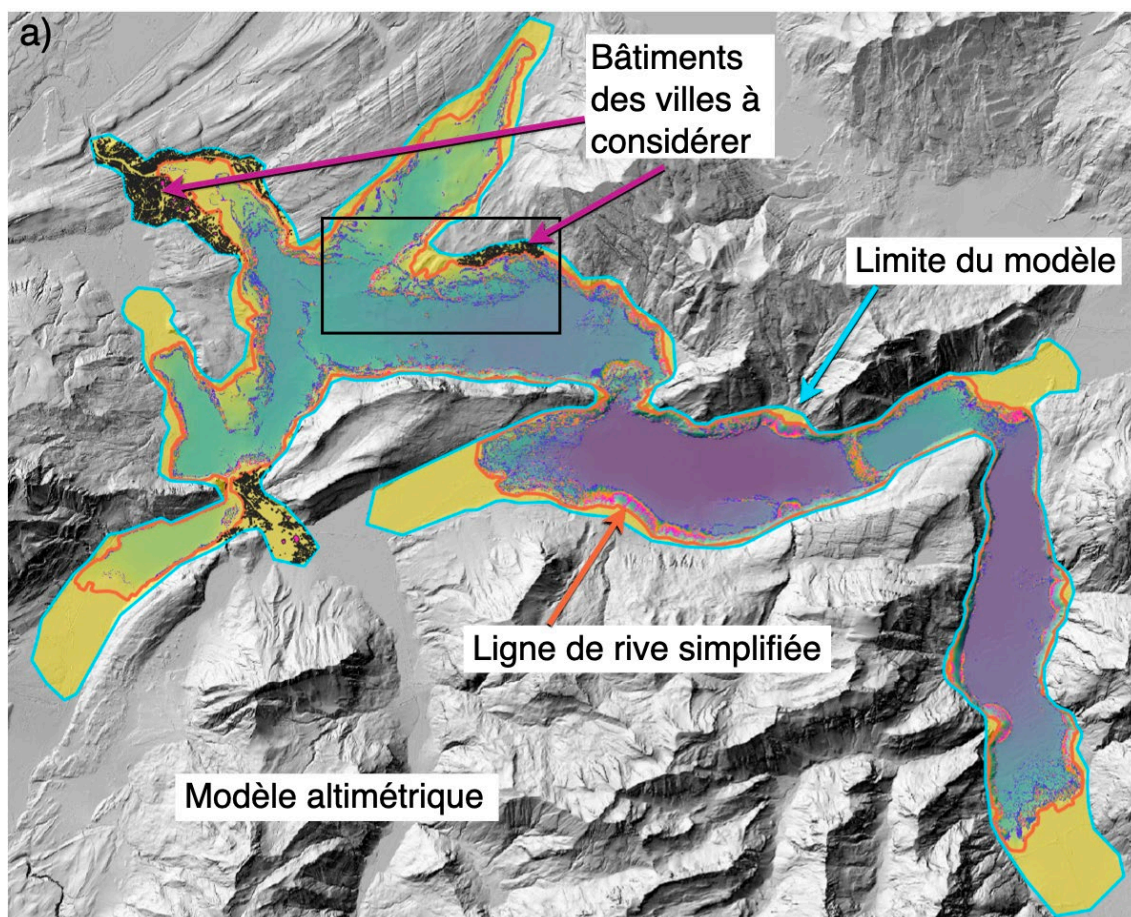


Figure 6.5 La figure présente une vue d'ensemble de la zone du domaine de modélisation. La limite du modèle est indiquée en bleu clair, la ligne de rive simplifiée du lac en orange; le modèle numérique de terrain ainsi que la bathymétrie du lac sont visibles en arrière-plan. Trois villes présentent un intérêt particulier dans ce scénario, les bâtiments de Lucerne, Weggis et Stansstad sont donc pris en compte dans le modèle. L'encadré montre le secteur présenté lors de la cartographie des SAQM potentiels.

Zones associées aux SAQM

Deux étapes doivent être réalisées dans cette partie. Les zones associées aux SAQM ayant déjà été cartographiées sont maintenant tracées dans le même shapefile de polygones que la limite du modèle et la ligne de rive décrites ci-dessus. Tous les SAQM y sont représentés, même s'ils ne sont pas tous utilisés dans chaque scénario. Dans l'exemple présenté ici, il s'agit du shapefile nommé *breaklines_boundary* dans la figure 6.7.

Comme pour les régions lacustres et riveraines (ainsi que, pour d'autres régions), un *ID* (facultatif, attribué automatiquement par de nombreux logiciels SIG), un *matID*, une *area*, un *name* et un *hole* sont attribués à chaque zone associée à un SAQM. Les points sont placés dans le même shapefile de points que celui qui contient les informations relatives aux régions lacustres et riveraines. Les *matID* des zones associées aux SAQM ne doivent pas être identiques à ceux des régions lacustres, riveraines ou autres. Dans cet exemple, toutes les définitions des zones figurent dans le même shapefile de points nommé *region_points* (fig 6.7), avant que celui-ci ne soit complété par les bâtiments (voir section suivante). Ici aussi, *name* et *matID* sont nécessaires pour la simulation et devraient être notés.

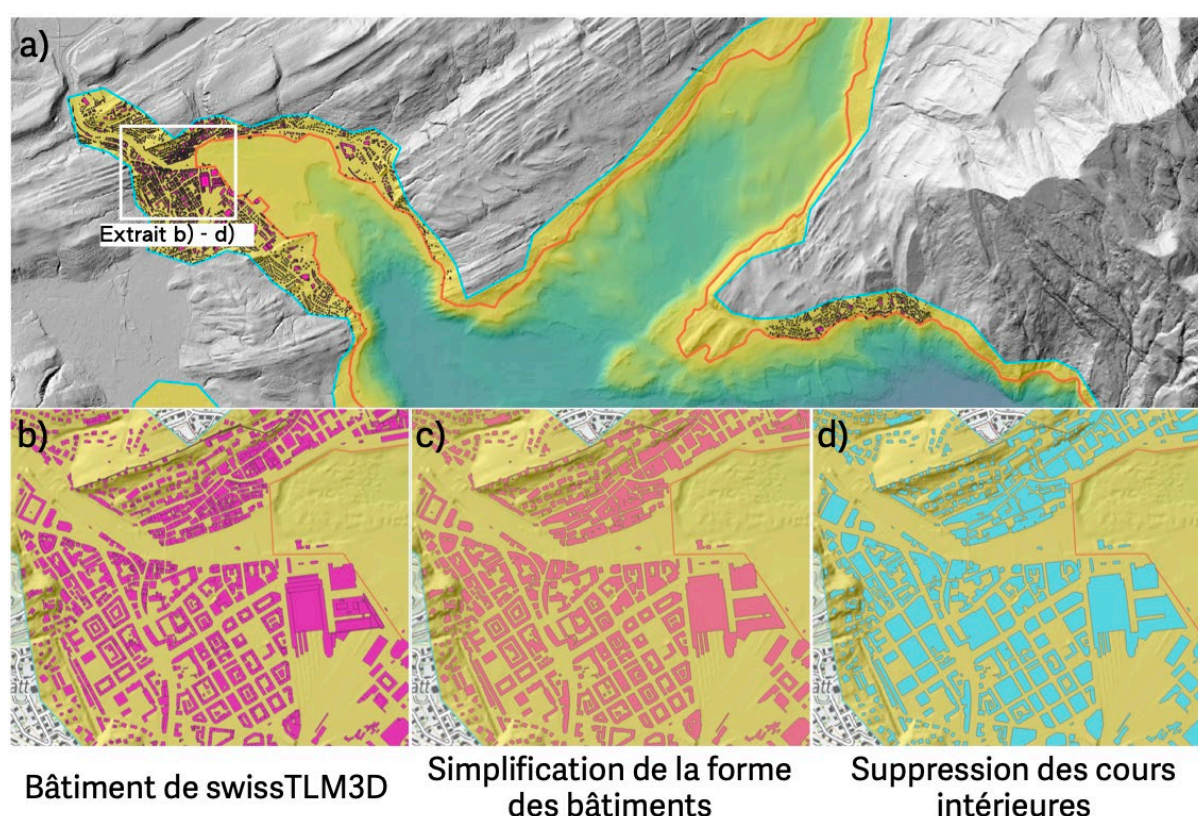
Prise en compte des bâtiments

Comme décrit au chapitre 5.1, il existe deux possibilités pour prendre en compte les bâtiments. Dans cet exemple, nous présentons la variante la plus complexe, qui consiste à utiliser les polygones des bâtiments issus du jeu de données swissTLM3D.

Dans ce scénario, trois régions riveraines présentent un intérêt particulier : les villes de Lucerne, Weggis et Stansstad. Weggis se situe directement au-dessus des SAQM considérés, Lucerne se trouve à l'extrémité d'une baie étroite et est la plus grande ville du lac des Quatre-Cantons, tandis que Stansstad est située au niveau de l'étroit passage vers le lac d'Alpnach. Les contours des bâtiments sont disponibles sous forme de polygones issus de swissTLM3D (fig. 6.6). Dans un premier temps, tous les bâtiments autour du lac, à l'exception des villes mentionnées, ont été supprimés du jeu de données, car leur prise en compte entraînerait la génération de très petites cellules de grille dans l'ensemble des zones bâties et augmenterait fortement le temps de calcul. L'outil spécifique [*Mesh with building*](#) peut être utilisé. Les fichiers à exécuter ainsi que les instructions correspondantes sont disponibles sur le site web. Le premier fichier de la procédure ne doit plus être exécuté, car les données de swissTLM3D sont désormais disponibles sous forme de polygones et non de polygones. La procédure commence donc avec le fichier 02. Les fichiers 02 et 03 comportent des paramètres relatifs à la précision des contours des bâtiments. Ceux-ci doivent être adaptés au projet. Lorsque les bâtiments sont très proches les uns des autres, il n'est pas possible de retenir une distance de 5 m. Dans cet exemple, des valeurs de 2 m (fig. 6.6c) et 3 m (fig. 6.6d) ont été utilisées, car le centre-ville de Lucerne comporte des ruelles très étroites. Malgré cette précision, certains bâtiments fusionnent et certains contours sont légèrement modifiés. Ces éléments peuvent être corrigés manuellement avant l'exécution du fichier 03.

Avant d'exécuter le fichier 04, les étapes décrites dans les sections précédentes (*Définition de la zone d'étude* et *Zones associées aux SAQM*) doivent être terminées. En effet, le fichier 04 manipule le shapefile de points contenant les définitions des régions ainsi que le shapefile de polygones contenant les zones du SAQM et les zones riveraines et lacustres. Pour pouvoir exécuter le fichier 04, il est impératif que toutes les zones du SAQM ainsi que les zones riveraines et lacustres soient déjà regroupées dans un seul et même shapefile de polygones. Il en va de même pour les points définissant les régions associées aux SAQM et les autres régions, qui doivent également être définis sur un seul et même shapefile de points. Il est en outre très important que tous les fichiers shapefile utilisent le même système de coordonnées. Pour l'exécution du fichier 04, les deux shapefiles qui viennent d'être décrits

ci-dessus sont sélectionnés, ainsi que le shapefile des bâtiments sans cours intérieures généré à l'aide du fichier 03. La figure 6.6a montre cette configuration pour l'exemple présenté ici. Lors de l'exécution du fichier 04, le shapefile de points *region_points* est complété de manière que tous les bâtiments fermés se voient automatiquement attribuer un *matID*, un *name* et une *area*. Les champs correspondants peuvent être vides, mais ils doivent impérativement exister. Une procédure similaire est appliquée aux contours des bâtiments initialement disponibles sous forme de polygones: ils sont automatiquement ajoutés au shapefile de polygones contenant les zones associées aux SAQM ainsi que les régions riveraines et lacustres, puis reconvertis en polygones (fig. 6.7b). Ces shapefiles finaux sont nécessaires pour la création des grilles de calcul. Dans cet exemple, le shapefile de points final est nommé *region_bebauung*. En l'absence de bâtiments, cette section peut être omise.



Conditions aux limites

Dans cet exemple, aucune condition aux limites n'est prise en compte, à l'exception de la condition aux limites interne associée au TERM, qui est abordée dans la section suivante. Les conditions aux limites telles que les débits entrants et sortants ou les ouvrages de régulation peuvent être importantes si elles exercent une influence notable, à l'échelle locale ou régionale sur les conditions d'écoulement. Comme l'embouchure de la Reuss est relativement petite par rapport à la zone lacustre, nous avons décidé de ne pas intégrer son débit entrant comme condition aux limites. Le débit sortant de la Reuss à Lucerne pourrait en revanche jouer un rôle plus important, tout comme l'ouvrage de régulation qui contrôle la Reuss à cet endroit. L'influence de ces conditions aux limites pourrait donc être prise en compte lors de

l'élaboration des scénarios. Toutefois, comme nous ne présentons ici qu'un seul scénario à titre d'exemple, aucune autre condition aux limites n'est prise en compte dans l'exemple présenté.

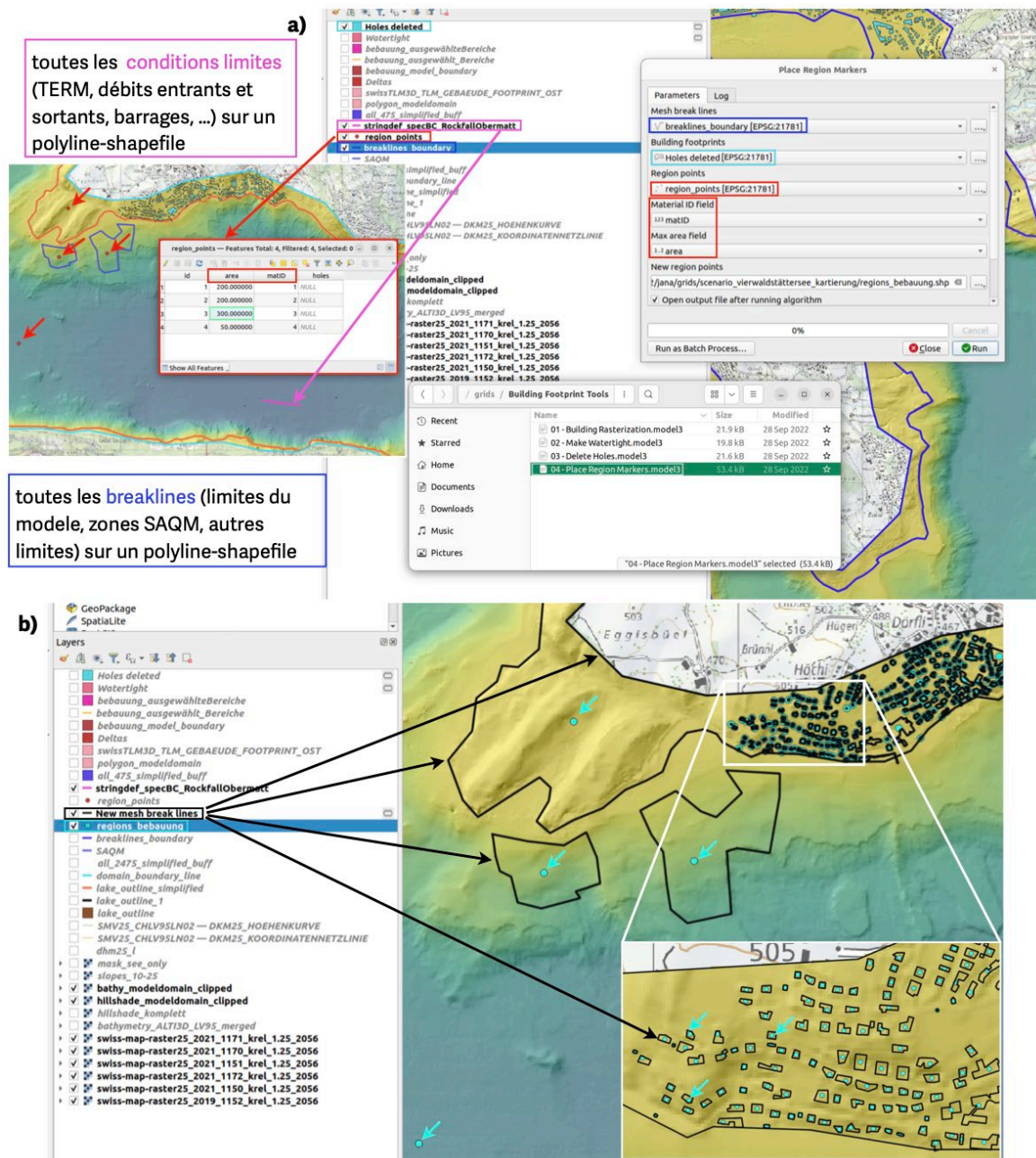


Figure 6.7 : a) montre l'état des shapefiles avant l'exécution de la dernière étape de l'outil SIG externe. Pour pouvoir exécuter cette étape, toutes les définitions des régions doivent impérativement se trouver dans un même shapefile de points (*region_points*, rouge). Les flèches rouges indiquent les points placés à l'intérieur des zones associées aux SAQM et des autres régions. En plus, toutes les limites ainsi que les zones et régions délimitées doivent se trouver dans un même shapefile de polygones (*breaklines_boundary*, en bleu foncé). Le shapefile des bâtiments généré précédemment (*holes_deleted*, turquoise) est également nécessaire. Le shapefile contenant les conditions aux limites (*stringdef_specBC_RockfallObermatt*, rose) n'est pas nécessaire pour cette opération. b) montre les fichiers obtenus après l'exécution de la dernière étape de l'outil SIG externe: Un nouveau shapefile de polygones combinant les contours de tous les bâtiments ainsi que les régions et les zones associées aux SAQM (*New mesh breaklines*, en noir) et un nouveau shapefile de points (*regions_bebauung*). Les flèches turquoise indiquent, à titre d'exemple, certains des nouveaux points générés ainsi que des points existants.

S'il existe des conditions aux limites, qu'elles soient externes ou internes, elles sont représentées dans un deuxième shapefile de polygones distinct. Un *name* et un *matID* doivent être attribués à chaque condition aux limites interne ou externe, ces informations devront également être indiquées ultérieurement lors de la simulation. Il est donc recommandé de noter les *name* et les *matID* correspondants. Si les conditions aux limites se superposent avec les limites du modèle, il convient d'utiliser la fonction de *snapping* pour s'assurer que les lignes coïncident exactement. Si une condition aux limites ne coïncide pas avec une limite déjà existante, une limite ou une ligne (*breakline*) doit impérativement être tracée exactement au même endroit que la condition aux limites dans le shapefile polygone contenant les limites du modèle, la ligne de rive et les autres zones (dans l'exemple: *breaklines_boundary*). La fonction *snapping* doit également être utilisée afin de garantir la superposition exacte des lignes.

Lors de la création de la grille de calcul avec le plugin BASEmesh, les conditions aux limites sont désignées dans QGIS comme *string definitions*. Afin d'éviter toute confusion, il est recommandé de nommer le shapefile de polygones en conséquence.

S'il existait, dans l'exemple présenté ici, des conditions aux limites supplémentaires (p. ex. un ouvrage de régulation ou un débit entrant), elles devraient être représentées dans le Shapefile de polygones nommé *stringdef_specBC_RockfallObermatt* (fig. 6.7), dans lequel est également représentée la condition aux limites interne associée au TERM (voir section suivante).

Condition aux limites interne associée au TERM

Dans un premier temps, l'utilisateur/utilisatrice doit réfléchir à quelle distance dans le lac la condition aux limites interne, à partir de laquelle le tsunami est généré, doit être déplacée. Cela dépend de la profondeur d'eau de référence h_{ref} , qui doit être suffisamment grande pour que les équations en eau peu profonde soient remplies. Rappelons cette condition: la profondeur d'eau de référence doit être environ 10 fois supérieure à l'amplitude de la vague (= hauteur de la vague dans le cas d'une onde solitaire). Ainsi, une profondeur d'eau de référence h_{ref} de 100 m serait tout juste suffisante pour un tsunami d'une hauteur de 10 m. Afin de garantir que les conditions de validité des équations des eaux peu profondes soient respectées, nous recommandons dans ce manuel d'utiliser une profondeur d'eau de référence d'au moins 150 m. h_{ref} ne devrait toutefois pas être déterminée uniquement en fonction des conditions de validité des équations en eau peu profonde, mais également en fonction de la bathymétrie du lac. Il est recommandé de choisir comme profondeur d'eau de référence une valeur correspondant à une profondeur située non pas sur une pente sous-lacustre, mais dans une zone relativement plane du fond du lac, aussi proche que possible de la rive à l'endroit où le TERM se produit, tout en respectant la condition mentionnée ci-dessus (fig. 6.8).

Une fois un emplacement approprié choisi, une entité polygone peut être tracée soit dans un nouveau shapefile, soit dans un shapefile de polygone existant contenant les conditions aux limites. Un *matID* et un *name* doivent être attribués à la polygone. Le *name* doit être noté, car il sera nécessaire lors de la simulation. La profondeur d'eau de référence est également utilisée lors de la simulation ainsi que pour le calcul du paramètre du produit d'impulsion (6.2.1) et doit donc elle aussi être notée. Pour chaque TERM, une ligne (*breakline*) doit impérativement être tracée exactement au même endroit que la condition aux limites associée au TERM dans le shapefile de polygones contenant les limites du modèle, la ligne de rive et les autres zones.

Dans cet exemple, la profondeur d'eau de référence est de 146 m, sur la base des valeurs de Fuchs et Boes (2010). Si cette valeur par défaut n'existait pas, la démarche suivante pourrait être appliquée :

La profondeur d'eau de référence peut être estimée à partir de l'altitude du niveau du lac/de la ligne de rive, soit 433 m, et de la dernière courbe de niveau indiquée dans le lac, soit 290 m ($433 \text{ m} - 290 \text{ m} = 143 \text{ m}$). La condition aux limites associée au TERM a été placée suffisamment loin dans le lac pour se trouver à une certaine distance de la pente sous-lacustre et dans une zone relativement plane. Il s'agit d'une condition essentielle pour la simulation ultérieure. La condition aux limites associée au TERM ne se trouve donc pas exactement sur la courbe de niveau de 290 m ; la profondeur d'eau de référence est par conséquent légèrement supérieure à 143 m, ce qui concorde avec la valeur de 146 m indiquée dans la littérature. En outre, cette profondeur de référence est supérieure à la profondeur théorique de 100 m indiquée ici pour satisfaire aux conditions de validité des équations en eau peu profondes et se rapproche de la valeur recommandée de 150 m. L'emplacement de la condition aux limites associé au TERM est donc approprié à tous égards.

Comme aucune autre condition aux limites n'est définie dans cet exemple, nous créons un nouveau shapefile de polygones nommé *stringdef_specBC_RockfallObermatt* (fig. 6.8), dans lequel nous traçons la condition aux limites. La longueur de cette condition aux limites est approximativement adaptée à la largeur du TERM potentiel. Une ligne est également tracée exactement au même endroit dans le shapefile de polygones *breaklines_boundary*.

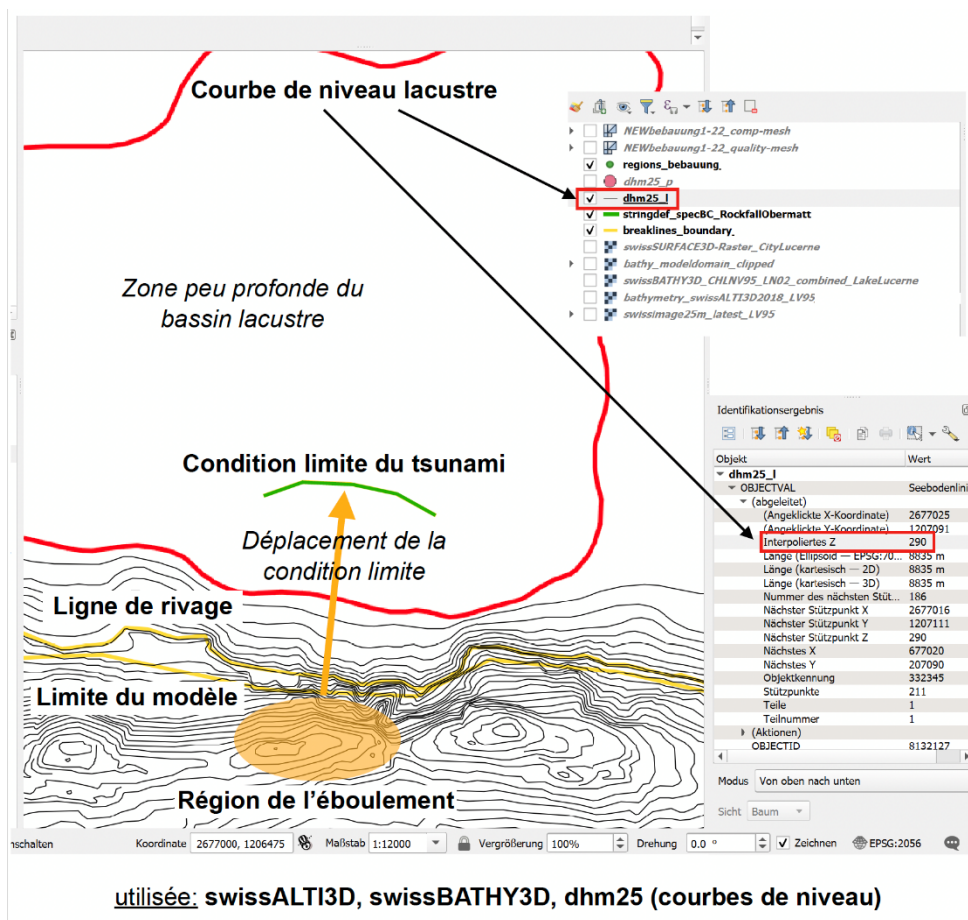


Figure 6.8: La figure montre, à titre d'exemple, quels jeux de données peuvent être utilisés pour déterminer la profondeur d'eau de référence et un emplacement approprié pour la condition aux limites du tsunami. La condition aux limites doit être située dans une zone relativement plane présentant une profondeur d'eau de référence suffisamment grande.

Génération des grilles de calcul

Le shapefile contenant les conditions aux limites (*stringdef_specBC_RockfallObermatt*), le shapefile contenant les limites et les zones associées aux SAQM (*breaklines_boundary*) ainsi que le shapefile de points contenant la définition de toutes les régions (*regions_bebauung*) sont maintenant utilisés pour créer le *Quality Mesh*. Le plugin *BASEmesh* disponible dans QGIS est utilisé à cette fin. Certains paramètres doivent notamment être définis lors de la création du *Quality Mesh* (fig. 6.9) :

- Break lines: le shapefile contenant les lignes de rive définies précédemment, la limite du modèle et les zones associées aux SAQM (*breaklines_boundary*) est sélectionné ici
- Regions: le shapefile de points créé précédemment et contenant les régions définies (*regions_bebauung*) doit être sélectionné ici. Les champs *matID* et *Maximum area field, name* et *hole* doivent également être sélectionnés (*hole* lorsque les bâtiments sont pris en compte ou que certaines régions sont omises).
- String definitions: Si une condition aux limites spécifique, p. ex. un débit entrant ou sortant, doit être indiquée, elle doit être sélectionnée ici (*stringdef_specBC_RockfallObermatt*).
- Output: Le *Quality mesh* est enregistré ici.

Pour obtenir la grille de calcul finale (*Computational Mesh*), nécessaire à la simulation avec BASEMENT, les valeurs d'altitude provenant d'un modèle altimétrique sont attribuées au *Quality Mesh* qui vient d'être créé (fig. 6.9). Le modèle altimétrique numérique peut être disponible soit sous forme de raster (p.ex. TIF) ou soit sous forme de TIN. Cette étape est également réalisée à l'aide du plugin *BASEmesh*.

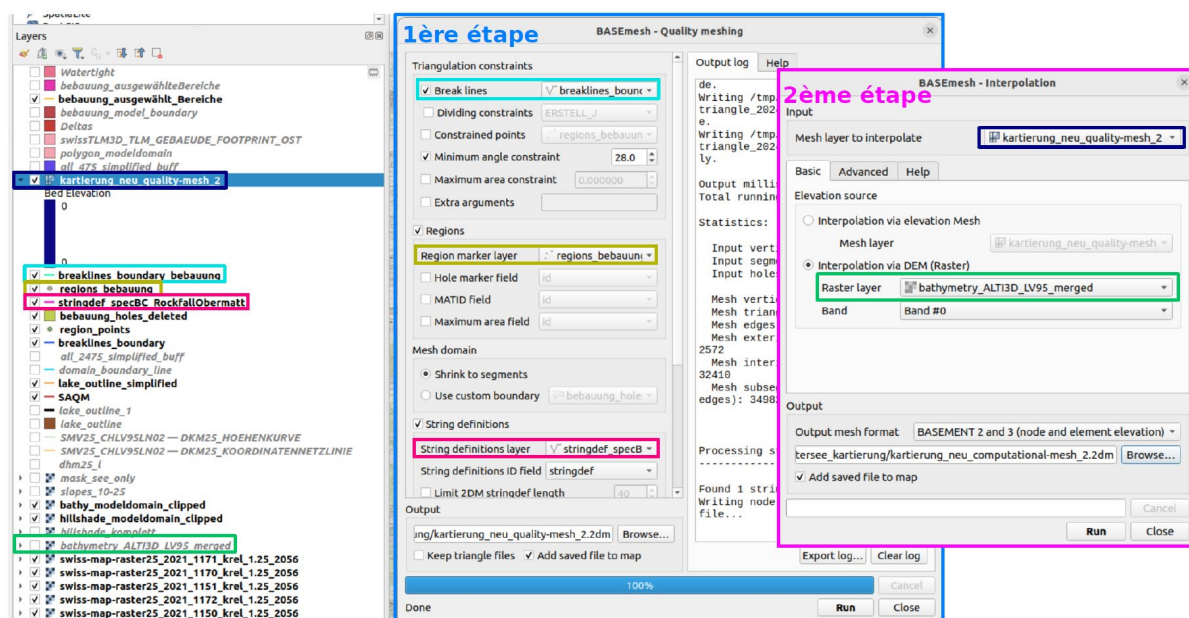


Figure 6.9 : La figure montre les shapefiles nécessaires pour créer, dans un premier temps, le *Quality Mesh*, puis le *Computational Mesh* (grille de calcul finale). Le plugin *BASEmesh* est nécessaire pour ces étapes. La création du *Quality Mesh* nécessite les trois shapefiles contenant les définitions des régions, les conditions aux limites ainsi que les limites et les zones associées aux SAQM. Pour créer le *Computational Mesh*, le *Quality Mesh* préalablement généré ainsi qu'un modèle altimétrique de la région sont ensuite utilisés.

A retenir !

Les différentes entités, les shapefiles correspondants ainsi que, entre parenthèses, leur désignation dans le *Quality Meshing* sont indiqués ci-dessous:

- Entité polyligne : limite du modèle, ligne de rive, limites des régions
breaklines_boundary.shp (Breaklines)
- Entité polyligne : conditions aux limites, condition aux limites du tsunami associée au TERM
stringdef_specBC_RockfallObermatt.shp (String definitions layer)
- Entité ponctuelle : définitions des régions avec des propriétés spécifiques
regions_bebauung.shp (Region marker layer)

6.3.2 Simulation

Cette section décrit comment configurer la simulation à l'aide de l'interface utilisateur graphique (GUI) de BASEMENT. Pour plus de détails sur l'utilisation de BASEMENT, nous renvoyons au [manuel d'utilisation](#). Tout d'abord, le fichier de configuration doit être créé et validé. Il est important que les chemins d'accès aux séries temporelles et à la grille de calcul soient corrects, de même que les chemins d'accès aux fichiers exécutables de BASEMENT. La grille de calcul est chargée dans *mesh_file*.

Une condition aux limites interne distincte est utilisée pour chaque TERM: BOUNDARY, INTERNAL dans la partie HYDRAULICS du fichier de configuration. Pour cette condition aux limites interne, le type *zqhydrograph_internal* doit être sélectionné. Il faut en outre renseigner le champ *name* ainsi que les chemins d'accès aux deux séries temporelles créées pour la forme d'onde et le débit. Il est important que la condition aux limites associée au TERM, définie comme *String définition* lors de la préparation de la simulation dans le SIG et à laquelle un attribut *name* a été attribué, porte le même nom dans le bloc de condition aux limites (*string_name*) et dans le bloc *STRINGDEF (name)* du fichier de configuration. Dans notre exemple, la condition aux limites associée au TERM est nommée « BC » (fig. 6.10).

Il n'est pas nécessaire d'utiliser toutes les conditions aux limites associés au TERM qui ont été définies dans le SIG. Seules les conditions aux limites associées au TERM indiquées dans le fichier de configuration sont prises en compte lors de la simulation. Différents scénarios peuvent ainsi être simulés avec la même grille de calcul.

D'autres conditions aux limites, p. ex. les ouvrages de régulation, les cours d'eau se jetant dans le lac ou des ouvrages de régulation/digues/barrages doivent également être définies. Une liste complète est disponible dans l'interface graphique de BASEMENT-GUI (INTERNAL, STANDARD, LINKED BOUNDARY). Les attributs nécessaires à chaque type de condition aux limites sont indiqués sous les différentes options. Dans cet exemple, aucune autre condition aux limites n'est définie.

TERM Setup

Define Scenario Parameters

Parameter	Value
SETUP	
BASEHPC	
BASEPLANE_2D	
GEOMETRY	
REGIONDEF	
[0]	
index	
[0]	1
name	"lake"
[1]	
index	
[0]	2
name	"ufer"
mesh_file	"ObermattRockfall_internalBC_comp-mesh.2dm"
STRINGDEF	
[0]	
name	"BC"
upstream_direction	"right"
HYDRAULICS	
FLOOD	
FRICTION	
INITIAL	
regions	
[0]	
[1]	
type	"region_defined"
PARAMETER	
BOUNDARY	
INTERNAL	
[0]	
name	"BC"
string_name	"BC"
type	"zqhydrograph_internal"
wse_file	"2waves_t-A_href146_433wse.dat"
spec_discharge_file	"2waves_t-q_href146_433wse.dat"
input_duration	225.0
PHYSICAL_PROPERTIES	
simulation_name	"LakeLucerne_TERM_Obermatt"

Sous BOUNDARY, sélectionner INTERNAL, puis choisir `zqhydrograph_internal` comme type. Les chemins d'accès aux fichiers contenant la forme d'onde et le débit doivent être indiqués dans `wse_file` et `spec_discharge_file`. La durée de `input_duration` (en secondes) doit correspondre à celle des fichiers de débit (`spec_discharge_file`) et d'amplitude (`wse_file`) afin que les ondes soient lues dans leur intégralité.

SAQM Setup

Define Scenario Parameters

Parameter	Value	Validation
SETUP		
BASEHPC		
BASEPLANE_2D		
GEOMETRY		
REGIONDEF		
[0]		
index		
name	"See"	
[1]		
index		
name	"Ufer"	
[2]		
index		
name	"SAQM1"	
[3]		
index		
name	"SAQM2"	
mesh_file	"bebauung1-22_comp-mesh.2dm"	
HYDRAULICS		
FLOOD		
FRICTION		
INITIAL		
regions		
[0]		
[1]		
[2]		
region_name	"SAQM1"	
u	0.0	
v	0.0	
wse	433.6	
[3]		
region_name	"SAQM2"	
u	0.0	
v	0.0	
wse	433.6	
type	"region_defined"	
PARAMETER		
MASSMOVEMENT		
regions		
[0]		
region_name	"SAQM1"	
thickness	3.8	
[1]		
region_name	"SAQM2"	
thickness	3.8	
PHYSICAL_PROPERTIES		
simulation_name	"LakeLucerne_bebauung-part1-22"	

Les `region_name` et `name` des régions concernées par les SAQM (ainsi que des autres régions, comme la région lacustre) doivent correspondre dans les blocs **MASSMOVEMENT**, **INITIAL**, etc.

Figure 6.10: Extrait de l'interface graphique de BASEMENT montrant les sections spécifiques à la génération de tsunamis. Pour ajouter un TERM, il faut sélectionner BOUNDARY dans le bloc HYDRAULICS, puis INTERNAL. Les chemins d'accès aux deux fichiers texte contenant la forme d'onde et le débit doivent être indiqués, ainsi que type `zqhydrograph_internal`. `string_name` doit correspondre à `name` dans le bloc STRINGDEF, dans lequel toutes les conditions aux limites sont répertoriées. Pour les mouvements de masse subaquatiques, un bloc MASSMOVEMENT est ajouté sous BASEPLANE_2D. Ici aussi, il faut veiller à ce que le `name` du bloc REGIONSDDEF corresponde au `region_name` dans les blocs INITIAL et MASSMOVEMENT. Pour chaque SAQM, l'épaisseur moyenne associée au SAQM doit être indiquée dans le bloc MASSMOVEMENT.

Les SAQM sont toujours définis dans le bloc MASSMOVEMENT. L'épaisseur moyenne et le `matID` des SAQM cartographiés doivent être indiqués dans ce bloc (figure 6.9). Ici aussi, il faut veiller à ce que `name` dans le bloc REGIONSDDEF corresponde à `region_name` dans les blocs INITIAL et MASSMOVEMENT. Dans notre exemple, l'épaisseur moyenne de chacun des SAQM est de 3,8 m (d'après Strupler et al. (2020a)) et les deux SAQM sont utilisés à titre d'exemple. Il convient toutefois de noter que l'épaisseur des sédiments présente de fortes incertitudes. Il appartient donc aux spécialistes de décider, le cas échéant, s'il convient d'utiliser plusieurs valeurs d'épaisseur des sédiments dans les

simulations. De manière générale, seules les zones indiquées dans le fichier de configuration sont prises en compte pour la simulation; toutes les autres sont ignorées.

Il est ainsi possible de simuler, sans effort supplémentaire important, plusieurs scénarios comportant différents SAQM, éventuellement combinés à différents TERM (voir élaboration des scénarios), avec une même grille de calcul.

Lorsque le fichier de configuration est entièrement renseigné, la première étape de la simulation est exécutée en cliquant sur **Write**. La validation du fichier de configuration peut prendre un certain temps selon la taille de la grille de calcul.

Après la validation de la configuration du modèle, l'étape suivante consiste à exécuter la simulation proprement dite. Des paramètres de sortie peuvent, si nécessaire, être ajoutés au fichier de simulation via l'interface graphique (fig. 6.11). Des paramètres tels que *water_depth* et *flow_velocity* sont particulièrement importants, car ils sont nécessaires pour l'évaluation des résultats, par exemple pour le calcul de l'amplitude des vagues et de leur temps d'arrivée. La durée de la simulation est également définie à cette étape. Le calcul de la propagation des ondes avec BASEMENT est ensuite lancé dans l'interface graphique en cliquant sur **Run**. Il est possible de choisir si le calcul doit être effectué à l'aide de GPU, de CPU ou d'une combinaison des deux. Selon la taille de la grille ainsi que le type et le nombre de cœurs de calcul utilisés, la simulation peut durer de plusieurs heures à plusieurs jours. Une fois la simulation terminée, le fichier de résultats est formaté lors d'une troisième étape.

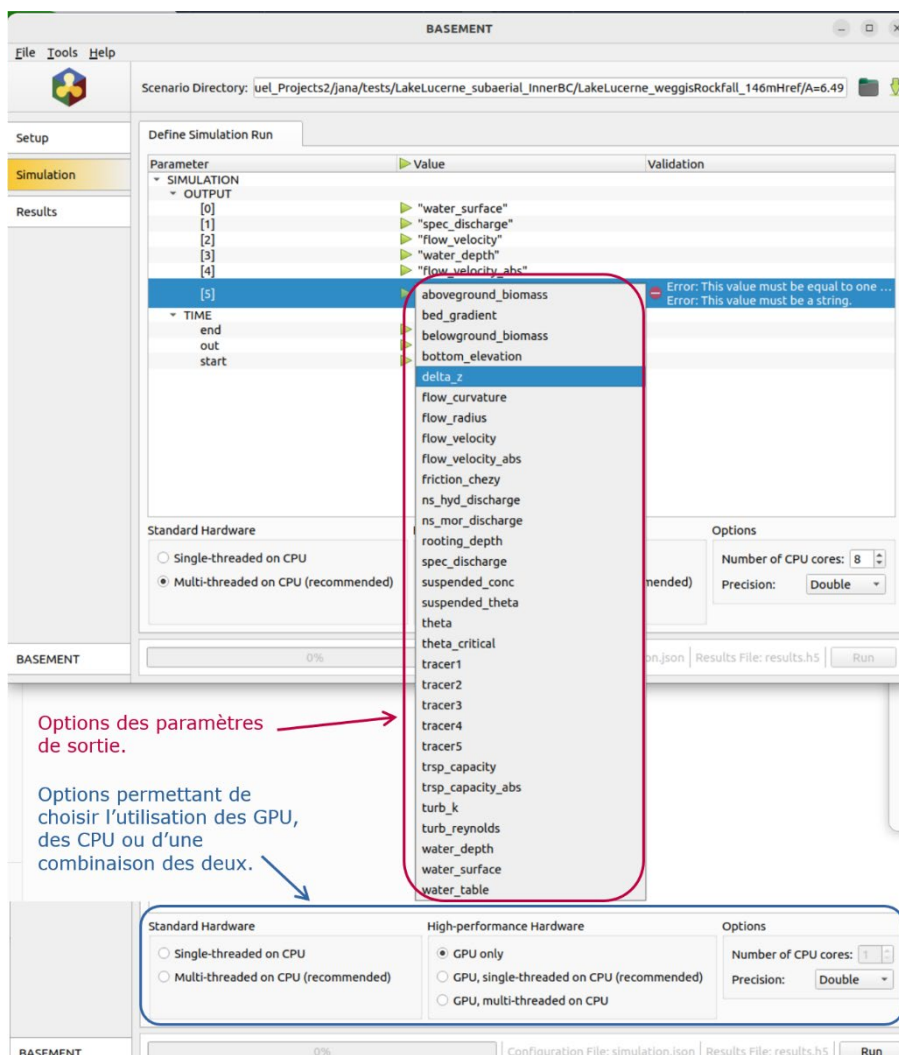


Figure 6.11 : La figure montre les options disponibles dans le fichier de simulation. Les paramètres de sortie ainsi que le matériel de calcul utilisé peuvent être sélectionnés. Cela s'applique aussi bien aux TERM et qu'aux SAQM.

Les résultats du calcul sont alors disponibles au format .xdmf et peuvent être ouverts dans un logiciel approprié, p. ex. un logiciel SIG ou ParaView, afin d'être visualisés.

6.3.3 Évaluation

Cette section explique comment générer des séries temporelles de différents paramètres liés aux tsunamis en des points quelconques de la grille et comment créer des cartes d'intensité. Comme l'évaluation est indépendante du type de mécanisme de déclenchement nous montrons, à titre d'exemple, la démarche à partir d'un SAQM deltaïque. Les deux scripts Python *BMv3GaugeExtract.py* et *CalcPercentiles.py* sont inclus dans le package BASEMENT.

Séries temporelles de paramètres liés aux tsunamis

Le script Python *BMv4GaugeExtract.py* permet d'extraire l'évolution temporelle des paramètres souhaités en n'importe quel point de la grille, c'est à dire à la surface du lac et à terre. Ces paramètres peuvent ensuite être visualisés sous forme de séries temporelles dans un logiciel de votre choix. Les coordonnées des points de mesure (x, y) doivent être enregistrées dans un fichier séparé (*gauge_locations.csv*), situé dans le même dossier que le script Python. Les coordonnées x et y doivent être séparées par un espace et chaque point de mesure doit occuper une nouvelle ligne. Les séries temporelles extraites des paramètres liés aux tsunamis sont enregistrées séparément pour chaque point de mesure dans un fichier .csv, par exemple "BM_gauge_[numéro de gauge].csv".

Création de cartes d'intensité

Pour une représentation simple sous forme de cartes, il est possible de sélectionner un intervalle de temps souhaité pour l'inondation, comme par exemple le scénario maximal, et exporté sous forme d'une couche raster individuelle, par exemple au format GeoTIFF (.tif). Pour extraire du fichier de résultats (*results.xdmf*) les percentiles souhaités des paramètres liés aux tsunamis, il faut adapter la section *User Input* du script Python *CalcPercentiles.py* (chemins d'accès, nombre de simulations, percentiles souhaités, etc.). Le script *CalcPercentiles.py* est ensuite exécuté afin d'obtenir les résultats correspondant aux paramètres souhaités.

Le fichier *percentiles.h5* ainsi obtenu peut être chargé directement dans QGIS. Pour cela, il faut d'abord charger *final_mesh.2dm* dans QGIS, ouvrir les Propriétés de cette couche et cliquer sur le symbole vert « + ». Le fichier *results.xdmf* est ensuite sélectionné, ce qui permet de charger les jeux de données supplémentaires (*Datasets successfully added to the mesh layer*).

Attention : selon la version de QGIS utilisée, l'en-tête du fichier *results.xdmf* doit être modifié comme suit :

```
<?xml version="1.0" ?>
<!DOCTYPE Xdmf SYSTEM "Xdmf.dtd" []>
<Xdmf Version="2.0">
```

La commande *Rasterize Mesh Dataset* permet ensuite de rasteriser dans QGIS la couche souhaitée et de l'enregistrer au format Géotiff. Dans *Dataset groups*, il faut sélectionner le jeu de données souhaité, par exemple la médiane de la profondeur d'écoulement. Afin de ne pas prendre en compte les valeurs situées à l'intérieur du lac, celles-ci sont exclues à l'aide d'un masque inversé. On obtient ainsi un fichier GeoTIFF contenant les valeurs raster d'intérêt. La figure 6.12 présente, à titre d'exemple, les 5e,

50e et 95e percentiles de la profondeur d'écoulement. Sur les cartes d'intensité, les profondeurs d'écoulement peuvent être classées de manière analogue aux classes d'intensité utilisées pour les inondations : faible ($< 0,5$ m), moyenne ($0,5-2$ m) et forte (> 2 m) ([document OFEV](#)).

Épaisseur moyenne : 10

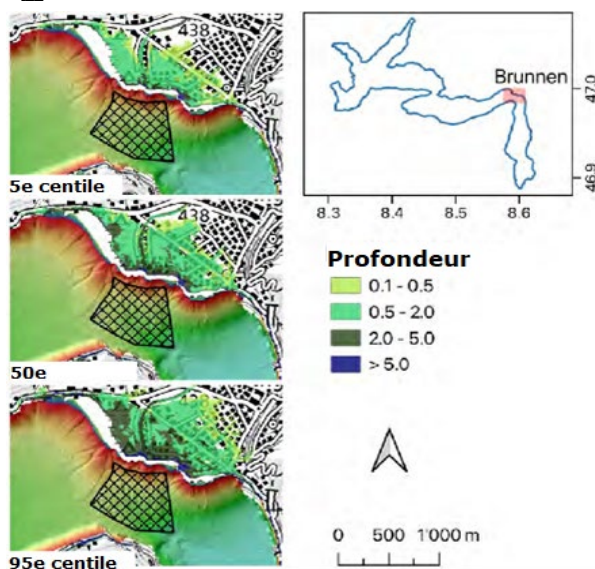


Figure 6.12 : 5e, 50e, 95e percentiles de la profondeur d'écoulement attendue pour un SAQM deltaïque.

Annexe A : Base de données

La [base de données SAQM](#) contient les informations résumées dans ce tableau et renvoie aux sources de données correspondantes.

De plus, des Shapefiles contenant des informations sur les deltas peuvent être téléchargés à partir de la [base de données des deltas](#).

Index	Lac	CPT	Long cores >2m	Sismique réflexion (3.5 kHz)	Bathymétrie haute résolution (Swisstopo)	Publié par
1	Léman		✓	✓	✓	Kremer 2014
2	Bodensee		✓	✓	✓	Wessels et al., 2015; Schwestermann, 2016; Schaller et al., 2022
3	Laggo Maggiore				✓	
4	Lac de Neuchatel		✓	✓	✓	Reusch et al., 2016; Reusch 2016
5	Vierwaldstättersee	✓	✓	✓	✓	Schnellmann, 2006; Hilbe, 2013
6	Zürichsee	✓	✓	✓	✓	Strasser, 2013; Strupler, 2018
7	Lago di Lugano		✓	✓*		Niessen, 1987
8	Bielersee		✓	✓ (-)	✓	Alice Jeannet 2012; Dubois et al., 2021
9	Thunersee		✓	✓	✓	Wirth et al., 2011; Kremer et al., 2022
10	Zugersee			✓	✓	Kuenz, 2013
11	Brienzersee		✓	✓	✓	Girardclos et al., 2007
12	Walensee			✓	✓	Affentranger, 2023, Zimmermann 2008
13	Lac de Morat		✓	✓ (-)	✓	Haas et al., 2020
14	Sempachersee			✓	✓	UniBE Feldkurs, 2024
15	Hallwilersee				✓	
16	Lac de Joux			✓	✓	R. Meier, 2020.
17	Greifensee		✓			On going Master Thesis in the group of Hendrik Vogel
18	Sarnensee			✓ (-)	✓	Monecke et al., 2004
19	Aegerisee			✓	✓	Müller, 2007; Hofmann, 2015
20	Baldeggersee		✓	✓		Monecke et al., 2004
21	Lej da Segl			✓	✓	Bellwald et al., 2024; Nigg et al., 2021; Blass et al., 2006
22	Lej da Silvaplana		✓	✓	✓	Bellwald et al., 2024; Blass et al., 2006
23	Kloentalersee			✓		Glur 2013
24	Pfäeffikersee					

25	Lauerzersee	✓	✓ (-)		Bussmann and Anselmetti, 2010
26	Lungernsee	✓	✓	✓	Monecke 2004; Pfaffen, , 2007; MSc thesis Walker, in Bearbeitung
27	Lago di Poschiavo		✓		Wirth, 2013
28	Oeschinensee	✓	✓		Knapp et al., 2018

Tabelle A1: Aperçu des données disponibles pour chaque lac répertorié. Les références aux jeux de données correspondants figurent à la fin du tableau. Les jeux de données bathymétriques à haute résolution peuvent être obtenus directement sur le site web de Swisstopo ([SwissBATHY3D](#)). Vous y trouverez également des informations détaillées sur les différents jeux de données (couverture des données, profondeur minimale, résolution au fond). Pour les données de sismiques réflexions: ü: les données ont été enregistrées, ü (-): les données ont été enregistrées mais le signal sismique n'a pas pénétré le sol, il n'y a donc pas de données interprétables, * probablement pas d'images numériques et haute résolution disponibles. Les informations présentées reflètent l'état des connaissances à la fin de l'année 2024. De nouveaux modèles bathymétriques et d'autres jeux de données étant régulièrement publiés, il est recommandé de vérifier les données disponibles les plus récentes. Pour les données bathymétriques à haute résolution, consulter notamment le produit swissBATHY3D de swisstopo

Annexe B Exemple d'approche de simulation probabiliste

Dans le cas d'une simulation probabiliste, les incertitudes sont prises en compte lors du calcul de P . Pour simplifier, nous supposons dans cet exemple d'application que l'écart-type correspond à 20% de la valeur de chaque paramètre. Des combinaisons de différentes variables d'entrée sont ensuite générées à l'aide de l'échantillonnage par hypercube latin (Latin Hypercube Sampling, LHS; cf. 2.4.1). Pour rappel, la plage de variation de chacun des k paramètres est divisée en n intervalles (ici : $n = 10$) de probabilité égale. Une valeur aléatoire est ensuite tirée de chacun de ces intervalles. Les n valeurs ainsi échantillonnées pour chaque paramètre sont finalement combinées aléatoirement entre elles, ce qui donne $n * k$ valeurs de paramètres, combiner pour n jeux de paramètres (Minasny and McBratney, 2006). Dans l'exemple présenté, nous supposons que les $k = 7$ paramètres d'entrée suivent tous une loi log-normale et sont indépendants les uns des autres. Un extrait présentant les 10 premières combinaisons de paramètres issues de l'échantillonnage LHS est présenté dans le tableau B1.

	Vitesse d'immersion	Profondeur d'eau de référence h_{ref}	Angle d'impact α	Volume V_B	Épaisseur S	Largeur B	Densité ρ_s
1	27.57	155.04	27.63	4276.98	2.97	59.47	2796.04
2	32.00	184.07	25.64	6100.28	3.64	33.11	2072.14
3	23.65	130.05	33.59	5843.05	4.34	42.52	1765.90
4	34.23	179.20	23.42	3320.25	4.67	38.42	1716.58
5	43.55	157.11	35.05	5300.15	5.70	39.75	1952.67
6	34.73	125.60	42.45	6219.29	4.97	50.30	2018.21
7	29.91	144.47	22.48	4420.82	4.43	51.30	1881.21
8	27.07	127.34	25.38	4996.18	4.24	50.88	1608.99
9	24.38	153.21	38.98	4859.02	4.30	54.65	1496.14
10	29.19	165.52	31.72	5740.35	4.02	52.64	1673.80

Tableau B1 : Extrait des combinaisons de paramètres obtenus par échantillonnage LHS.

En introduisant les 5e, 50e et 95e percentiles dans les équations 3.1, 3.2 et 3.3, on obtient les valeurs suivantes pour a_1 (2e colonne) et a_2 (3e colonne) (tab. B2). A partir de ces percentiles, ou d'autres, selon l'objectif de l'étude, le calcul des données d'entrée de l'onde peut être poursuivi. Il est également possible d'utiliser les valeurs déterminées de manière déterministe, comme cela est fait dans le présent exemple d'application.

Centile	a_1	a_2
5e	2.02	5.77
50e	2.61	6.80
95e	3.71	8.00

Tableau B2 : 5e, 50e et 95e percentiles des valeurs de a_1 et a_2 calculées à l'aide de l'échantillonnage LHS (arrondies à deux décimales).

8 Bibliographie

G. Barros and H. Sievers. El maremoto del 22 de mayo de 1960 en las costas de chile. Departamento de Navegación e Hidrografía de la Armada, Republica de Chile, (3012), 1961.

A. J. Bechle, C. H. Wu, D. A. Kristovich, E. J. Anderson, D. J. Schwab, and A. B. Rabinovich. Meteotsunamis in the laurentian great lakes. Scientific reports, 6(1):37832, 2016.

D. Beigt, G. Villarosa, E. A. Gómez, and C. Manzoni. Subaqueous landslides at the distal basin of lago nahuel huapi (argentina): Towards a tsunami hazard evaluation in northern patagonian lakes. Geomorphology, 268:197–206, 2016.

E. Chapron, D. Ariztegui, S. Mulsow, G. Villarosa, M. Pino, V. Outes, E. Juvignié, and E. Crivelli. Impact of the 1960 major subduction earthquake in northern patagonia (chile, argentina). Quaternary International, 158(1):58–71, 2006.

J. Darbyshire and S. Ishiguro. Tsunamis. Nature, 180(4577):150–150, 1957.

P. G. Drazin and R. S. Johnson. Solitons: an introduction, volume 2. Cambridge university press, 1989.

F. Evers, V. Heller, H. Fuchs, W. Hager, and R. Boes. Landslide-generated Impulse Waves in Reservoirs: Basics and Computation. VAW-Mitteilung, volume 254. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, 2019a.

F. M. Evers, W. H. Hager, and R. M. Boes. Spatial Impulse Wave Generation and Propagation. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 145(3):1–15, 2019b. doi: 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000514.

H. Fuchs and R. Boes. Berechnung felsrutschinduzierter impulswellen im vierwaldstättersee. *Wasser Energie Luft*, 102(3):215 – 221, 2010. ISSN 0377-905X. doi: 10.3929/ethz-b-000256996.

V. H. Garduño-Monroy, D. C. Soria-Caballero, I. Israde-Alcántara, V. M. Hernández Madrigal, A. Rodríguez-Ramírez, M. Ostroumov, M. Á. Rodríguez-Pascua, A. Chacon-Torres, and J. C. Mora-Chaparro. Evidence of tsunami events in the paleolimnological record of lake pátzcuaro, michoacán, mexico. *Geofísica internacional*, 50(2):147–161, 2011.

S. Girardclos, O. T. Schmidt, M. Sturm, D. Ariztegui, A. Pugin, and F. S. Anselmetti. The 1996 ad delta collapse and large turbidite in lake Brienz. *Marine Geology*, 241(1-4):137–154, 2007.

J. Goff, Y. Ebina, K. Goto, and J. Terry. Defining tsunamis: Yoda strikes back? *Earth-science reviews*, 159:271–274, 2016.

D. G. Goring and F. Raichlen. Tsunamis—the propagation of long waves onto a shelf. 1978.

J. L. Hammack. A note on tsunamis: their generation and propagation in an ocean of uniform depth. *Journal of Fluid Mechanics*, 60(4):769–799, 1973.

J. L. Hammack Jr and F. Raichlen. Tsunami generation and propagation. In *Coastal Engineering* 1972, pages 2589–2608. 1972.

C. B. Harbitz, F. Løvholt, and H. Bungum. Submarine landslide tsunamis: how extreme and how likely? *Natural Hazards*, 72:1341–1374, 2014.

V. Heller. Landslide generated impulse waves: Prediction of near field characteristics. PhD thesis, ETH Zurich, 2007.

V. Heller and W. Hager. Wave types of landslide generated impulse waves. *Ocean Engineering*, 38(4):630–640, 2011. doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2010.12.010>.

V. Heller and W. H. Hager. Impulse product parameter in landslide generated impulse waves. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 136(3):145–155, 2010.

V. Heller and W. H. Hager. A universal parameter to predict subaerial landslide tsunamis? *Journal of Marine Science and Engineering*, 2(2):400–412, 2014.

V. Heller and G. Ruffini. A critical review about generic subaerial landslide-tsunami experiments and options for a needed step change. *Earth-Science Reviews*, page 104459, 2023.

- V. Heller, W. H. Hager, and H.-E. Minor. Landslide generated impulse waves in reservoirs: Basics and computation, volume 211. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, 2009.
- M. Hilbe and F. S. Anselmetti. Signatures of slope failures and river-delta collapses in a perialpine lake (lake lucerne, switzerland). *Sedimentology*, 61(7):1883–1907, 2014.
- A. Huber and A. Chervet. Mögliche Auswirkungen des Absturzes einer Felsmasse in den Klöntalersee beim Bärentritt - Bericht über die Abschätzung der Schwallwellenhöhen. 1988.
- K. Kremer, G. Simpson, and S. Girardclos. Giant lake geneva tsunami in ad 563. *Nature Geoscience*, 5(11):756–757, 2012.
- K. Kremer, F. S. Anselmetti, F. M. Evers, J. Goff, and V. Nigg. Freshwater (paleo)tsunamis – a review. *Earth-Science Reviews*, 212:103447, 2021. doi: 10.1016/j.earscirev.2020.103447.
- H.-Y. Lo, Y. S. Park, and P. L.-F. Liu. On the run-up and back-wash processes of single and double solitary waves — an experimental study. *Coastal Engineering*, 80:1–14, 2013. doi: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.05.001>.
- P. A. Madsen, D. R. Fuhrman, and H. A. Schäffer. On the solitary wave paradigm for tsunamis. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(C12), 2008.
- C. Melo and S. Sharma. Seismic coefficients for pseudostatic slope analysis. In 13th World conference on earthquake engineering, volume 369, page 15. Vancouver Canada, 2004.
- B. Minasny and A. McBratney. Chapter 12 latin hypercube sampling as a tool for digital soil mapping. In P. Lagacherie, A. McBratney, and M. Voltz, editors, *Digital Soil Mapping*, volume 31 of *Developments in Soil Science*, pages 153–606. Elsevier, 2006. doi: [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(06\)31012-4](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(06)31012-4).
- N. Morgenstern and V. Price. A numerical method for solving the equations of stability of general slip surfaces. *The Computer Journal*, 9(4):388–393, 1967.
- V. Nigg, P. Bacigaluppi, D. F. Vetsch, H. Vogel, K. Kremer, and F. S. Anselmetti. Shallow-water tsunami deposits: Evidence from sediment cores and numerical wave propagation of the 1601 ce lake lucerne event. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22(12):e2021GC009753, 2021.
- R. Paris, A. D. Switzer, M. Belousova, A. Belousov, B. Ontowirjo, P. L. Whelley, and M. Ulvrova. Volcanic tsunami: a review of source mechanisms, past events and hazards in southeast asia (indonesia, philippines, papua new guinea). *Natural Hazards*, 70:447–470, 2014.
- T. Parsons. *Enciclopedia historica centenaria de Bariloche*. 2002.

- N. J. Roberts, R. J. McKillop, M. S. Lawrence, J. F. Psutka, J. J. Clague, M.-A. Brideau, and B. C. Ward. Impacts of the 2007 landslide-generated tsunami in Chehalis Lake, Canada. *Landslide Science and Practice: Volume 6: Risk Assessment, Management and Mitigation*, pages 133–140, 2013.
- M. Saderra Masó. Volcanoes and seismic centers of the Philippine Archipelago, volume 3. Department of Commerce and Labor, Bureau of the Census, 1904.
- M. Saderra Masó. The Eruption of Taal Volcano: January 30, 1911. Department of the Interior, Weather Bureau, Manila, 1911.
- M. Schnellmann, F. S. Anselmetti, D. Giardini, J. A. McKenzie, and S. N. Ward. Prehistoric earthquake history revealed by lacustrine slump deposits. *Geology*, 30(12):1131–1134, 2002. doi: 10.1130/0091-7613(2002)030<1131:PEHRBL>2.0.CO;2.
- H. Segur. The Korteweg-de Vries equation and water waves. solutions of the equation. part 1. *Journal of Fluid Mechanics*, 59(4):721–736, 1973.
- A. Shynkarenko, K. Kremer, S. Stegmann, P. Bergamo, A. M. Lontsi, A. Roesner, S. Hammerschmidt, A. Kopf, and D. Fäh. Geotechnical characterization and stability analysis of subaqueous slopes in Lake Lucerne (Switzerland). *Natural Hazards*, 113(1):475–505, 2022a.
- A. Shynkarenko, K. Kremer, S. Stegmann, A. M. Lontsi, A. Roesner, S. Hammerschmidt, A. Kopf, and D. Fäh. In-situ and laboratory geotechnical investigations (CPTU, sediment coring) performed in Lake Lucerne (Switzerland) in 2018–2020. Technical report, ETH Zurich, 2022b.
- C. Siegenthaler, W. Finger, K. Kelts, and S. Wang. Earthquake and seiche deposits in Lake Lucerne, Switzerland. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 80:241–260, 1987.
- M. Strasser, M. Hilbe, and F. S. Anselmetti. Mapping basin-wide subaquatic slope failure susceptibility as a tool to assess regional seismic and tsunami hazards. *Marine Geophysical Research*, 32(1-2):331–347, 10 2011. doi: 10.1007/s11001-010-9100-2.
- M. Strupler, M. Hilbe, F. S. Anselmetti, A. J. Kopf, T. Fleischmann, and M. Strasser. Probabilistic stability evaluation and seismic triggering scenarios of submerged slopes in Lake Zurich (Switzerland). *Geo-Marine Letters*, 37(3):241–258, 2017. doi: 10.1007/s00367-017-0492-8.
- M. Strupler, L. Danciu, M. Hilbe, K. Kremer, F. S. Anselmetti, M. Strasser, and S. Wiemer. A subaqueous hazard map for earthquake-triggered landslides in Lake Zurich, Switzerland. *Natural Hazards*, 90(1):51–78, 2018. doi: 10.1007/s11069-017-3032-y.

- M. Strupler, F. S. Anselmetti, M. Hilbe, K. Kremer, and S. Wiemer. A workflow for the rapid assessment of the landslide-tsunami hazard in peri-alpine lakes. Geological Society, London, Special Publications, 500(1):81–95, 2020a. doi: 10.1144/SP500-2019-166.
- M. Strupler, P. Bacigaluppi, K. Kremer, D. Vetsch, F. S. Anselmetti, R. Boes, and S. Wiemer. Abschätzung der Gefährdung durch Tsunamis in perialpinen Seen infolge Unterwasserhangrutschungen. Wasser Energie Luft, 112(1):11–16, 2020b.
- M. Strupler, F. M. Evers, K. Kremer, C. Cauzzi, P. Bacigaluppi, D. F. Vetsch, R. M. Boes, D. Fäh, F. S. Anselmetti, and S. Wiemer. A Simplified Classification of the Relative Tsunami Potential in Swiss Perialpine Lakes Caused by Subaqueous and Subaerial Mass-Movements. Frontiers in Earth Science, 8:1–14, 2020c. doi: 10.3389/feart.2020.564783.
- M. Strupler, J. Schierjott, M. Bürgler, and D. F. Vetsch. Ansatz zur modellierung von See-Tsunamis, ausgelöst durch terrestrische Massenbewegungen. Wasser Energie Luft, 116(4):255–258, 2024
- D. Vanzo, S. Peter, L. Vonwiller, M. Bürgler, M. Weberndorfer, A. Sivilgia, D. Conde, and D. F. Vetsch. BASEMENT v3: A modular freeware for river process modelling over multiple computational backends. Environmental Modelling and Software, 143:105102, 2021. doi: 10.1016/j.envsoft.2021.105102.
- D. Vetsch, M. Bürgler, E. Gerke, S. Kammerer, D. Vanzo, and R. Boes. BASEMENT – Softwareumgebung zur numerischen Modellierung der Hydro- und Morphodynamik in Fließgewässern. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 72(7-8):281–290, 8 2020. doi: 10.1007/s00506-020-00677-6.
- S. Wiemer, L. Danciu, B. Edwards, M. Marti, D. Fäh, S. Hiemer, J. Wössner, C. Cauzzi, P. Kästli, and K. Kremer. Seismic Hazard Model 2015 for Switzerland. pages 1–163, 2016. doi: 10.12686/a2.
- H. Yeh, P. Liu, M. Briggs, and C. Synolakis. Propagation and amplification of tsunamis at coastal boundaries. Nature, 372(6504):353–355, 1994.