



Analyse et modélisation de l'arrachement et de la propagation des coulées de boues de versant

Développement de modèles pour la pratique basé sur des expérimentations et des événements historiques

Rapport final du projet SlideForce

Auteurs : Adel Albaba, Mark Günter, Niels Hollard, Dominik May, Christoph Schaller, Massimiliano Schwarz, Alessandro Stampfli, Feiko van Zadelhoff, Luuk Dorren
(BFH - Haute école des sciences agronomiques, forestières et alimentaires HAFL)

Mandateur : Office de l'environnement OFEV

Date : 11.09.2020

Versions

Version	Date	Statut	Remarques
0.1	05.06.2020	Provisoire	1ère Version soumise à l'OFEV
1.0	09.09.2020	Révisé	Version révisée sur la base des retours de l'OFEV

Remerciements

Nous remercions Bernard Loup (division Prévention des dangers, OFEV) pour le suivi du projet. Nous remercions également les cantons de Berne, Glaris, Lucerne, Nidwald, Saint-Gall, Tessin ainsi que la Principauté de Liechtenstein pour mettre à disposition des données historiques et pour leur soutien.

Citation

Albaba, A., Günter, M., Hollard, N., May, D., Schaller, C., Schwarz, M., Stampfli, A., van Zadelhoff, F., Dorren, L. Analyse et modélisation de l'arrachement et de la propagation des coulées de boues de versant. Développement de modèles pour la pratique basé sur des expérimentations et des événements historique. Rapport final du projet SlideForce. *BFH - HAFL, Zollikofen / Office fédéral de l'environnement OFEV, Berne* (2020), 151 p.

Résumé

Chaque année en Suisse, les glissements de terrain superficiels et les coulées de boue de versant sont responsables de dommages importants aux bâtiments, de fermeture d'infrastructures, d'évacuations et parfois même de décès. En 2016, l'office fédéral de l'environnement (OFEV) publie une "aide à l'exécution concernant la gestion des dangers dus aux glissement de terrain, aux chutes de pierres et aux coulées de boue" (OFEV, 2016). Cette aide préconise notamment une approche plus quantitative de l'analyse des risques gravitaires. En parallèle, le groupe de travail "Danger Naturel et Géologie" (AGN-DNG) a publié sa méthodologie améliorée pour évaluer les glissements superficiels et les coulées de boue de versant. Ce rapport conclut que, malgré le fait qu'un nombre limité de simulations de propagation aient été testées avec succès, les outils de modélisation doivent encore être améliorés.

C'est pourquoi le projet Slideforce avait pour but de proposer des modèles pour la prédiction de l'arrachement de glissement superficiel ainsi que des modèles pour la simulation des zones de propagation des coulées de boue et de faciliter l'utilisation dans la pratique. Le projet s'appuie sur l'analyse d'évènements historiques de glissements superficiels / coulées de boue documentés dans des cadastre des évènements naturels ou la base de données coulées de boue (OFEV/WSL).

Pour analyser l'influence des facteurs de disposition sur la taille et la localisation des glissements superficiels simulés nous avons utilisé des approches de rétro-analyse à une échelle de versant et à une échelle régionale. Dans le cadre de ce projet, nous avons spécifiquement analysé les effets suivants sur la modélisation des zones d'arrachement :

- la résolution du modèle de terrain
- les caractéristiques du sol
- les caractéristiques de la végétation (i.e., le renforcement du système racinaire)

Afin d'analyser les effets à l'échelle d'un versant, nous avons choisi l'évènement de glissement superficiel/coulée de boue de Bombinasco de 2014 dans la commune de Curio (TI) qui a été rétro-calculé grâce au modèle SOSlope. SOSlope est un modèle hydromécanique de stabilité de versant, dans lequel le versant étudié est discrétisé en blocs de même taille. Chaque blocs est relié aux quatre blocs adjacents par des ressorts. Pour chaque pas de temps, le modèle calcule le facteur de sécurité pour tous les blocs en comparant les forces stabilisatrices avec les forces déstabilisatrices. SOSlope a pu reproduire l'évènement de Bombinasco de 2014 avec une résolution des rasters d'entrées de 2m et une cohésion de 3,3 kPa. Les simulations avec des valeurs de cohésion plus faibles ne correspondaient pas à la réalité. Des simulations avec des valeurs de cohésion plus élevées ou avec une résolution des rasters d'entrée de 5 m ont montré que toute la pente était stable. D'autres analyses décrites dans ce rapport ont démontré la sensibilité de SOSlope à la teneur initiale en eau du sol et au renforcement des racines dans les fissures autour de la zone d'arrachement.

Afin d'étudier l'influence des facteurs de disposition à l'échelle régionale, nous avons utilisé le modèle SlideforMAP est un modèle stochastique dans lequel un équilibre de force 3D est supposé. Le modèle crée un grand nombre de glissements de terrain aléatoires avec des formes ellipsoïde et calcule le facteur de sécurité en utilisant les hypothèses standard d'équilibre limite, de pente infinie et de Mohr-Coulomb. Pour valider les modélisations de SlideforMAP, nous avons utilisé 78 glissements superficiels historiques dans trois zones d'étude : St. Antoniën (GR; année 2005), Trub (BE, année 2005) et Eriz (BE, année 2012). De plus, nous avons fait une analyse de sensibilité à l'aide de la technique de *hypercube latin sampling* qui permet d'évaluer l'influence de chaque variable individuelle sur la variable de réponse à l'aide du coefficient de corrélation des rangs de Spearman (PRCC). Au final, 800 combinaisons différentes de paramètres ont été testées par zone d'étude. Les valeurs de PRCC montrent que des estimations précises des paramètres de profondeur du sol (SD), de la cohésion (SC), de l'angle de frottement interne (Phi) et le renforcement des racines (RR) sont de la plus haute importance. SlideforMap peut être utilisé pour tester différents scénarios de précipitation (P) et cela à une échelle régionale en utilisant des données d'entrées avec une résolution de 5 à 10 m. Les résultats montrent que la prédiction dans la zone d'Eriz et de Trub fonctionne de manière très satisfaisante et moindre dans la

zone de Saint Antönien. Ceci peut être expliqué partiellement par la méthode de calcul de précision (AUC) utilisée. Un autre résultat des analyses des zones d'arrachement est une fiche technique pour la modélisation de l'arrachement à l'échelle d'un versant qui est présenté dans l'annexe A de ce rapport.

Au niveau de l'analyse de la propagation, nous avons premièrement réalisé des expériences de propagation dans le laboratoire de la BFH-HAFL avec comme but principal d'acquérir des données permettant de comprendre la relation entre les paramètres du modèle YADE (un modèle de simulation de propagation basé sur la *Discrete Element Method*) et la réalité physique observée en laboratoire. Afin d'utiliser YADE, nous avons implémenté une loi de contact Adhésive-élastoplastique pour reproduire le comportement d'un écoulement cohésif. Deuxièmement, nous avons utilisé une série d'expérimentations de terrain à l'échelle réelle qui a été réalisée entre 2008 et 2010 sur le site expérimental de Veltheim afin de tester les capacités de YADE à reproduire la hauteur d'écoulement, la vitesse et la pression d'impact. Troisièmement, nous avons créé une base de données composée de 28 événements de coulées de boue historiques bien documentés qui a également servi comme base de validation pour les simulations de YADE. Grâce aux expériences de laboratoires et les meilleures simulations des 28 événements historiques, nous avons pu classifier quatre types de coulée (TC) : TC 1 = événements très fluides avec une faible adhérence ; TC 2 = événements fluides avec une faible adhérence ; TC 3 = événements très fluides avec une forte adhérence ; TC 4 = événements fluides avec une forte adhérence. Les résultats de YADE correspondaient bien à ceux des expérimentations sur le terrain en termes de pression et de vitesse d'écoulement, tandis qu'un accord moindre était observé pour la hauteur d'écoulement.

En parallèle, nous avons développé SlideForce - un modèle physico-probabiliste de prédiction de l'écoulement des coulées de boue de versant. SlideForce est dérivé du modèle FLOW-R, il décrit la redistribution d'une masse sur un Modèle Numérique de Terrain (MNT) et a pour but de modéliser la propagation, la vitesse, la hauteur d'écoulement et la pression associée aux coulées de boues de versant. Pour chacun de 28 événements historiques nous avons testé 5760 combinaisons de valeurs de paramètre et choisi les 30 meilleures simulations pour chaque cas. Enfin, en couplant le type de coulée, définie pour chaque événement grâce aux résultats de YADE, avec les 30 meilleures simulations de SlideForce, nous avons pu définir des distributions de valeurs de paramètre pour chaque TC dans SlideForce. En utilisant les plages de valeur définies pour tous les paramètres, nous avons exécuté 500 simulations par événement historique afin de reproduire les 28 cas. Les résultats montrent que SlideForce, en comparaison avec YADE prédit systématiquement des hauteurs d'écoulement plus faible. Les vitesses et les pressions simulées ont partiellement les mêmes tendances, mais on observe une grande variabilité. La comparaison entre les enveloppes des événements historiques et les zones de propagation simulées a montré que, dans 17 cas (61%), la meilleure reproduction de l'événement historique par YADE et SlideForce représente un TC identique. De manière générale, nous concluons que les modèles YADE et SlideForce ont pu reproduire les enveloppes des 28 événements historiques de manière très encourageante.

Suite à la comparaison des enveloppes de propagation modélisées avec SlideForce et des événements historiques, nous avons conclu que les meilleurs résultats sont obtenus grâce à une troncature des résultats sous la valeur de 50% de probabilité d'atteinte produit le modèle. L'expérience de l'utilisation de SlideForce dans la pratique aidera à établir la gamme de valeurs à utiliser pour transformer la carte des probabilités d'atteinte simulée en carte de zone de propagation réaliste. Celle-ci fournira la base la plus importante à l'établissement d'une carte de danger en utilisant SlideForce.

Zusammenfassung

In der Schweiz verursachen flachgründige Rutschungen und Hangmuren jedes Jahr grosse Infrastrukturschäden, Sperrungen wichtiger Infrastruktur, Evakuierungen und manchmal auch Todesfälle. Das Bundesamt für Umwelt (BAFU) veröffentlichte in 2016 die "Vollzugshilfe für das Gefahrenmanagement von Rutschungen, Steinschlag und Hangmuren". Diese befürwortet insbesondere einen quantitativeren Ansatz bei der Analyse von Massenbewegungsgefahren. Gleichzeitig veröffentlichte die Arbeitsgruppe Geologie und Naturgefahren (AGN) ihre verbesserte Methodik zur Beurteilung von Hangmuren. Dieser Bericht kommt zum Schluss, dass trotz der Tatsache, dass einige Simulationen des Auslaufs von Hangmuren erfolgreich getestet wurden, verbesserte Werkzeuge für die Auslaufmodellierung notwendig sind.

Deshalb zielte das Slideforce-Projekt darauf ab, Modelle für die Vorhersage der Anrissgebiete von flachgründigen Rutschungen sowie Modelle für die Simulation des Auslaufs von Hangmuren zu entwickeln und deren Anwendung in der Praxis zu erleichtern. Das Projekt basiert auf der Analyse und Nachrechnung historischer Ereignisse, welche in Eigniskatastern oder in der Hangmuren-Datenbank vom BAFU/WSL dokumentiert sind.

Um den Einfluss von Dispositionsfaktoren auf die Größe und Lage der simulierten Anrisszonen von flachgründigen Rutschungen zu analysieren, haben wir sowohl Studien auf Einzelhangebene als auch auf der regionalen Ebene durchgeführt. In diesem Projekt haben wir insbesondere den Einfluss folgender Faktoren bei der Modellierung von Anrisszonen analysiert :

- die Auflösung des Geländemodells
- die Bodenmerkmale
- die Vegetationseigenschaften (d.h. Wurzelverstärkung)

Um den Einfluss auf Hangebene zu analysieren, haben wir das Hangmurenereignis in Bombinasco (in der Gemeinde Curio, TI) von 2014 ausgewählt. Dieses wurde mit dem Modell SOSlope nachgerechnet. Dies ist ein hydromechanisches Hangstabilitätsmodell in dem der untersuchten Hang mittels Rasterzellen diskretisiert wird. Jede Zelle ist durch Federn mit den vier benachbarten Zellen verbunden. Für jeden Zeitschritt berechnet das Modell den Sicherheitsfaktor für alle Zellen, indem es die stabilisierenden Kräfte mit den destabilisierenden Kräften vergleicht. SOSlope war in der Lage, das Bombinasco-Ereignis von 2014 mit Eingangsrastern mit einer Auflösung von 2 m und einer Kohäsion von 3,3 kPa zu reproduzieren. Simulationen mit niedrigeren Kohäsionswerten entsprachen nicht der Realität. Bei Simulationen mit höheren Kohäsionswerten oder mit 5 m aufgelösten Rastern blieb hingegen der ganze Hang stabil. Weitere Analysen zeigten die Sensitivität von SOSlope auf die Vorfeuchte im Boden sowie die Wurzelverstärkung rundum der Anrisszone.

Um den Einfluss der Dispositionsfaktoren auf regionaler Ebene zu untersuchen, wurde das SlideforMAP-Modell verwendet. Hierbei handelt es sich um ein stochastisches Modell in dem ein 3D Kräftegleichgewicht angenommen wird. Dieses Modell erzeugt eine große Anzahl von zufälligen, ellipsenförmigen Anrisszonen und berechnet den Sicherheitsfaktor unter Verwendung von Standardmethoden wie Grenzgleichgewicht, unendliche lange Böschung und die Mohr-Coulomb Bruchbedingung. Um SlideforMAP zu validieren, wurden 78 historische Hangmurenereignisse in drei Untersuchungsgebieten verwendet : St. Antoniën (GR, aus dem Jahr 2005), Trub (BE, aus dem Jahr 2005) und Eriz (BE, aus dem Jahr 2012). Darüber hinaus wurde eine Sensitivitätsanalyse mit der Latin Hypercube Sampling-Technik durchgeführt, die den Einfluss jeder einzelnen Variable auf die vorhergesagten Anrisszonen mit Hilfe des Spearman'schen Rang-Korrelationskoeffizienten (PRCC) bewertet. Am Ende wurden pro Studiengebiet 800 verschiedene Kombinationen von Parametern getestet. Die PRCC-Werte zeigen, dass genaue Schätzungen der Bodentiefe (SD), der Kohäsion (SC), des internen Reibungswinkel (Phi) sowie die Wurzelverstärkung (RR) von größter Bedeutung sind. Die Resultate bestätigen, dass SlideforMap verwendet werden kann, um verschiedene Niederschlagszenarien (P) auf einer regionalen Skala mit Eingangsrastern mit einer Auflösung von 5 bis 10 m durchzurechnen. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Vorhersage im Gebiet von Eriz und Trub sehr zufriedenstellend war und im Gebiet von St. Antoniën etwas weniger gut

funktioniert hat. Dies lässt sich zum Teil durch die verwendete Methode zur Berechnung der Präzision der Modellierungsergebnisse (die AUC-Methode) erklären. Ein weiteres Ergebnis der Analyse der Modellierung von Anrisszonen ist eine Praxisempfehlung welche im Anhang A dieses Berichts vorgestellt wird.

Im Bereich der Analyse des Hangmuren-Auslaufs, führten wir erstens Hangmuren-Auslauf-Experimente im Labor der BFH-HAFL durch. Dabei war das Ziel, Daten zu gewinnen, die es erlauben, die Beziehung zwischen den Parametern des YADE-Modells (ein Auslauf-Simulationsmodell, das auf der Diskrete Elemente Methode basiert) und der im Labor beobachteten physikalischen Realität herzustellen. Um YADE für den Auslauf von Hangmuren verwenden zu können, haben wir ein adhäsiv-elastoplastisches Kontaktgesetz implementiert, um das Verhalten einer kohäsiven Strömung zu reproduzieren. Zweitens nutzten wir die Daten von Feldexperimenten im Maßstab 1 :1 welche zwischen 2008 und 2010 auf dem Versuchsgelände in Veltheim durchgeführt wurden. Damit konnten wir die Fähigkeit von YADE zur Reproduktion der Fliesshöhe sowie -geschwindigkeit und des Aufpralldrucks testen. Drittens haben wir eine Datenbank mit 28 gut dokumentierten historischen Hangmurenereignissen erstellt, welche auch als Grundlage für die Validierung der Auslauf-Simulationen diene. Basierend auf den Laborexperimenten sowie den besten Simulationen der 28 historischen Ereignisse konnten wir vier Fliesstypen (FT) definieren : FT 1 = sehr flüssige Ereignisse mit geringer Adhäsion ; FT 2 = flüssige Ereignisse mit geringer Adhäsion ; FT 3 = sehr flüssige Ereignisse mit hoher Adhäsion ; FT 4 = flüssige Ereignisse mit hoher Adhäsion. Die Ergebnisse von YADE stimmten in Bezug auf Druck und Fliessgeschwindigkeit gut mit den Feldexperimenten überein, während die Fliesshöhe weniger gut nachgerechnet wurde.

Parallel zur Entwicklung von YADE haben wir SlideForce - ein physikalisch-probabilistisches Hangmurenauslauf-Modell - entwickelt. SlideForce ist vom FLOW-R Modell abgeleitet und beschreibt die Umverteilung einer fließenden Masse auf Basis eines digitalen Geländemodells (DGM) und zielt darauf ab, den Auslauf, die Geschwindigkeit, die Fliesshöhe sowie den Druck von Hangmuren zu simulieren. Für jedes der 28 historischen Ereignisse testeten wir 5'760 Kombinationen von Parameterwerten und wählten für jeden Fall die 30 besten Simulationen aus. Schließlich konnten wir durch Kopplung des FTs, welcher für jedes Ereignis durch YADE bestimmt wurde, mit den 30 besten SlideForce-Simulationen die Verteilungen der Parameterwerte für jeden FT in SlideForce definieren. Unter Verwendung der definierten Wertebereiche aller SlideForce-Parameter führten wir 500 Simulationen pro historischem Ereignis durch, damit wir die 28 Fälle reproduzieren konnten. Die Ergebnisse zeigen, dass SlideForce im Vergleich zu YADE niedrigere Fliesshöhen simuliert. Die simulierten Geschwindigkeiten und Drücke weisen teilweise die gleichen Trends auf, es wurde jedoch eine grosse Variabilität beobachtet. Der Vergleich zwischen den simulierten und beobachteten Umhüllenden der Ereignissen zeigte, dass in 17 der 28 Fälle (61%) in YADE und SlideForce der identische FT verwendet wurde. Im Allgemeinen kommen wir zu dem Schluss, dass die Modelle YADE und SlideForce in der Lage sind, die Umhüllenden der 28 historischen Ereignisse mehr als zufriedenstellend zu reproduzieren.

Der Vergleich zwischen der mit SlideForce modellierten Umhüllenden und den historischen Ereignissen zeigt, dass die besten Ergebnisse erzielt werden, wenn die Rasterzellen mit einem simulierten Erreichwahrscheinlichkeitswert von weniger als 50% aus dem Auslaufbereich entfernt werden. Die Praxiserfahrungen mit SlideForce werden dazu beitragen, einen Wertebereich festzulegen, mit dem die simulierte Erreichwahrscheinlichkeit in einen realistischen Auslaufbereich umgewandelt werden kann. Letzterer wird die wichtigste Grundlage für die Erstellung einer Gefahrenkarte mit SlideForce sein.

Summary

Every year in Switzerland, shallow landslides and hillslope debris flows are responsible for major damage to buildings, closure of infrastructures, evacuations and sometimes even deaths. In 2016, the Federal Office for the Environment (FOEN) published the "Guideline for the integrated hazard management of landslides, rockfall and hillslope debris flows" (OFEV, 2016). This guideline promotes in particular a more quantitative approach to the analysis of gravity-driven hazards. At the same time, the working group "Natural hazards and Geology" (AGN) published its improved methodology for evaluating shallow landslides and hillslope debris flows. Their report concludes that, despite the fact that a limited number of run-out simulations have been successfully tested, the modelling tools in this field still need to be improved.

For that reason, the Slideforce project aimed to propose models for the prediction of the triggering of shallow landslides as well as for simulating the run-out of hillslope debris flow and facilitate their use by practitioners. The project is based on the analysis of historical shallow landslide / hillslope debris flow events documented in the register of historical events or the hillslope debris flow database (FOEN / WSL).

To test the effect of different disposition factors on the size and location of simulated shallow landslides, we used back-calculation approaches both at slope and regional scales. In this project, we specifically analyzed the following effects on the modelling of release areas :

- the resolution of the used digital terrain model
- the soil characteristics
- the used vegetation characteristics (i.e., root reinforcement)

To analyse these effects at slope scale, we have chosen the Bombinasco hillslope debris flow event of 2014 in the municipality of Curio (TI), which was back-calculated with the SOSlope model. This is a hydromechanical model for assessing slope stability, in which the studied slope is discretized into a raster. Each raster cell is connected to the four adjacent cell by bond forces. For each time step, the model calculates the factor of safety for all cells by comparing the stabilizing forces with the destabilizing forces. SOSlope was able to reproduce the 2014 Bombinasco event with an input raster resolution of 2m and a cohesion of 3.3 kPa. Simulations with lower cohesion values did not correspond to reality. Simulations with higher cohesion values or with a 5 m resolution input raster showed that the entire slope is stable. Other analyses, described in this report, demonstrated the sensitivity of SOSlope to the antecedent soil moisture as well as the root reinforcement surrounding the release area.

In order to study the influence of disposition factors at the regional level, we used the SlideforMAP model which is a stochastic model that uses a 3D force equilibrium. This model randomly creates a large number of ellipsoid shaped landslides and calculates the factor of safety using the standard assumptions of limit equilibrium, infinite slope and Mohr-Coulomb. To validate the SlideforMAP model, we used 78 historical landslide events in three study areas : St. Antoniën (GR, occurrence in the year 2005), Trub (BE, year 2005) and Eriz (BE, year 2012). In addition, a sensitivity analysis was carried out using the hypercube latin sampling technique, which evaluates the influence of each individual model parameter on the response variable using the Spearman's Rank Correlation Coefficient (PRCC). In the end, 800 different combinations of parameters were tested per study area. The PRCC values show that accurate estimates of the parameters soil depth (SD), cohesion (SC), internal angle of friction (ϕ) and root reinforcement (RR) are of utmost importance. SlideforMap can be used to test different precipitation scenarios (P) on a regional scale using input data with a resolution of 5 to 10 m. The results show a good agreement for the the Eriz and Trub area while a lesser agreement was observed for the area of St. Antönien. This can partly be explained by the method used for calculation the accuracy of the predictions (AUC) that was used. Another result of the release area analyses is a practical guideline for modelling the release areas of shallow landslides at slope scale, which is presented in Appendix A of this report.

Concerning the run-out analysis, we have first carried out run-out experiments in the BFH-HAFL laboratory with the aim to acquire data that allow to understand the relationship between the model parameters

of YADE (a run-out simulation model based on a Discrete Element Method) and the reality observed in the laboratory. In order to use YADE, we have implemented an adhesive-elastoplastic contact law to reproduce the behaviour of a cohesive flow. Secondly, we used a series of full-scale field experiments on hillslope debris flows, which were conducted at the Veltheim experimental site between 2008 and 2010, to test the ability of YADE to reproduce the flow height, velocity and impact pressure. Thirdly, we created a database with 28 well-documented historical hillslope debris flow events, which also served as a validation basis for the YADE model. Based on the laboratory experiments and the best-fit simulations of the 28 historical events, we were able to identify and define four types of flow events (FT) : FT 1 = very fluid events with low adhesion ; FT 2 = fluid events with low adhesion ; FT 3 = very fluid events with high adhesion ; FT 4 = fluid events with high adhesion. The results of YADE matched well those of the full-scale field experiments in terms of pressure and flow velocity, while less agreement was observed for the flow height.

In parallel to YADE, we have developed SlideForce - a physical-probabilistic model for predicting the flow of hillslope debris flows. SlideForce is derived from the FLOW-R model and describes the redistribution of mass on the basis of a Digital Terrain Model (DTM). It allows modelling of the run-out, velocity, flow height and pressure associated with hillslope debris flows. For each of the 28 historical events, we tested 5760 combinations of parameter values and selected the 30 best-fit simulations for each case. Finally, by coupling the FT defined for each historical event (based on the YADE results) with the 30 best-fit SlideForce simulations, we were able to define distributions of parameter values for each FT in SlideForce. Subsequently, we ran 500 simulations per historical event to reproduce the 28 cases. The results show that the model SlideForce, compared to YADE, consistently predicts lower flow heights. The simulated velocities and pressures have partially the same trends, but a large variability is observed. The comparison between the envelopes of historical events and simulated run-out areas showed that in 17 cases (61%), the best-fit simulation (i.e., the best reproduction of the historical event) by YADE and SlideForce represents an identical FT. In general, we conclude that both YADE and SlideForce were able to reproduce the envelopes of the 28 historical events in a very satisfying way.

After comparing the runout zones produced by SlideForce with the historical events, we concluded that the best results are obtained by neglecting the modelled runout cells with reach probability values smaller than 50%. Experience with the use of SlideForce in the practice will help establishing a range of values to be used to transform the simulated reach probability raster into a realistic runout zone map. The latter will provide the most important basis for establishing a hazard zone map using SlideForce.

Table des matières

Résumé	i
Zusammenfassung	iii
Summary	v
1. Introduction	1
1.1. État actuel des connaissances	1
2. Base de données des événements historiques	7
2.1. Origine des données	7
2.2. Préparation de la base de données	8
2.3. Présentation des événements choisis	9
3. Méthodes d'analyse de la zone d'arrachement	15
3.1. Arrachement à l'échelle d'un versant	15
3.2. Arrachement à l'échelle d'une région	18
4. Résultats de l'analyse de la zone d'arrachement	23
4.1. Résultats à l'échelle d'un versant	23
4.2. Résultats à l'échelle d'une région	25
4.3. Fiche technique pour l'analyse de disposition	31
5. Méthodes de l'analyse de la propagation	33
5.1. Expériences de laboratoire	35
5.2. Modélisation d'éléments discrets avec YADE	36
5.3. Expérimentations de terrain de coulées de boue de versant	39
5.4. Modélisation de la propagation d'événements historiques avec YADE	44
5.5. Modélisation de la propagation d'événements historiques avec SlideForce	47
6. Résultats de l'analyse de la propagation	51
6.1. Résultats de laboratoire	51
6.2. Résultats de YADE des expérimentations de terrain	51
6.3. Résultats de YADE des événements historiques	54
6.4. Résultats de SlideForce	56
7. Discussion	61
7.1. Analyse de l'arrachement	61
7.2. Analyse de la propagation	62
8. Conclusions et perspectives	67
Bibliographie	69
Glossaire	75
A. Annexe - Fiche technique pour la modélisation de l'arrachement	77
B. Annexe - Analyses de sol	81
C. Annexe - Cartes des événements historiques et simulations	95

1. Introduction

Chaque année en Suisse, les glissements de terrain superficiels et les coulées de boue de versant sont responsables de dommages importants aux bâtiments, de fermeture d'infrastructures, d'évacuations et parfois même de décès. En Suisse, environ 8 % de la surface du territoire est affectée par des glissements de terrain, souvent classifiés en glissements de terrain superficiels (Hürlimann *et al.*, 2015). Ces glissements de terrain surviennent principalement dans les Alpes, les Préalpes et certaines parties du Jura. En 2014, par exemple, la Suisse a enregistré 5 décès liés à l'impact de glissement de terrain superficiel sur un lieu de résidence ou un moyen de transport. De plus, ces processus peuvent accroître les dommages causés par les inondations, notamment par transport additionnel de la charge du lit et de bois flotté dans les canaux et les rivières, entraînant la formation d'embâcles au niveau des ponts et des passerelles (OFEV, 2019). Selon l'analyse des risques de l'office fédéral des routes (OFROU), les glissements de terrain spontanés et les coulées de boues causent des dommages annuels de 1,9 million de francs sur les routes nationales suisses (Dorren et Arnold, 2016).

L'importance de ces processus en plus des autres types de glissements et chutes de blocs, a incité la Confédération à édicter dès 1997 des recommandations dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire (OFAT/OFEE/OFEP, 1997). Fort de l'expérience des cantons, du groupe de travail "Danger Naturel et Géologie" AGN-DNG (2004), et suite aux analyses des intempéries de 2005 et 2007, l'office fédéral de l'environnement (OFEV) publie en 2016 une "aide à l'exécution concernant la gestion des dangers dus aux glissements de terrain, aux chutes de pierres et aux coulées de boue" (OFEV, 2016). Cette aide préconise notamment une approche plus quantitative de l'analyse des risques gravitaires. Entre-temps, l'application de la méthode AGN-DNG a révélé qu'aucune détermination des intensités n'est possible et que les zones de propagation des coulées de boues ne peuvent pas être délimitées. En conséquence, une amélioration de la méthodologie pour évaluer les glissements superficiels et les coulées de boue de versant a été proposée (AGN-DNG, 2016). Ce rapport conclut que la teneur en particules fines du matériau et sa plasticité donne des indications utiles sur le mode de rupture et d'écoulement du glissement ou de la coulée et donne ainsi une bonne base pour fixer les paramètres nécessaires pour la simulation de propagation de glissements. Toutefois, malgré le fait qu'un nombre limité de simulations de propagation aient été testées avec succès, le groupe de travail AGN-DNG (2016) conclut que les outils de modélisation doivent encore être améliorés.

C'est pourquoi le projet Slideforce s'inscrit dans un but d'amélioration de la gestion du territoire au travers de l'utilisation de modèles de prédiction de la disposition des glissements superficiels et la simulation des zones de propagation de ces derniers. Il s'appuie sur l'analyse d'événements historiques documentés dans le cadastre des événements naturels des cantons (StorMe) et dans la base de données coulées de boue (OFEV/WSL). Le but de ce projet est d'accompagner les praticiens avec des modèles de simulations pour la délimitation des zones d'arrachement des glissements superficiels (SOSlope / SlideForMap) et des zones de propagations des coulées de boue (SlideForce), ainsi que la description de la cinématique, pour différents scénarios de précipitation, de type de sol et de végétation. Ainsi, ce projet contribue à une amélioration de l'évaluation du danger grâce à une détermination précise et fiable des occurrences et propagations potentiels de glissements de terrain superficiels.

1.1. État actuel des connaissances

Sur les pentes raides couvertes de matériaux meubles, les glissements superficiels peuvent se produire lors de fortes précipitations ou de la fonte des neiges. Dans le meilleur des cas, la végétation forestière empêche ces mouvements de masse de se produire. L'occurrence des glissements superficiels est un mécanisme complexe, résultant en une difficulté de prédire de manière systématique et réaliste l'occurrence, la fréquence, la taille et la propagation des glissements de terrain superficiels. Les évaluations de ces processus de danger sont donc majoritairement basées sur l'expérience des experts. La coulée de boue de versant est un processus de

propagation secondaire, suivant typiquement des glissement translationnels dans des pentes entre 20° et 45° (Iverson, 1997; Iverson *et al.*, 1997; Hürlimann *et al.*, 2003; OFEV, 2016) avec une épaisseur de départ moyenne entre 0.5 et 2m (Frehner *et al.*, 2005; Sidle et Ochiai, 2006; OFEV, 2016). C'est pourquoi on distingue bien deux phases : 1) l'arrachement des glissements superficiels et 2) la propagation des coulées de boue.

1.1.1. L'arrachement des glissements superficiels

Depuis les premières analyses d'événements par Rickli *et al.* (2001), diverses avancées ont été réalisées dans le domaine des glissements superficiels. Bien que la pente joue un rôle majeur dans la disposition, la grande variabilité d'occurrence montre que les glissements de terrain sont influencés par d'autres facteurs tels que l'hydrologie, la géologie, le type de sol et la végétation (Sidle et Ochiai, 2006). La masse de glissement est située directement au-dessus du substratum rocheux ou d'une couche moins perméable qui sert de surface de glissement (Sidle et Ochiai, 2006). Selon Schwarz et Thormann (2012) plus de 95% des glissements superficiels recensés en Suisse ont un volume de moins de 400 m³. Le projet TRAMM (voir Springman *et al.* (2009)) a permis d'étudier en détail les différents facteurs de disposition des glissements de terrain superficiels, notamment au travers de la réalisation d'expériences sur le terrain et en laboratoire. Il a été constaté que la dynamique des processus hydrologiques et mécaniques a une influence importante sur la stabilité globale des glissements de terrain superficiels. D'autre part, il a été montré que la méthode de l'équilibre limite devrait être à nouveau discutée. Un des désavantages principal de cette méthode est son inaptitude à prendre en compte les déplacements. Des modèles de disposition souvent utilisés, SLIDISP (Liener *et al.*, 1996) ou SliDisp+ (Tobler *et al.*, 2013) sont basés sur une telle méthode. En outre, il a pu être démontré que l'hétérogénéité du sol causée par les racines joue un rôle important dans le déclenchement de glissements de terrain superficiels.

Les glissements de terrain spontanés sont causés par une perte soudaine de la résistance au cisaillement due à une perte de cohésion, à une réduction de l'angle de frottement ou à une augmentation de la pression d'eau interstitielle (AGN-DNG, 2004). Une séquence typique menant à la formation d'un glissement de terrain est caractérisée par des périodes riches en précipitations (evt. en combinaison avec la fonte des neiges enrichissant le sol en eau) suivies de fortes intensités de pluie. Les conditions contrôlant l'arrachement des glissements superficiels se compose de trois phases différentes : disposition de base, disposition variable et facteurs déclenchant. Les facteurs et caractéristiques de la disposition de base sont le type de roche mère, le type de sol (cohésion, angle de frottement interne, conductivité) et la topographie (pente, exposition et morphologie de versant). La disposition variable comprend tous les facteurs qui peuvent varier à moyen ou à court terme (p. ex. la pression d'eau interstitielle, la saturation en eau du sol, mais aussi la végétation et les macropores présents dans le sol (voir Rickli *et al.* (2008); Cohen et Schwarz (2017))). Enfin les déclencheurs sont des événements ponctuels qui se produisent soudainement, et parmi ceux-ci les précipitations (durée et intensité) en sont généralement le facteur prévalent. Un glissement superficiel se produit lorsque l'influence de la disposition de base, de la disposition variable et des facteurs déclenchant surchargent le système.

La végétation dans les zones sujettes aux glissements de terrain offre une contribution importante à l'amélioration de la stabilité des pentes par les influences hydrologiques de la forêt, surtout à l'échelle du bassin versant. Ces effets peuvent contrôler le ruissellement de l'eau dans la région et provoquer un écoulement régulier. Cela empêche les précipitations de s'écouler trop rapidement dans la vallée et de provoquer de dangereuses pressions d'eau interstitielle. Les facteurs hydrologiques les plus importants sont l'interception de la canopée et l'évapotranspiration (Sidle et Ochiai, 2006). Cependant, la plus grande contribution de la végétation à la stabilisation des glissements superficiels est donnée par le renforcement des racines. Selon Cohen et Schwarz (2017) on distingue trois mécanismes différents :

- renforcement basal du système racinaire. Le renforcement du sol est obtenu par la pénétration des racines dans le plan de cisaillement. Cela permet d'ancrer les couches supérieures du sol aux couches stables sous-jacentes. Ce mécanisme a un grand effet stabilisateur sur la stabilité des pentes.
- renforcement latéral des racines. Dans ce cas, les racines fixent les parties latérales d'un glissement, liant ainsi les matériaux du sol mis en mouvement aux parties stables de la pente. Ce processus est caractérisé par des forces de tension, des forces de compression et des contraintes de cisaillement.
- raidissement du sol par le système racinaire. Les racines augmentent la raideur du sous-sol, ainsi les forces impliquées sont mieux réparties dans le corps glissant. Cet aspect a un effet positif sur les deux premiers effets de renforcement mécanique des liaisons.

Lors d'un glissement de terrain, les mécanismes mentionnés ci-dessus sont activés dans différentes phases temporelles. Tout d'abord, le renforcement basal des racines est chargé, la masse de glissement étant maintenue sur la surface de glissement par les racines. Dès que la masse en glissement se déplace vers l'aval, les renforcements latéraux des racines sont activés : tout d'abord, les racines dans la zone de la fissure sont chargées sous tension, et lorsque ces forces ont presque échoué, le renforcement latéral des racines entre sous pression. Au cours de ce processus, l'effet de raidissement des racines est constamment présent.

En terme de modélisation de l'arrachement des glissements superficiels, de nombreuses approches sont décrites dans la littérature. Il existe principalement trois approches différentes qui tentent d'identifier les processus de glissement et d'en montrer les dimensions. Il s'agit de la méthode de la pente infinie et la méthode des éléments finis. Les deux existent en 2D et 3D. La variante simple de la pente infinie (en 2D) est utilisée depuis longtemps (p.ex. Skempton et DeLory (1984)) et peut être couplée à des modèles hydrologiques pour décrire les pressions d'eau interstitielle (Montgomery et Dietrich, 1994). Selon Milledge *et al.* (2014), ces modèles ne sont pas adaptés au dimensionnement des glissements superficiels car les effets latéraux du sol ne sont pas pris en compte. Pour obtenir de meilleurs résultats, des modèles 3D sont utilisés. Un type de modèle 3D simple utilise la pente infinie en incluant les forces stabilisatrices latérales par le renforcement des racines et la pression latérale des blocs adjacents (voir Burroughs Jr (1985); Reneau et Dietrich (1987)). Dans cette approche, le renforcement des racines est souvent considéré comme une cohésion supplémentaire.

Afin de quantifier plus précisément les forces absorbées par les racines, il y a premièrement l'approche statique de Wu *et al.* (1979) qui suppose que les racines ne renforcent le sol que verticalement et que les forces de l'espace racinaire n'agissent que lorsque toutes les racines ont atteint leur force de tension maximale. En deuxième, il y a l'approche de Pollen et Simon (2005) qui ont développé un modèle de faisceau de fibres (FBM - *Fibre Bundle Model*). Le FBM suppose que les racines ont des valeurs critiques différentes de la force de traction et donc échouent à différents moments. Les forces supplémentaires libérées par la défaillance de certaines racines sont transmises et distribuées aux racines intactes. Bien que le FBM représente une avancée majeure par rapport à l'approche de Wu *et al.* (1979), ce modèle ne prend pas en compte le calcul de l'expansion de la racine réelle. Troisièmement, il y a le modèle du faisceau de racines de type Weibull (RBMw - *Weibull Root Bundle Model*). Les avantages de ce modèle sont le calcul de la courbe force-déplacement totale d'un faisceau de racines et la répartition des forces sur chaque racine individuelle en fonction de ses propriétés géométriques et mécaniques (Schwarz *et al.*, 2013). Pour obtenir le renforcement d'un faisceau, les forces contributives de chaque racine sont additionnées. La grande variabilité dans la force absorbée par des racines de même diamètre en raison de leur âge, de leur composition et des conditions environnementales est représentée par une fonction de survie de type Weibull. Les modèles de type Bundle permettent d'obtenir de bien meilleurs résultats que le modèle de Wu *et al.* (1979), où les forces maximales peuvent être surestimées jusqu'à 150%.

En complément des approches énoncées ci-dessus, l'ajout de la méthode des tranches, où ces éléments sont transformés en colonnes, permet de représenter la troisième dimension dans les modèles (Hovland, 1979). Cependant, cette méthode néglige les forces entre les colonnes stables et instables et, par conséquent, la force de cisaillement est souvent sous-estimée (Stark et Eid, 1998). Une difficulté majeure dans les calculs de stabilité des pentes est que les glissements de terrain ne présentent pas une activation soudaine de toutes les forces, mais que les forces sont plutôt transformées au cours d'un événement et se déplacent à travers toutes les parties de la pente (Milledge *et al.*, 2014). Cette dynamique de défaillance progressive des blocs est généralement décrite par la méthode des éléments finis. Cette dernière est une technique avancée pour résoudre des équations différentielles en discrétisant ces équations dans leurs dimensions spatiales (Griffiths et Lane, 1999). Les parties constitutives (éléments finis) sont reliées par des nœuds, où les différentes équations sont décrites. Les nœuds prennent en compte toutes les équations saisies, telles que les forces de pression latérales de la terre ou le renforcement des racines par contrainte de traction et de compression (voir Cohen et Schwarz (2017)).

Les modèles utilisés dans ce projet sont SOSlope et SlideForMap. SOSlope est basé sur la méthode des éléments finis (MEF) pour l'analyse de disposition à l'échelle d'un versant, qui tient compte de l'effet stabilisateur des systèmes racinaires par les rapports force-déformation détaillés du sol enraciné (avec le RBMw; voir Cohen et Schwarz (2017)). SlideforMAP, développé à la BFH - HAFL, est un modèle d'équilibre aux limites 3D basé sur les résultats de SOSlope, qui peut être utilisé à l'échelle régionale pour analyser l'influence des facteurs de disposition (par exemple, l'état des forêts, les propriétés du sol, l'hydrologie).

1.1.2. La propagation des coulées de boue

Les coulées de boue sont donc un type de mouvement de masse où les glissements superficiels se transforment en une coulée non confinée (non canalisée) à la suite de fortes pluies ou de tremblements de terre. Elles sont parfois appelées avalanches de débris, mais contrairement à celles décrites par Hungr *et al.* (2014), elles entraînent rarement des sédiments sur leur trajet (Hürlimann *et al.*, 2015). En comparaison avec les laves torrentielles (canalisées), elles ont tendance à avoir une distance d'écoulement plus courte en raison de leur étalement latéral à raison de l'absence de confinement (Albaba *et al.*, 2019). Les coulées de boue de versant présentent un front de propagation bien défini et se déplacent de manière non confinée sur des pentes ouvertes à des vitesses variant de 3 mètres par minutes (Hungr *et al.*, 2014) jusqu'à une dizaine de mètres par seconde (voir Bugnion *et al.* (2012)). En 2012, une équipe de recherche de l'Institut fédéral suisse de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL) et de Geobrugg AG a mené des expériences de laves torrentielles à l'échelle 1 :1 dans la zone de la sortie de glissements superficiels. En mesurant la pression sur les obstacles, ils ont pu montrer que la pression dynamique peut être cinquante fois supérieure à la pression statique, ce qui illustre bien le danger potentiel des impacts des coulées de boue. Ces chiffres prouvent l'importance de modèles de simulation capables de prévoir correctement les pressions qui prévalent lors des coulées de boue.

Des modèles pour la simulation de la zone de propagation des coulées de boue sont disponibles en Suisse depuis 2000. L'un des modèles connus est SLIDESIM - un modèle de runout simple qui a été utilisé pour le projet SilvaProtect-CH. De tels modèles permettent de simuler les zones d'écoulement des coulées de boue, mais pas les pressions ni les hauteurs d'écoulement dominantes. Un modèle qui offre ces possibilités est le logiciel "Rapid Mass Movement Simulation - Hillslope" (RAMMS HS), qui a été développé au WSL sur la base de l'approche Voellmy. Dans le cadre d'un projet financé par l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), les pressions modélisées par RAMMS HS ont été comparées aux données issues de l'analyse structurelle des dommages subis par les bâtiments (Loup *et al.*, 2012). Cependant, il s'est avéré que ce modèle peut difficilement être appliqué dans la pratique en raison de l'effort important requis pour calibrer les paramètres. Une étude publiée en 2017 par le WSL et l'ETH, qui a comparé RAMMS HS à un modèle simple de dépôt par friction uniquement, a montré que ce dernier produisait des zones de propagation similaires à celles de RAMMS. Zimmermann *et al.* (2020) ont publié une autre étude qui est basée sur RAMMS - Debris Flow (RAMMS DF) - développé à l'origine pour l'estimation de la propagation des laves torrentielles. Les résultats de cette étude montrent une corrélation entre les paramètres de frottement sec (frottement de Coulomb) rétrocalculés et le pourcentage de la teneur en argile des sols mobilisés. En tenant compte de l'interaction cohésive, la performance de toutes les simulations a été améliorée en termes de réduction de la surestimation des zones de dépôt observées. Cependant, les résultats indiquent également que le paramètre qui tient compte de l'interaction cohésive ne peut être lié ni aux propriétés physiques du sol ni à des conditions de saturation différentes (Zimmermann *et al.*, 2020).

Des simulations utilisant la méthode des éléments discrets ont également été utilisées pour étudier les caractéristiques d'écoulement et les pressions d'impact des écoulements granulaires sur les pentes (Teufelsbauer *et al.*, 2009, 2011; Albaba *et al.*, 2015; Wu *et al.*, 2016; Shen *et al.*, 2018). Des paramètres tels que la vitesse d'écoulement, la hauteur d'écoulement et la pression d'impact ont été caractérisés dans ces simulations à différentes sections avec une investigation détaillée. Les résultats de ces simulations ont souvent été comparés à des modèles hydrodynamiques de moyenne profondeur concernant la pression d'impact de ces flux sur les barrières rigides (Faug, 2015; Albaba *et al.*, 2018). En outre, des études paramétriques portant sur l'effet de l'angle d'inclinaison du pan de glissement et de la barrière sur le comportement de l'écoulement et la pression d'impact ont également été réalisées (Albaba, 2015). Bien que ces simulations soient en accord avec la théorie proposée concernant l'impact, elles ont été principalement réalisées pour des écoulements granulaires secs sans tenir compte de la présence de fluide. Une telle présence modifierait les caractéristiques de l'écoulement et l'évolution temporelle de la pression appliquée (Vollmöller, 2004; Kattel *et al.*, 2018). D'autres modèles basés sur le Modèle Numérique de Terrain (MNT) ont pris en compte la présence de fluide en couplant le MNT, soit avec la méthode LBM (Lattice-Boltzman-Method) soit avec un solveur CFD (Computational Fluid Dynamics) (Leonardi *et al.*, 2016; Ding et Xu, 2018). Ces modèles étaient prometteurs pour les questions de recherche théorique mais sont coûteux en termes de calcul pour une utilisation dans la pratique quotidienne de l'évaluation des risques de coulée de boue de versant.

Le modèle Flow-R (voir Horton *et al.* (2013)), développé à l'Université de Lausanne, a fourni des résultats prometteurs pour la modélisation des laves torrentielles. Le concept sous-jacent a été récemment mis en œuvre et adapté dans le modèle SlideForce (au début appelé M-Flow) développé à la BFH-HAFL. SlideForce a été

testé pour modéliser les coulées de boues. Les premières analyses avec SlideForce, qui reproduisent la propagation et la pression de véritables coulées de débris de pente, sont prometteuses. Toutefois, une analyse plus approfondie est nécessaire pour améliorer la qualité des résultats et pour définir l'ensemble des paramètres le plus optimal à utiliser dans la pratique. Le modèle SlideForce ne prend actuellement en compte que la répartition de la masse en écoulement en fonction du terrain, sans inclure les aspects physiques caractéristiques des glissements superficiels. L'objectif est maintenant de mieux étudier les possibilités et les limites du modèle SlideForce afin d'améliorer la qualité du modèle et de ses résultats (par exemple la pression, la vitesse et la hauteur d'écoulement).

1.1.3. Intensités des glissements superficiels et des coulées de boue

Selon l'OFEV (voir OFEV (2016)), les intensités des glissements de terrain superficiels et des coulées de boue sont déterminées par l'épaisseur de la masse mobilisable (M , en mètres) et/ou la hauteur de dépôt (h , en mètres). En outre, le groupe de travail AGN-DNG (2004) propose un critère supplémentaire basé sur la pression pour déterminer l'intensité des coulées de boue. Il est recommandé d'introduire une limite de classe similaire à celle des avalanches de neige (voir BFF/EISLF (1984)) en tenant compte de la pression dynamique moyenne (en kN/m^2). Le tableau 1.1 montre les différentes valeurs utilisées aujourd'hui pour définir l'intensité. Les valeurs entre parenthèses renvoient à la proposition d'AGN-DNG, qui n'est que peu utilisée aujourd'hui. Notez le doublement des valeurs de la pression dynamique par rapport aux avalanches. La raison selon AGN-DNG (2004) est la distribution différente de la pression des coulées de boue de versant par rapport aux avalanches. Les critères d'intensité basés sur la pression ne peuvent en fait être dérivées que des résultats des modèles de simulation de propagation des coulées de boue.

Table 1.1. – Critères d'intensité pour les glissements superficiels et les coulées de boue selon AGN-DNG (2004) et OFEV (2016)

Processus	Intensité		
	<i>faible</i>	<i>moyenne</i>	<i>forte</i>
Glissement superficiel (OFEV, 2016)	$M < 0.5 \text{ m}$	$0.5 \text{ m} < M < 2 \text{ m}$	$M > 2$
Coulée de boue (OFEV, 2016)	h de quelques décimètres	$h < 1 \text{ m}$	$h > 1 \text{ m}$
Coulée de boue (AGN-DNG, 2004)	$p < 6 \text{ kN/m}^2$	$6 \text{ kN/m}^2 < p < 60 \text{ kN/m}^2$	$p > 60 \text{ kN/m}^2$
M = épaisseur de la masse mobilisable	h = hauteur de dépôt	p = pression dynamique moyenne	

2. Base de données des événements historiques

2.1. Origine des données

Afin de développer les différents modèles utilisés dans le cadre de ce projet, une base de données d'événements historiques sur les coulées de boues de versant a été créée. Ces événements ont été recueillis à partir de différentes sources soigneusement documentées de glissements de terrain peu profonds et de coulées de boues de versant. Le but du développement de la base de données est d'utiliser ses événements pour calibrer et valider les paramètres des différents modèles développés dans le cadre de ce projet (SlideForMap, YADE et SlideForce). Dans le cadre d'un projet financé par l'OFEV (Base de données sur les glissements de terrain peu profonds et les coulées de boue de versant; durée : 2012-2018), le WSL a procédé à une vaste collecte de données afin d'établir une base de données détaillée des événements passés Suisse. L'objectif de cette base de données était de fournir aux chercheurs et aux praticiens des éléments pour l'élaboration de modèles, la création de rapports ou de cartes des dangers (WSL/BAFU/AGN, 2018). La base de données était limitée aux glissements de terrain spontanés de faible profondeur et aux coulées de boues de versants, tels que définis par le groupe de travail "Danger naturel et Géologie" (AGN-DNG, 2004).

Le formulaire utilisé pour l'enregistrement des données a été basé sur des projets antérieurs relatifs à la documentation des coulées de boue de versant en Suisse (Rickli et Bucher, 2003; Rickli *et al.*, 2008, 2001). Ces documents ont toutefois été révisés et étendus, en collaboration avec le groupe de travail AGN-DNG. Des observations détaillées ont été faites sur plusieurs aspects géométriques des zones de départ et de dépôt des événements considérés (Fig.2.1). Bien que la base de données préparée ait fourni des mesures/estimations détaillées des événements, la majorité des événements décrits ne contient pas la géographie précise de l'enveloppe de l'événement. En conséquence, plusieurs autorités cantonales ont été contactées pour compléter ces données.

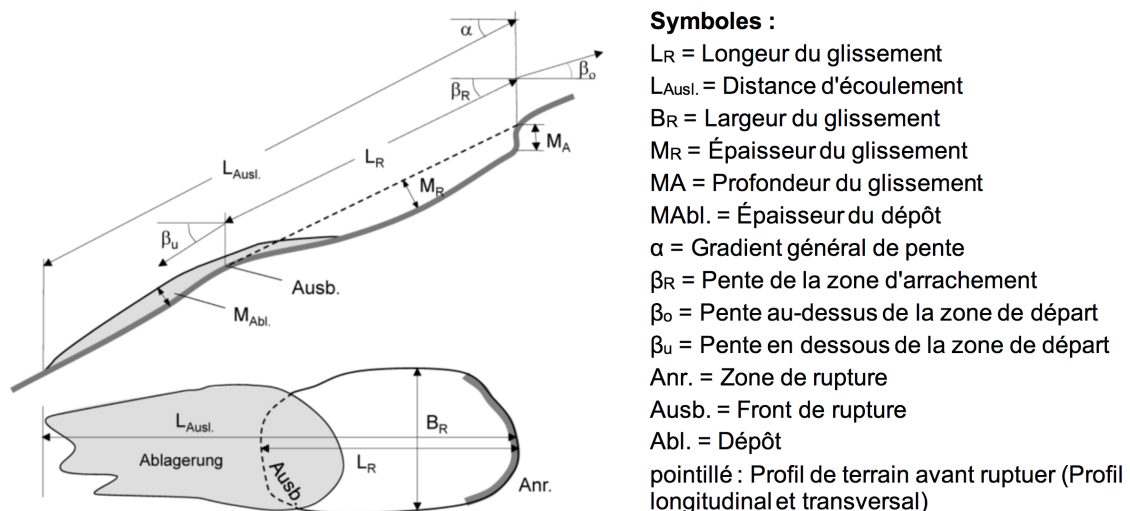


Figure 2.1. – Représentation schématique des paramètres géométriques relevés pour chaque événement (WSL/BAFU/AGN, 2018).

Finalement, nous avons utilisé des données des services des dangers naturels des cantons de Berne, Lucerne, Saint-Gall, du Tessin, des Grisons ainsi que de la Principauté du Liechtenstein dans le but d'obtenir les

informations relatives à ces sites. En parallèle, plusieurs de ces événements disposaient de données additionnelles dans le cadastre StorMe concernant leur géométrie et les dommages observés.

2.2. Préparation de la base de données

2.2.1. Comparaison croisée des géoréférencement et polygones en SIG

Tout d'abord, le logiciel QGIS a été utilisé pour déterminer la correspondance spatiale entre les points géoréférencés représentant les événements de la base de données du WSL et les polygones représentant les événements obtenus des services cantonaux spécialisés. Un événement candidat a été identifié comme étant celui ayant un point avec toutes les données nécessaires de la base de données WSL et également un polygone représentant les zones de départ, de transit et de dépôt de l'événement. L'identifiant StorMe a été comparé afin de vérifier que le point et le polygone appartenaient au même événement. Cependant, l'identifiant StorMe représente généralement plusieurs coulées de débris de pente de versant qui ont eu lieu au même endroit et durant le même événement pluviométrique. Comme vérification supplémentaire, les données concernant la distance de propagation à la zone départ de la base de données WSL ont été comparées à la longueur réelle du polygone, afin de vérifier que le point et le polygone appartiennent au même événement. Dans certains cas, une différence spatiale a été observée pour l'emplacement du point et du polygone représentant le même événement, ce qui peut être attribué à des facteurs liés à des erreurs humaines lors de la numérisation. Afin de vérifier la bonne position de ces événements, la section "Voyage dans le temps" de map.geo.admin.ch a été utilisée pour comparer des images aériennes avant et après les événements. Les images post-événements montrent une nette différence associée aux coulées de boue étudiées, permettant la vérification de la position de l'évènement d'intérêt. La figure 2.2 montre un exemple d'image aérienne après l'occurrence de l'évènement n°1 dans la base de données, sur le site de Saint Antönien dans les Grisons.



Figure 2.2. – Photo aérienne montrant l'évènement de Saint Antönien (GR, événement n°1) montrant des traces indiquant la forme et l'enveloppe de l'évènement. La ligne rouge en pointillé représente le polygone numérisé tel qu'il a été reçu du service cantonal spécialisé.

Après avoir filtré les événements en fonction de la correspondance entre les points WSL et les polygones du canton, nous avons analysé en détail les événements enregistrés par les différents départements des dangers

naturels afin de choisir des événements additionnels. Une comparaison croisée a été faite entre la forme du polygone numérisé, les données enregistrées dans le formulaire StorMe (lorsqu'elles étaient disponibles) et les images aériennes avant et après l'événement.

2.2.2. Identification de la zone de glissement

Pour les deux modèles numériques utilisés dans le cadre de ce projet (YADE et SlideForce), il est important d'identifier l'étendue et la profondeur de la zone de glissement à partir de laquelle la coulée commence. Cependant, les polygones numérisés fournissent des informations sur le trajet total parcouru par le matériau, sans différence entre la zone de départ et la zone de dépôt.

Les données géométriques disponibles (Base de données auprès des autorités cantonales et du WSL) concernant la longueur et la largeur de la zone de départ ont été utilisées et comparées avec les dimensions de la partie supérieure du polygone cartographié. En outre, les dimensions de cette zone ont été vérifiées à l'aide d'images aériennes pré- et post-événements (selon disponibilité, données SwissTopo (Swisstopo, 2013)). Pour les événements où la longueur de la zone de glissement n'était pas disponible, celle-ci a été rétro-calculée en utilisant la surface de la zone de départ et sa largeur.

Après vérification des mesures de la zone de départ, la géométrie de celle-ci a été assumée comme une ellipse à l'intérieur du polygone numérisé. Les principaux axes de l'ellipse ont été définis à partir de la base de données en fonction de la largeur et de la longueur de la zone de départ. L'ellipse a été orientée de telle sorte que sa longueur soit perpendiculaire aux courbes de niveau et que sa largeur soit parallèle à celles-ci.

2.3. Présentation des événements choisis

Au total, 28 événements historiques bien documentés ont été sélectionnés, représentant des cas survenus dans les cantons de Berne, Lucerne, Saint-Gall, Grisons et Tessin ainsi que dans la principauté de Liechtenstein (voir fig.2.3 et tab.2.1).

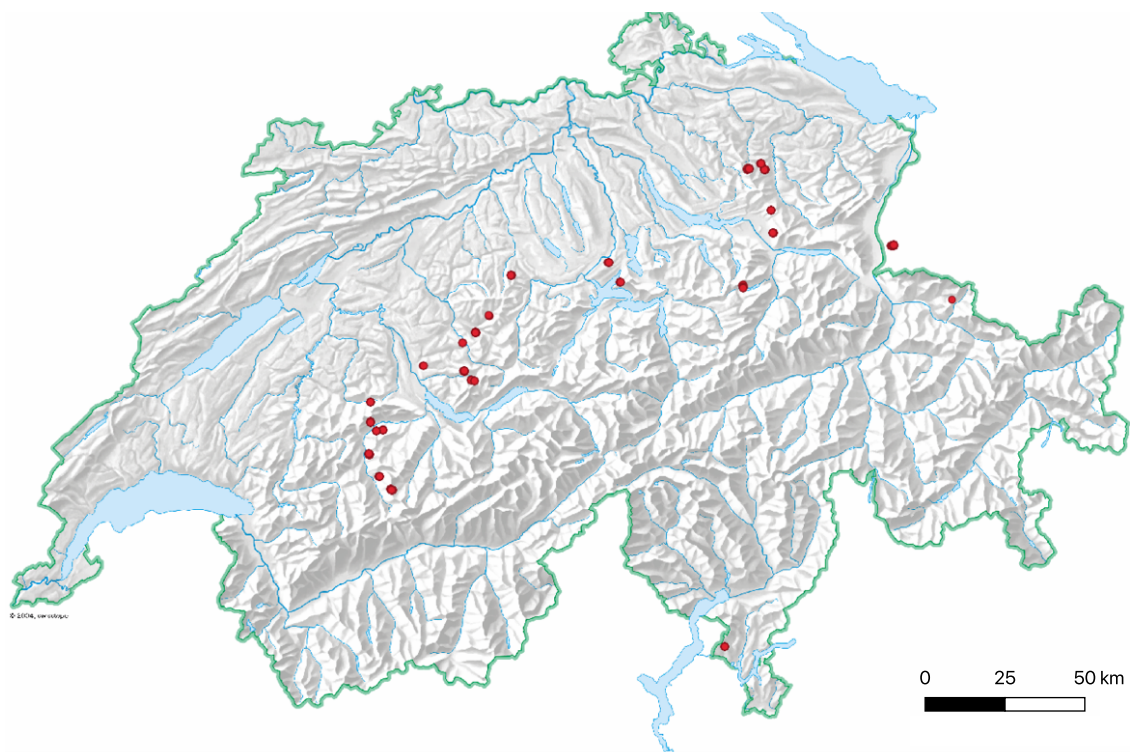


Figure 2.3. – Répartition géographique des 28 coulées de boue de versant sélectionnées.

La figure 2.4 montre la relation entre le volume initial et la distance de propagation de chaque évènements. On constate que la la distance parcourue par le matériel en mouvement augmente avec l'augmentation du volume initial, comme le confirme Hürlimann *et al.* (2015). La dispersion des données peut-être due à la présence d'obstacles (p. ex, des maisons) qui limitent les déplacement de la masse. En outre, les ruptures brusques de pente de certains évènements dans la zone de dépôt pourrait également influencer la dispersion des données de distance parcourue. En outre, la présence de différences de teneur en eau dans le matériau en écoulement (partiellement ou totalement saturé) entraîne des distances d'écoulement différentes, comme présenté dans la section 6.1.

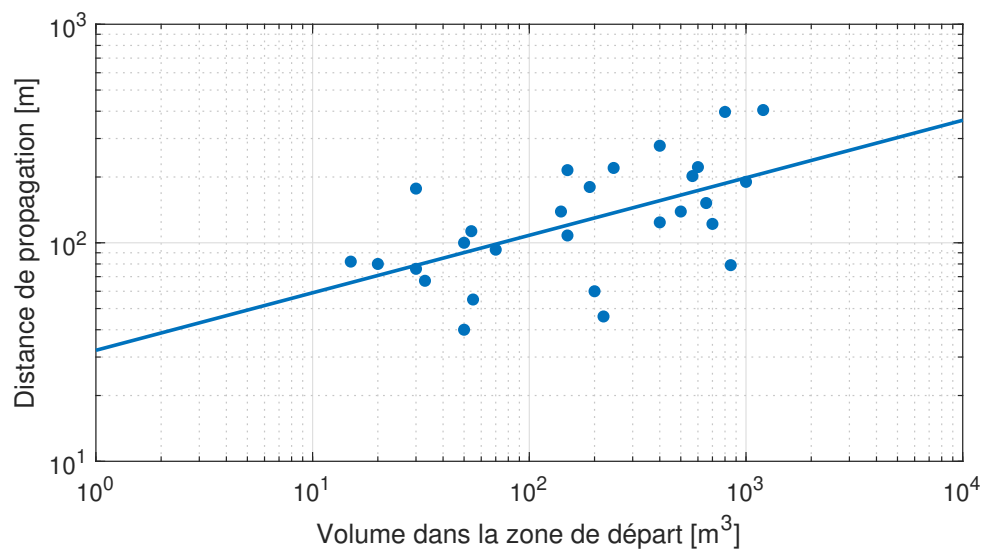


Figure 2.4. – Relation entre distance de propagation des évènements choisis et leur volume initial.

Table 2.1. – Les principales caractéristiques des 28 événements historiques sélectionnés

n°Evt*	n° de StorMe	Date de l'Evt	Nom local	Commune	Canton/Pays	Couverture végétale	Volume ZA** (m ³)	Surface ZA (m ²)	Largeur ZA (m)	Épaisseur ZA (m)	Pente ZA (°)	Courbure*** ZA	Distance de propagation (m)	Pente moyenne ZP**** (°)	Épaisseur de dépôt (m)
1	2005-R-0019	2005-08-22	Aschueel	Sankt Antonien	GR	Zone ouverte	566	808	30	0.9	30	1	202	25	-
2	2005-R-0593	2005-08-22	Loos	Trub	BE	Forêt	54	108	15	0.4	41	2	113	28	-
3	2005-R-1479	2005-08-22	Baelliz	Brenzikofen	BE	Zone ouverte	30	36	6	1	24	8	76	17	0.1
4	2005-R-0709	2005-08-22	Schmittengraben	Eggwil	BE	Forêt	50	150	15	0.4	47	3	100	34	0.5
5	2012-R-0014	2012-07-04	Obere Sol	Horrenbach Buchen	BE	Zone ouverte	655	364	16	1.8	31	9	152	24	-
6	2012-R-0012	2012-07-04	Undere Schoeriz	Horrenbach Buchen	BE	Zone ouverte	33	84	9	0.4	31	3	67	24	-
7	2013-R-0006	2006-06-01	Seeweid	Weggis	LU	Zone ouverte	20	35	5	0.5	29	2	80	23	1
8	2015-R-0015	2015-06-07	Weesweide	Root	LU	Zone ouverte	190	540	14	0.4	24	3	180	17	0.5
9	2005-R-0003	2005-08-22	Chanzelsagi	Hergiswil	LU	Zone ouverte	55	37	6	1.5	31	2	55	24	1.2
10	2014-R-0012	2014-11-05	Bombinasco	Curio	TI	Forêt	850	98	9	6	40	9	79	31	2
11	2013-R-0049	2013-06-01	Altoggenburg	Mosang	SG	Zone ouverte	50	90	10	-	22	3	40	16	0.4
12	2002-R-0048	2002-09-01	Altoggenburg	Mosang	SG	Forêt	220	150	10	-	34	5	46	26	2
13	2002-R-0053	2002-09-01	Altoggenburg	Mosang	SG	Zone ouverte	200	270	17	-	26	8	60	18	1.5
14	2013-R-0051	2013-06-01	Altoggenburg	Mosang	SG	Forêt	400	800	19	-	39	3	124	33	-
15	2013-R-0053	2013-06-01	Altoggenburg	Mosang	SG	Forêt	700	1500	32	-	41	8	122	36	-
16	2013-R-0127	2013-05-31	Gaster	Schaenis	SG	Zone ouverte	150	90	18	-	25	1	215	17	0.5
17	2005-R-1011	2005-08-22	Winchel	Triesenberg	FL	Zone ouverte	30	23	6	-	26	9	177	20	-
18	2005-R-2005	2005-08-22	Schluacht	Triesenberg	FL	Forêt	15	16	5	-	42	3	82	38	-
19	2005-R-1057	2005-08-22	Lavey	Lenk	BE	Zone ouverte	70	100	10	0.7	40	2	93	35	0.3
20	2005-R-1056	2005-08-22	Lavey	Lenk	BE	Zone ouverte	1200	1500	30	0.8	32	8	405	28	0.5
21	2005-R-0374	2005-08-22	Vorholzallmi	Oberwil	BE	Zone ouverte	150	100	10	1	30	3	108	24	2
22	2005-R-0376	2005-08-22	Vorholzallmi	Oberwil	BE	Forêt	500	300	17	2	52	2	139	42	3
23	2005-R-0047	2005-08-23	Stieremoos	Rueschegg	BE	Zone ouverte	600	1200	40	0.5	29	8	222	23	1
24	2005-R-0337	2005-08-22	Forêtried	Oberwil	BE	Zone ouverte	400	200	18	2	32	8	278	25	1
25	2005-R-0945	2005-08-22	Jegerhus	Trubschachen	BE	Zone ouverte	140	200	10	0.7	35	8	139	24	-
26	2005-R-1087	2005-08-22	Gschwaend	Zweissimmen	BE	Zone ouverte	800	700	10	2	35	3	397	25	1
27	2005-R-0464	2005-08-22	VordererChnubel	Eriz	BE	Forêt	1000	400	30	1.5	36	3	190	27	2
28	2005-R-1067	2005-08-22	A den Eiggen	Sankt Stephan	BE	Zone ouverte	245	350	7	0.7	29	8	220	25	0.5

*Evt = événement ; **ZA = zone d'arrachement ; ***Courbure (voir fig. 2.8) ; ****ZP = zone de propagation

L'histogramme de la distribution du volume de la zone de départ est présenté dans la figure 2.5. La plage de valeurs du volume en mouvement s'étend de 30 à 1000 m^3 . On observe que la majorité des événements ont un volume initial supérieur à 100 m^3 .

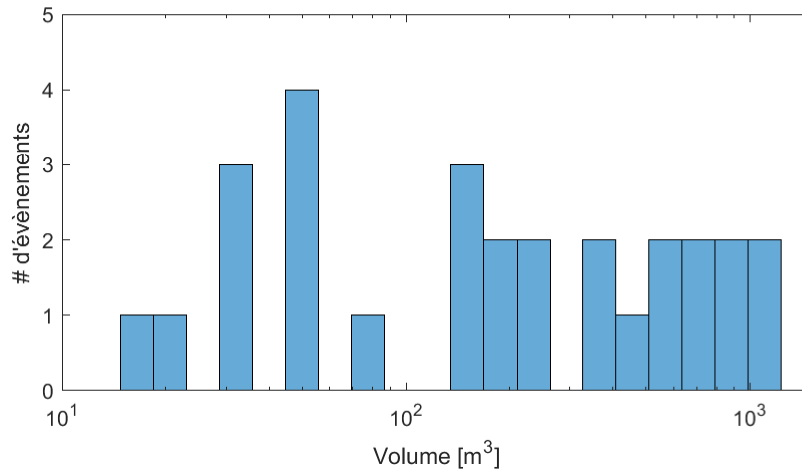


Figure 2.5. – Histogramme de la distribution du volume initial des événements sélectionnés.

La distribution de l'épaisseur de la masse mobilisée des différents événements est illustrée dans la figure 2.6. L'épaisseur de la masse mobilisée varie principalement entre 0,5 et 2 mètres, ce qui est typique des glissements de terrain peu profonds tels que définis par OFEV (2016). Dans notre base de donnée, un seul événement a une épaisseur supérieure à 2 mètres et trois ont une épaisseur inférieure à 0,5 mètre.

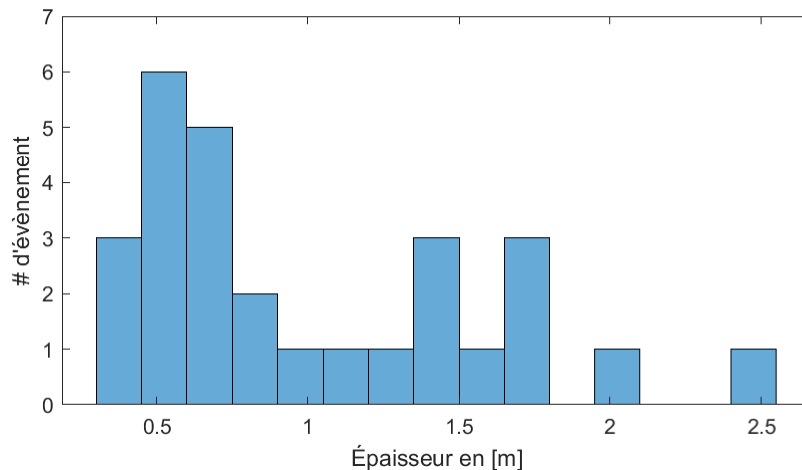


Figure 2.6. – Histogramme de la distribution de l'épaisseur de la masse mobilisée des événements sélectionnés.

La variation de la pente médiane du plan de rupture est illustrée dans la figure 2.7. On observe que la majeure partie des événements se déclenche entre 20 et 40°, avec deux événements extrêmes montrant une pente médiane de 18 et 47°. Une plage typique de variation des coulées de boue de versant est proche de 32° (OFEV, 2016), ce qui correspond aux observations basées sur l'analyse de la base de donnée.

Concernant le type de courbure de la zone de départ, neuf formes sont possibles selon les aspects de courbure planiforme et longitudinal, mettant en évidence les formes de la pente et décrites par les trois possibilités suivantes : linéaire, concave ou convexe (Fig. 2.8). L'aspect de la pente joue un rôle important dans l'accumulation et la circulation des fluides. Pour l'ensemble des événements choisis, la forme la moins fréquente est concave-concave (n°5), tandis que les formes concave-convexe (n°4), concave-linéaire (n°6) ainsi que linéaire-convexe (n°7) ne sont pas représentées (Fig. 2.9). Les formes les plus fréquents sont les profils convexe-linéaire (n°3)

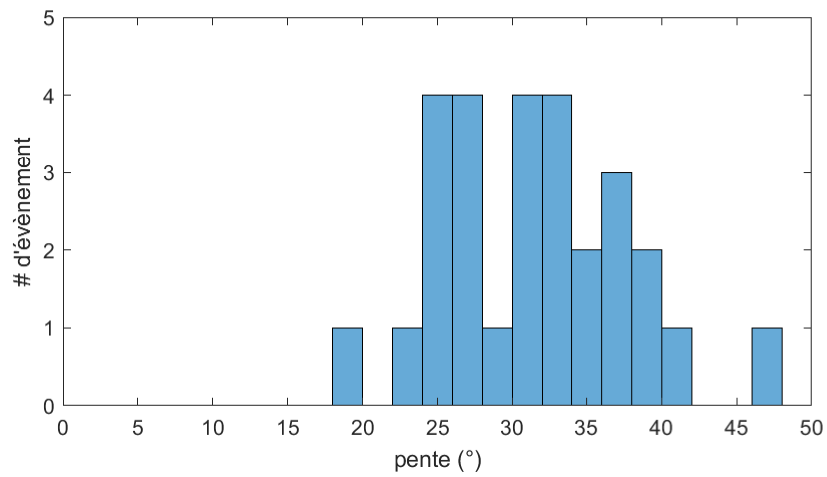


Figure 2.7. – Distribution de l'angle de pente dans la zone de départ.

et linéaire-concave (n°8) et concave-convexe (n°2). Enfin les formes linéaire-linéaire (n°9) et convexe-convexe (n°1) sont peu représentées.

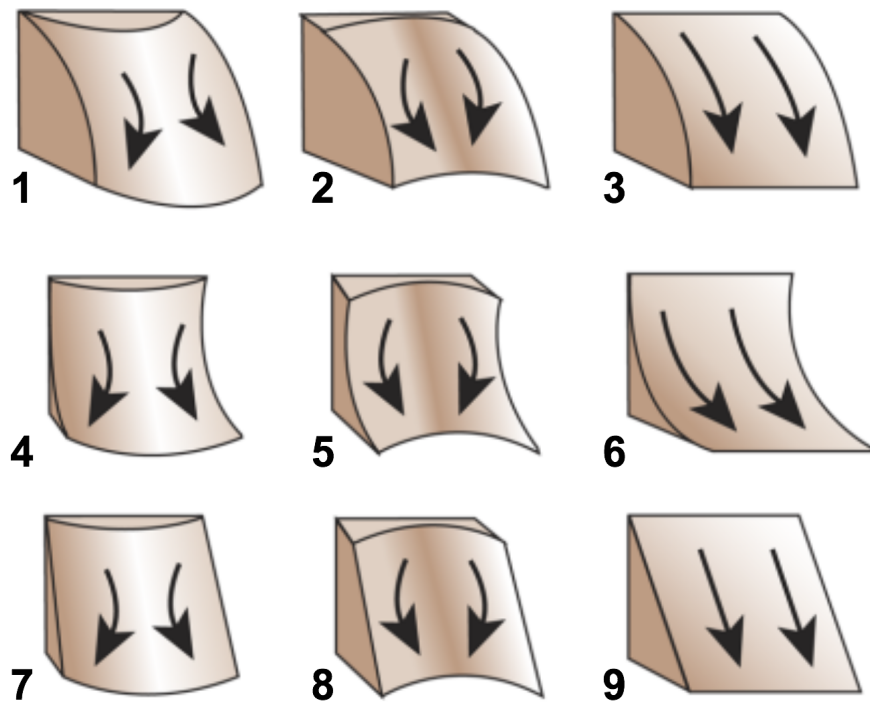


Figure 2.8. – Les neuf types de courbure possibles d'une pente analogue à WSL/BAFU/AGN (2018) (figure adaptée de ESRI (2016)).

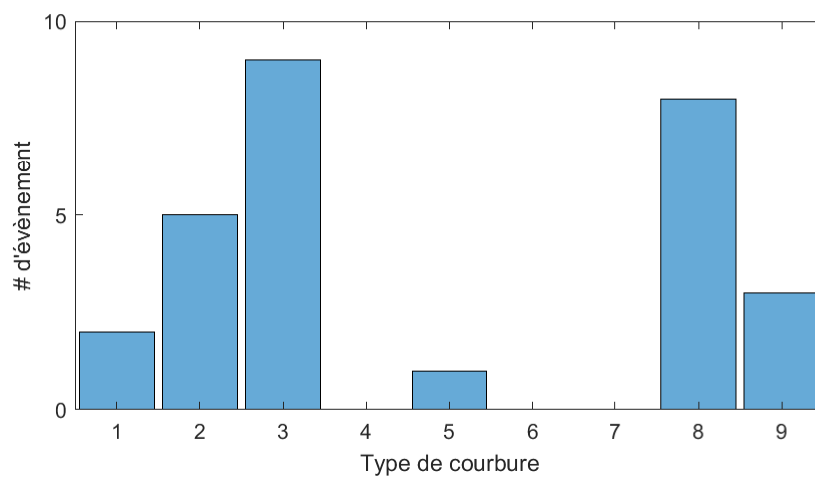


Figure 2.9. – Distribution de la forme de courbure des événements choisis.

3. Méthodes d'analyse de la zone d'arrachement

Afin d'analyser l'influence des facteurs de disposition sur la taille et la localisation des glissements superficiels nous avons utilisé des approches de rétro-analyse à une échelle de versant et à une échelle régionale. Dans le cadre de ce projet, nous avons spécifiquement analysé les effets :

- de la résolution du modèle de terrain
- des caractéristiques du sol
- des caractéristiques de la végétation (i.e., le renforcement du système racinaire)

Le résultat final de cette analyse est une fiche technique pour la modélisation de l'arrachement à l'échelle d'un versant.

3.1. Arrachement à l'échelle d'un versant

Afin d'analyser les effets à l'échelle d'un versant, nous avons choisi l'évènement de glissement superficiel/coulée de boue de Bombinasco de 2014 dans la commune de Curio (TI).

3.1.1. La coulée de boue de Bombinasco

La zone d'étude sélectionnée est située dans la fraction de Bombinasco, une exclave de la commune de Curio. La carte dans l'annexe C (C.10) montre l'endroit exact où le glissement superficiel s'est produit. La zone d'arrachement est située à environ 70 m au-dessus de la maison qui a été détruite par la coulée de boue et se trouve à une altitude de 638 m.a.s.l. Le périmètre d'investigation est situé dans une zone boisée au-dessus d'une propriété privée sur un versant exposé au sud-est, avec une inclinaison moyenne d'environ 35°. Cette zone est délimitée par deux torrents qui se rejoignent au sud du périmètre. L'analyse du MNT a permis de constater que la topographie de la zone de fissure avait déjà une forme de cuvette avant la coulée de débris. Après le glissement de terrain, cette forme est encore plus prononcée.

D'un point de vue géologique, la zone d'étude est située sur la nappe orobique supérieure, dans laquelle se trouvent des roches principalement cristallines (Pfiffner, 2015). Différentes roches mères sont trouvées dans cette zone (gneiss, moraines et dépôts fluvio-glaciaires), mais le périmètre d'investigation se trouve entièrement sur un sous-sol de type morainique. Le sous-sol est stratifié en deux parties. Une première partie consiste en une couche de moraine de fond imperméable et argileuse, sur laquelle repose une couche de moraine latérale meuble. Pour étudier les propriétés du sol, deux profils de sol ont été creusés et décrits. Les deux profils ont été réalisés sur le côté de la zone de la fissure. Les deux évaluations des sols ont permis de déterminer un type de sol uniforme. Il s'agit d'un Cryptopodsol, typique pour un sol insubrique.

Le climat de la région - un climat insubrique - est généralement caractérisé par des hivers secs et ensoleillés, avec des périodes de foehn mais aussi d'importantes chutes de neige. Les précipitations sont principalement concentrées au printemps et à l'automne. L'été est principalement sec et ensoleillé, mais il est aussi souvent interrompu par de forts orages. Selon MétéoSuisse (2014), la moyenne annuelle des précipitations dans la région se situe entre 1'700 et 2'000 mm. Ces valeurs se réfèrent à la période 1981 - 2010.

Le peuplement forestier sur ce site est un taillis de *Castanea sativa* suragé, mélangé à d'autres espèces de bois dur. Le mélange d'espèces du peuplement principal a été estimé à 90% de châtaignier nobles, les 10% restants sont principalement des chênes, des cerisiers et quelques robiniers qui se trouvent à la fin de la zone d'écoulement. Le peuplement secondaire est principalement composé de noisetiers et de houx, où l'on trouve

également des hêtres clairsemés dans cette couche. Actuellement, des cytiscus scoparius et des noisetiers ont pu bénéficier de l'ouverture dans la zone forestière touchée par la coulée de boue.

Selon le cadastre des événements naturels (StorMe) du canton du Tessin, 7 événements de ce type ont été identifiés dans un rayon de 2,5 km autour du glissement superficiel de Bombinasco (SF (Sezione Forestale), 2019). Tous ces glissements superficiels se sont produits entre le 5 et le 13 novembre 2014. La raison de cette forte activité de glissement est, entre autres, dû à l'automne pluvieux de 2014. En octobre 2014, des valeurs de précipitations de 100 à 140% supérieures aux valeurs moyennes ont été mesurées dans le canton du Tessin (MétéoSuisse, 2019). Les précipitations abondantes se sont poursuivies en novembre 2014, atteignant des valeurs de plus de 400 mm sur la surface totale du canton du Tessin pour ce mois (MétéoSuisse, 2019). Le 5 novembre 2014, deux glissements superficiels / coulées de boue ont eu lieu : le premier est le cas étudié ici (StorMe n°2014-R-0012), le second se trouve à proximité du premier (StorMe n°2014-R-0013).

Une étude non publiée du centre de la région sud de MétéoSuisse a montré que les 4 et 5 novembre 2014, plus de 250 mm de précipitations ont été mesurés sur le périmètre d'investigation. Dans la soirée du 5 novembre 2014, des valeurs maximales de 15 mm/h ont été mesurées sur une période de 2 heures. Selon cette étude, les valeurs mesurées ne sont pas exceptionnelles pour cette zone. Cependant, comme celles-ci sont survenues après une période de fortes pluies, il a été déterminé que ces deux jours constituaient néanmoins un événement significatif. Lorsqu'il a été constaté qu'aucune donnée sur la période de retour n'était disponible pour la station de Novaggio, celle-ci a été estimée sur la base des valeurs des stations voisines. Selon les estimations de MétéoSuisse, l'événement a été classé avec une période de retour de 20 à 50 ans. Selon le service forestier du canton du Tessin, le glissement s'est produit vers 18 heures (SF (Sezione Forestale), 2019). Apparemment, la couche imperméable de moraine de fond a retenue l'eau dans la couche supérieure créant d'énormes pressions d'eau interstitielle. 400 à 500 m³ de matériaux ont ainsi pu commencer à glisser. En raison de la forte teneur en eau, le glissement s'est transformé en coulée de boue et a entraîné avec lui la maison en contrebas. Fort malheureusement, deux personnes sont décédées à cause de cet impact.

3.1.2. Le modèle SOSlope

Afin de rétro-calculer l'arrachement du glissement superficiel de Bombinasco nous avons utilisé le modèle SOSlope (Cohen et Schwarz, 2017). SOSlope est un modèle hydromécanique de stabilité de versant, dans lequel la zone (i.e. le versant) étudiée est discrétisée en blocs (cellules) de même taille. Chaque cellule est reliée aux quatre blocs adjacents par des éléments de liaison (i.e., des ressorts ; fig. 3.1). Pour chaque pas de temps, le modèle calcule le facteur de sécurité (SF ou FOS en anglais) pour tous les blocs en comparant les forces stabilisatrices avec les forces déstabilisatrices. Dans le cas d'un ou plusieurs blocs ayant un SF inférieur à un, ils sont déplacés dans la direction de la force résultante et le SF est recalculé. Grâce aux éléments de liaison, les forces activées par les déplacements sont transmises aux cellules voisines. Ce mouvement relatif déclenche des redistributions instantanées de la force sur toute la pente, comme dans un système critique auto-organisé dont le modèle à blocs de ressort (voir Bak *et al.* (1988) et Cohen *et al.* (2009)) est un sous-ensemble. La boucle de calcul est répétée jusqu'à ce que tous les blocs soient soit stables ($SF \geq 1$) et que le système atteigne un nouvel équilibre (après un faible déplacement et/ou une répartition des forces sans déplacement), ou bien que certains blocs soient arrachés (i.e., déplacements supérieurs à quelques mètres), déclenchant un glissement de terrain pouvant résulter en une coulée de boue. Par rapport à d'autres modèles qui supposent un renforcement des racines comme cohésion additive, SOSlope prend en compte le renforcement des racines de manière détaillée. La distribution et les diamètres des racines dans les différents blocs sont basés sur le modèle de Schwarz *et al.* (2010). Le renforcement des racines est calculé à l'aide du RBMw (Root Bundle Model (Schwarz *et al.*, 2013)), prenant en compte la géométrie et l'élasticité de chaque racine. Il considère l'effet des racines à la fois en tension et en compression.

Les résultats de SOSlope sont stockés dans un fichier de types ESRI ASCII Raster (.asc) incluant :

- le déplacement pour chaque bloc discret
- le SF pour chaque bloc
- le renforcement des racines mobilisées en tenant compte des contraintes de traction, de compression et de cisaillement (basal)
- les paramètres hydrologiques tels que les pressions maximales d'eau interstitielle et la tension d'aspiration du sol (aspiration)
- la force passive du sol

— la profondeur du sol simulé

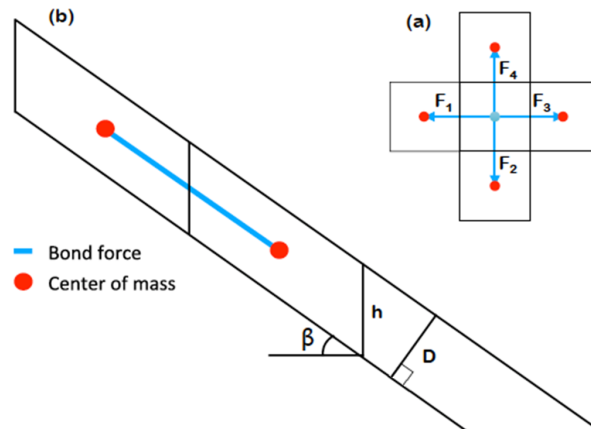


Figure 3.1. – (a) Vue en plan d'une cellule discrète avec ses quatre voisins montrant les forces de liaison. (b) Coupe verticale des cellules voisines montrant le centre de masse des cellules et l'emplacement de l'élément de liaison. β est la pente de la surface et h et D (respectivement M_A et M_D dans la figure 2.1) sont les épaisseurs de sol jusqu'à la base de glissement, mesurées respectivement verticalement et perpendiculairement à la surface.

3.1.3. Les données d'entrée de SOSlope

Pour utiliser le modèle SOSlope, il faut définir différents paramètres d'entrée. Il s'agit des propriétés du sol, de la caractérisation du peuplement forestier et du scénario de précipitation. Afin de caractériser les propriétés du sol, des échantillons de matériaux ont été prélevés et analysés en laboratoire. Ces matériaux ont été excavés à deux endroits différents : le premier échantillon de sol a été prélevé dans la zone de l'arrachement pour déterminer les caractéristiques de la surface de glissement. Le second échantillon a été prélevé à l'extérieur de la zone de l'arrachement pour déterminer les caractéristiques de la masse de glissement. Les deux échantillons de sol ont ensuite été remis au Département Architecture, bois et génie civil (BFH - AHB) pour déterminer le type de sol selon les normes USCS, la granulométrie ainsi que les limites de consistance d'Atterberg. Le matériau prélevé dans la zone d'arrachement superficiel de Bombinasco a été classé comme SP (classe USCS), ce qui correspond à un sable graveleux, sable mal calibré avec peu ou pas de fins). Les résultats de l'analyse de sol du BFH - AHB sont présentés en détail dans l'annexe B. Sur la base des résultats nous avons fixé les paramètres du sol dans la zone d'arrachement comme indiqué dans le tableau 3.1.

Table 3.1. – Les variables de sol utilisé dans SOSlope.

Variable	Valeur	Unité
cohésion	0 - 3.3	kPa
angle de frottement interne	36	°
densité de sol	1850	kg/m ³
porosité	0.38	-
teneur en eau initiale	0.15 - 0.35	m ³ /m ³
α^*	0.51	1/kPa
n^*	1.7	-

* Les paramètres α et n sont deux paramètres du modèle de van Genuchten (Van Genuchten, 1980) :
 α est relatif à l'inverse de la pression d'entrée d'air ($\alpha > 0$)
 n est une mesure de la distribution de la taille des pores ($n > 1$)

Pour définir le peuplement à prendre en compte pour la simulation de l'effet stabilisateur des racines, un inventaire forestier a été effectué. Comme l'ancien peuplement a été détruit par le glissement de 2014, il a été décidé de le reconstituer en calculant les valeurs moyennes des peuplements environnant la zone d'arrachement. La distribution spatiale des arbres dans le modèle a été répartie de manière égale sur tout le versant (peuplement

uniforme). Les variables forestières requises pour SOSlope sont le nombre de tiges et la moyenne des diamètres à la hauteur de la poitrine (DHP). Pour calculer ces derniers, trois placettes ont été échantillonnées. Elles ont été sélectionnées à trois endroits autour de la zone d'arrachement : deux d'entre elles sont situées sur les côtés et la troisième au-dessus. Les placettes ont une forme carrée de 10 m x 10 m. Dans chaque placette, pour chaque arbre et arbuste avec un DHP ≥ 2 cm nous avons relevés le DHP et l'espèce. Les valeurs moyennes résultant des placettes ont été utilisées dans le modèle (1200 tiges/ha avec 16 cm de DHP, distribution uniforme).

Afin de représenter la topographie, nous avons utilisé le modèle numérique du terrain (MNT) de Swisstopo avec une résolution de 2 mètres, dont nous avons extrait le raster TWI (Topographic Wetness Index). Le TWI est un indice d'humidité en régime permanent, utilisé pour quantifier l'impact de la topographie sur les processus hydrologiques. Il est calculé selon l'équation suivante : Le TWI est un indice

$$TWI = \ln \left(\frac{A_{\text{capt}}}{\tan(\beta)} \right) \quad (3.1)$$

Ici, β est l'angle de la pente A_{capt} est la zone de captage spécifique de la pente ascendante. Autrement dit c'est la surface délimitée par le bassin versant spécifique pour chaque cellule. Le TWI est calculé pour une plus grande étendue que la zone d'étude réelle à couvrir afin de s'assurer que toutes les apports d'eau dans la zone d'étude venant des grands bassins versants en amont sont pris en compte. Il existe plusieurs versions pour le calcul du TWI , mais il s'avère qu'aucune distinction claire ne peut être faite sur la méthode qui se rapproche le plus de la réalité (Sorensen *et al.*, 2006), c'est pourquoi nous choisissons d'utiliser celle de Beven et Kirkby (1979), qui est la plus fréquemment utilisée.

Pour reproduire le glissement de 2014 nous avons simulé un scénario de précipitation de 15 mm/hr pendant 2 heures avec des rasters d'entrée ayant une résolution de 2 m. Pour calibrer la cohésion, nous avons fait différentes répétitions de simulation, en augmentant la valeur de la cohésion (en commençant par 0 kPa) jusqu'à ce que les résultats soient cohérent avec l'évènement étudié en terme de répartition spatiale en conservant tous les autres paramètres. Ensuite nous avons analysé l'effet de la résolution des rasters d'entrée sur les résultats en réduisant la résolution du MNT et du raster TWI de 2 m à 5 m.

Afin d'étudier l'influence de l'état de la forêt, un état optimal des forêts et une situation sans forêt ont été calculés en plus de la forêt reconstituée à l'état avant l'évènement de 2014. Pour définir l'état optimal, nous avons fixé une densité de 365 tiges/ha avec un DHP moyen de 30 cm. Pour les différents scénarios de forêt (état actuel, état optimal et sans forêt), nous avons simulé des intensités de précipitations (en mm/hr) pour les périodes de retour 30, 100 et 300 ans. Comme les données pour le périmètre de l'étude ne sont pas disponibles, elles ont été dérivées de la carte "Précipitations extrêmes ponctuelles de différentes durées et périodes de retour 1901 - 1970" ((Jensen *et al.*, 1997)). Comme cette carte ne montre que les périodes de retour pour 2,33 et 100 ans, une fonction a dû être dérivée à partir de ces données. En utilisant RStudio, les coefficients d'une fonction logarithme double ont été extrapolés, ce qui permet de dériver les quantités de précipitations en fonction de l'annualité :

$$INT_P(PR) = e^{(3.4+0.21*\log(PR))} \quad (3.2)$$

Ici, PR est la période de retour et INT_P est l'intensité de précipitation rétrocalculée. La fonction 3.2 a donné des valeurs de 60 mm/hr pour l'évènement de 30 ans, 80 mm/hr pour 100 ans et 100 mm/hr pour 300 ans.

3.2. Arrachement à l'échelle d'une région

Afin d'analyser l'arrachement des glissements superficiels à l'échelle d'une région, nous avons utilisé le modèle SlideforMAP qui permet d'étudier l'influence des facteurs de disposition à l'échelle régionale (par exemple, l'état des forêts, les propriétés du sol, l'hydrologie). Dans SlideforMAP, un équilibre de force 3D est supposé avec des formes de glissements superficiels ellipsoïde (Rickli et Graf, 2009). C'est un modèle stochastique de type équilibre limite qui crée un grand nombre de glissements de terrain aléatoires et calcule le SF (facteur de sécurité) en utilisant les hypothèses standard d'équilibre limite, de pente infinie et de Mohr-Coulomb. La méthode est illustrée par les équations 3.3 à 3.7.

$$SF = \frac{F_{res}}{F_{par}} \quad (3.3)$$

$$F_{par} = (m_{soil} + m_{veg}) \cdot g \cdot \sin(\beta) \quad (3.4)$$

$$F_{res} = \frac{Circ_{ls}}{2} \cdot RR_{lateral} + F_{res,basal} \quad (3.5)$$

$$F_{res,basal} = A_{ls} \cdot SC_{scen} + A_{ls} \cdot RR_{basal} + F_{per,eff} \cdot \tan(\phi) \quad (3.6)$$

$$F_{per,eff} = (m_{soil} + m_{veg}) \cdot g \cdot \cos(\beta) - P_{water} \quad (3.7)$$

Dans ces équations F_{par} est la force de traction en N, F_{res} est la force résistante en N, m_{soil} est la masse des matériaux dans la zone d'arrachement en kg, m_{veg} est la masse de la végétation en kg, g est la pesanteur normale (9.81 m/s^2) et β est la pente en degrés.

$Circ_{ls}$ est la circonférence du glissement, $RR_{lateral}$ est le renforcement latérale des racines en N/m et $F_{res,basal}$ est la force résistante sans racines en N. A_{ls} est la surface du glissement, SC_{scen} est la cohésion du sol en kPa dans le scénario calculé, $RR_{root\ basal}$ est le renforcement basale des racines en kPa, $F_{per,eff}$ est la force résistante effective perpendiculaire en N, ϕ est l'angle du frottement interne et P_{water} est la pression de l'eau (interstitielle) en kPa.

Les hypothèses hydrologiques sont basées sur une version adaptée de Topmodel (voir Beven et Kirkby (1979)). On suppose que la fraction de saturation de chaque cellule est liée à sa zone de captage spécifique et à son angle de pente. L'équation centrale est présentée dans l'équation 3.8 qui est basé sur le travail de Montgomery et Dietrich (1994).

$$S = \frac{R \cdot TWI}{T} \quad (3.8)$$

Dans cette équation, S est la fraction de saturation. R est l'intensité des précipitations en m/jour. T est la transmissivité en m/jour. La transmissivité est calibrée à l'aide de l'équation 3.8 en supposant que R est l'intensité des précipitations centennales et que pour cette intensité, une fraction fixe des cellules est totalement saturée. Cette fraction de saturation influence la pression d'eau interstitielle selon l'équation 3.9. Une hypothèse de cette approche est que le flux d'eau souterraine de la zone est dominé par des macropores qui ont la capacité d'atteindre facilement une situation d'équilibre avec les précipitations. Dans les calculs suivants, nous supposons que cela se produit en une heure.

$$P_{water} = SD \cdot S \cdot \gamma \quad (3.9)$$

Ici, P_{water} est la pression d'eau interstitielle en kPa, SD est la profondeur du sol en m, γ est le poids spécifique de l'eau (9.8 kN/m^3). De plus, la cohésion est influencée par la saturation du sol selon l'approche linéaire suivante :

$$SC_{scen} = (1 - S) \cdot SC \quad (3.10)$$

Ici, SC est la cohésion du sol de base définie par l'utilisateur en kPa. SC_{scen} ne peut pas être plus petit que la valeur minimale de la cohésion SC_{min} :

$$SC_{min} = 0.5 \cdot SC \quad (3.11)$$

SlideforMAP génère un grand nombre de zones d'arrachement de glissement hypothétiques avec des coordonnées aléatoires selon une variable qui s'appelle *LS_dens*. Cela définit le nombre de zones de glissement à générer par ha. La surface de la zone d'arrachement de chaque glissement est choisie aléatoirement dans une distribution décrite par Malamud *et al.* (2004), qui suit une fonction de type Weibull. La cohésion initiale et l'angle de frottement interne sont choisis dans des distributions normales définies par une valeur moyenne et d'écart-type données par l'utilisateur. La profondeur du sol pour chaque cellule dans la zone d'étude est également définie par une distribution normale, avec une moyenne de 1.0m et un écart type de 0.5m, corrigée par la pente. À titre d'exemple, pour une pente de 30°, 95% des valeurs sont comprise entre 0.1m et 1.7m

Les équations 3.4 à 3.7, mettent en évidence que SlideforMAP prends en compte trois propriétés de la végétation :

- le poids de la végétation
- le renforcement latéral des racines
- le renforcement basal des racines

Le renforcement latéral des racines dépend de l'espèce et du diamètre. Pour cette étude, nous avons utilisé seulement l'espèce épicéa (*Picea abies* (L.) H. Karst, 1881). Le poids des arbres par cellules dépend de leur position, leur hauteur et leur DHP. Ces dernier sont obtenu par une détection des arbres individuels, basée sur une analyse de type *local maxima* des modèles numériques de la surface obtenus par scannérisations laser.

3.2.1. Les zones d'étude pour SlideforMAP

Nous avons choisi trois zones d'étude (Eriz, BE ; Trub, BE ; St. Antoniën (StA), GR) pour analyser l'arrachement des glissements superficiels à l'échelle régionale. Ces trois zones sont visualisées dans la figure 3.2. Afin de tester l'applicabilité de SlideforMAP, ces trois zones sont différentes concernant la superficie, la topographie, la géologie et la densité des événements historiques de glissement superficiels.

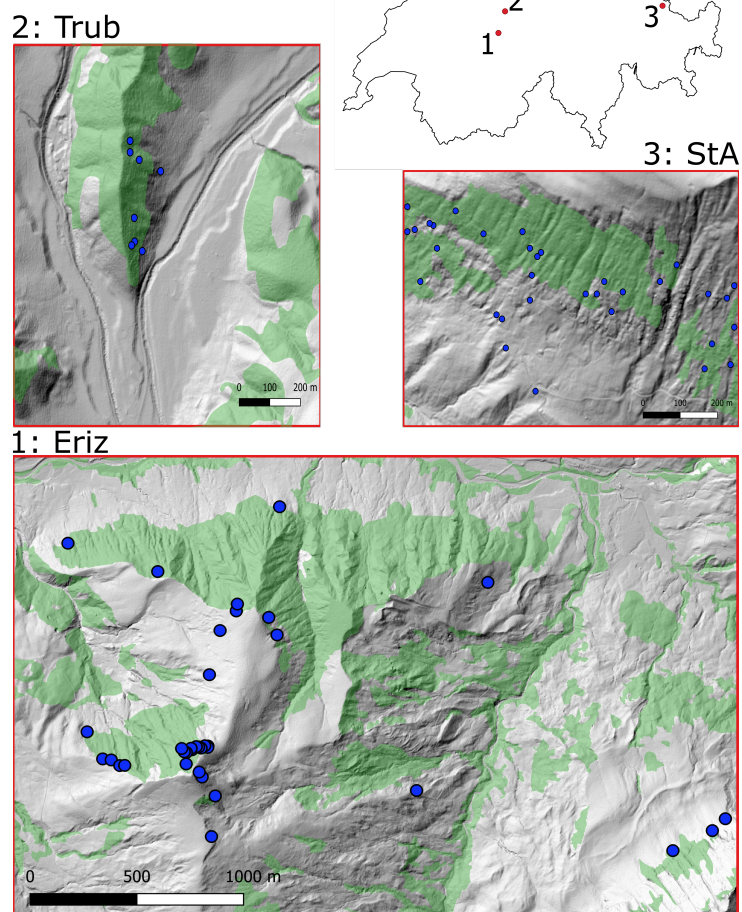


Figure 3.2. – Visualisation des trois zones d'étude utilisées pour l'application de SlideforMAP. En bleu : les événements historiques de glissement superficiels; en vert : la couverture forestière; en arrière-plan : l'ombrage de SwissAlti3D (Swisstopo).

La géologie dans la zone d'Eriz se compose principalement de la molasse subalpine couverte par des moraines, mais en allant vers le sud-est, on trouve également une fine bande de Flysch avant d'arriver dans les marnes et les calcaires de la nappe du Wildhorn. La zone de Trub se trouve dans la Molasse marine supérieure et la zone de St. Antonien dans le Flysch du Prättigau, partiellement couvert par une moraine de fond (Moos *et al.*, 2016). Les forêts dans les trois zones sont dominées par l'épicéa, localement mélangé avec des feuillus (principalement du hêtre). D'autres caractéristiques des zones d'étude sont données dans le tableau 3.2. Pour chaque zone, nous avons extrait les événements historiques de glissement superficiels de la base de données sur les glissements de terrain peu profonds et les coulées de boue de versant de l'OFEV-WSL. Dans le chapitre 4, section 4.2, nous présentons les statistiques de base sur la surface, la pente et la profondeur des glissements dans les trois zones en comparaison avec tous les événements de la base de données de l'OFEV-WSL.

Table 3.2. – Caractéristiques des trois zones d'étude pour l'analyse de l'arrachement à l'échelle régionale.

Zone (Canton)	Coordonnées LV03	Surface km ²	PAM* mm	Zone d'altitude m A.S.L.	N **
Eriz (BE)	628'317/180'451	7.5	1710	960 - 1760	8
Trub (BE)	634'535/200'489	1.0	1380	820 - 1020	37
StA (GR)	779'367/205'507	0.6	1365	1540 - 2000	33

* PAM = la précipitation annuelle moyenne basée sur les données de MétéoSuisse de 1981 à 2010 des stations de Napf, Langgau im Emmental et Arosa ; N** = Nombre d'évènements historiques dans la zone

La validation de SlideforMAP dans les trois zones d'étude est effectuée à l'aide de la méthode AUC (voir Metz (1978) et Fawcett (2006)). La base est une représentation spatiale de l'inventaire des glissements de terrain dans un raster booléen (0 = aucun glissement superficiel historique, 1 = glissement superficiel historique présent). L'index AUC prend en compte les vrais et faux positifs ainsi que les vrais et faux négatifs et définit l'exactitude du modèle sur une échelle de 0,5 à 1,0 où 0,5 n'étant pas meilleur qu'une estimation aléatoire et 1,0 étant une prédiction parfaite.

De plus, nous avons effectué une analyse de sensibilité à l'aide de la technique de *hypercube latin sampling* (LHS) (voir McKay *et al.* (1979)). Cette technique utilise des échantillons aléatoires de variables sur des plages prédéfinies. L'influence de chaque variable individuelle sur la variable de réponse est ensuite testée à l'aide du coefficient de corrélation des rangs de Spearman (PRCC). Le tableau 3.3 donne un aperçu des variables testées et de leurs fourchettes dans l'analyse de LHS. Au final, 800 différentes combinaisons de paramètres ont été testés par zone d'étude afin de calculer les valeurs PRCC.

Table 3.3. – Variables sélectionnées et les fourchettes de valeurs testées dans l'analyse LHS.

Variable	Unité	Description	Fourchette de valeurs	
RES	m	résolution du MNT et raster TWI	0.5	- 10
LS_dens	1/ha	densité des glissements générés	80	- 320
SD	m	profondeur du sol	0.1	- 2.0
P	mm/h	intensité de pluie	50	- 200
Rho (ρ)	kg/m ³	densité du sol	1400	- 2000
SC _{min}	kPa	cohésion du sol min. sous des conditions saturé	0	- 5
SC	kPa	cohésion du sol	0	- 5
Phi (ϕ)	°	angle de frottement interne	20	- 40
RR	kPa	renforcement des racines	1	- 15

4. Résultats de l'analyse de la zone d'arrachement

4.1. Résultats à l'échelle d'un versant

Le premier objectif de cette étude était d'essayer de reproduire l'événement de Bombinasco de 2014 avec le modèle SOSlope. En raison des conditions météorologiques qui existaient avant le glissement de terrain, la teneur en eau initiale a été fixée à 0,35. Comme le modèle SOSlope est fortement influencé par les valeurs de cohésion, celle-ci a dû être calibrée afin de reproduire l'événement qui s'est produit. Pour ce faire, tous les paramètres (sauf la cohésion) ont été fixés. L'étalonnage a été effectué avec différentes répétitions de simulation, en augmentant la cohésion en commençant à 0 kPa jusqu'à ce que les résultats soient satisfaisants. Le meilleur résultat a été obtenu avec une cohésion de 3,3 kPa et un MNT de résolution de 2m. Les résultats de cette simulation sont présentés à la figure 4.1.



Figure 4.1. – Résultats des simulations de SOSlope avec des rasters d'entrée de 2 m (carte en-dessus) et avec 5 m (carte en-dessous). Le carré noir avec 'M' indique la maison détruite.

Ce résultat indique une valeur de cohésion plus grande que celui qu'on attend pour un sol de type SP (0,5 kPa). Ce fait souligne la grande sensibilité du modèle à la cohésion. Les simulations avec des valeurs de cohésion plus faibles (≤ 2 kPa) ont produit des zones d'arrachement plus importantes, qui ne correspondaient pas à la réalité. Des simulations avec des valeurs de cohésion plus élevées ont montré que toute la pente est stable, avec des valeurs de déplacement de l'ordre de 1 à 2 décimètres.

Comme le montre la figure 4.1, la surface de la zone d'arrachement simulée (343 m²) est plus grande (+ 170 %) que celle indiquée dans StorMe. La figure 4.1 montre également que la simulation réalisée avec le MNT de 5 mètres a généré un résultat complètement différent de celui obtenu avec 2 mètres. Le déplacement maximal simulé était de l'ordre de 4 cm. C'est pourquoi aucun arrachement n'a été identifié.

La seconde analyse de la sensibilité de SOSlope avait au centre la teneur initiale en eau du sol. En plus de la valeur 0,35, qui a été utilisée dans toutes les simulations, d'autres simulations avec 0,15, 0,20, 0,25 et 0,30 ont été réalisées. Les résultats obtenus ont montré qu'une initiation du glissement se déclenche seulement à une teneur initiale en eau du sol de 0,35. Toutes les autres simulations ont seulement données des valeurs de déplacement de plusieurs cm, jusqu'à un maximum de 8 cm.

Les simulations ont été réalisées avec les trois conditions forestières suivantes (1 - état actuel : 1200 tiges/ha, DHP moyen 16 cm ; 2- état idéal de la forêt : 365 tiges/ha avec un DHP moyen de 30 cm ; 3 - sans forêt). Les résultats pour l'état actuel ont montré que les zones d'arrachement et les déplacements obtenus étaient tous très similaires pour toutes les périodes de retour (voir figure 4.2). Les simulations sans forêt ont produit des zones d'arrachement similaires aux scénarios avec la forêt actuelle, sauf le scénario 300a (+ 5%). Pour l'état optimal des forêts, aucun déplacement n'a été simulé avec une intensité de précipitation de 60 mm/h (période de retour de 30 ans). Pour les scénarios 100 et 300 ans, les zones d'arrachement ainsi que les déplacements étaient légèrement plus faibles en comparaison avec l'état actuel de la forêt.

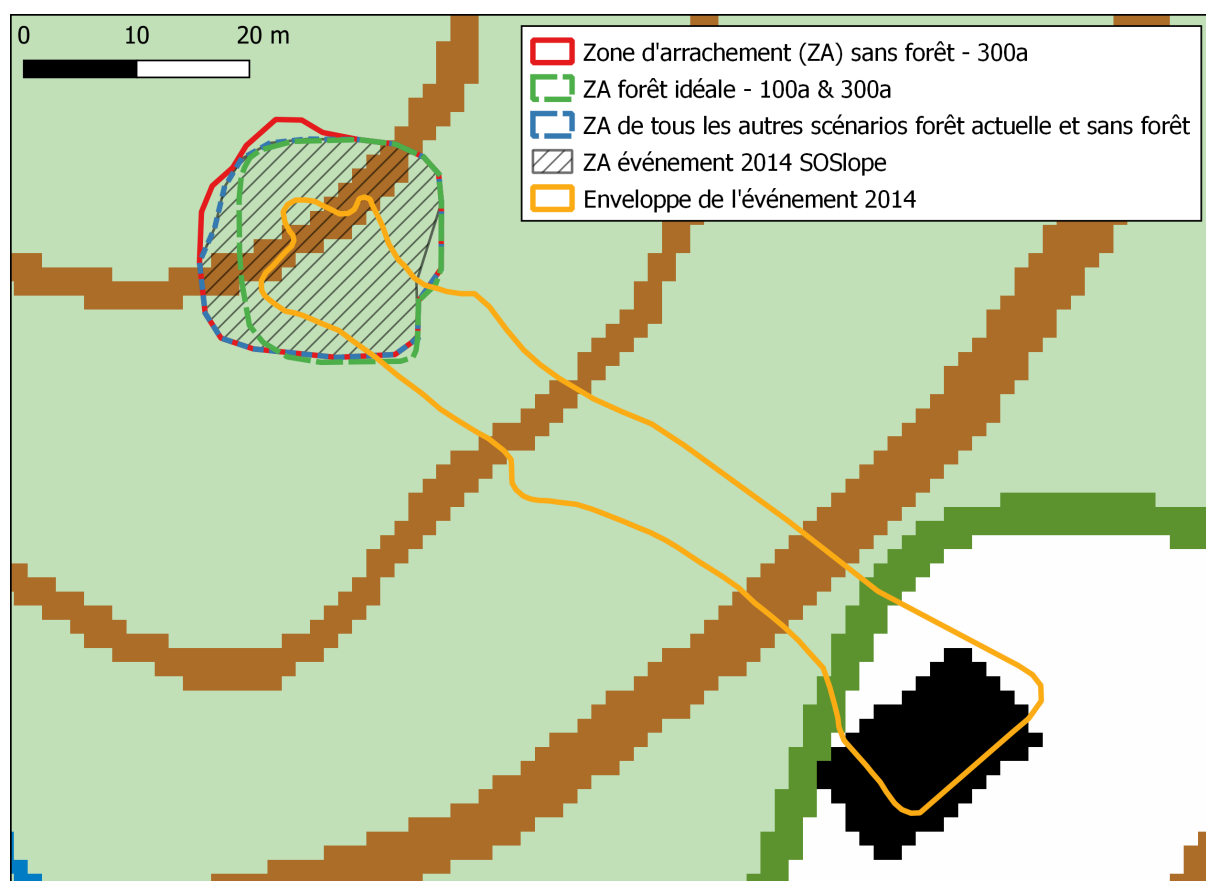


Figure 4.2. – Les zones d'arrachement (ZA) simulées pour les trois scénarios de forêt et les trois périodes de retour comparées avec la ZA de l'événement de 2014 produit par SOSlope ainsi qu'avec l'enveloppe de cet événement.

Afin d'étudier et de quantifier ces effets, les résultats en termes de renforcement des racines ont été comparés. La figure 4.3 montre la comparaison concernant le renforcement latéral des racines entre l'état actuel (glissement déclenché) et un état optimal de la forêt (aucun glissement simulé). La plus grande contribution de la forêt, en termes de renforcement des racines à l'état optimal de la forêt est clairement visible, en particulier dans les fissures autour de la zone d'arrachement. Les valeurs maximales pour le renforcement des racines latérales sont

de 17 kN pour la forêt actuelle et de plus de 32 kN pour la forêt idéale, soit presque le double des valeurs. Les valeurs maximales du renforcement basal des cellules racinaires sont également très différentes : près de 1,5 kN pour le peuplement existant et 3,3 kN pour la forêt idéale. Les racines sous pression n'ont pas été prises en compte, car selon Cohen et Schwarz (2017), la contribution la plus efficace est apportée par la rétention en traction de la zone racinaire.

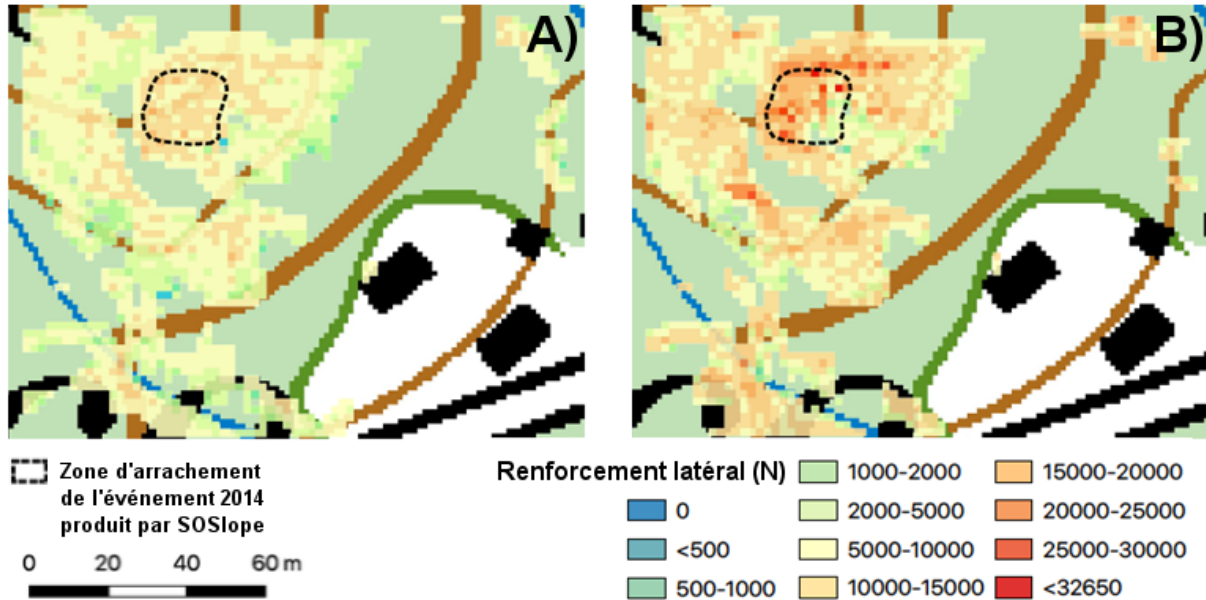


Figure 4.3. – L'effet des racines pendant un événement trentennal ; a) renforcement des racines latéral dans la forêt actuelle, b) renforcement des racines latéral dans une forêt idéale.

4.2. Résultats à l'échelle d'une région

Des informations statistiques sur les glissements superficiels historiques sont présentées dans la figure 4.4. Les glissements dans la région de St. Antoniën et Trub ont eu lieu en 2005 pendant ou peu après les fortes pluies du mois d'août. Les glissements de terrain de Eriz ont eu lieu en 2012, en relation avec les fortes pluies du mois de juillet de cette année. Dans l'analyse, nous avons comparés les glissement dans les trois zones d'étude avec l'ensemble des données disponibles dans la base de données de l'OFEV-WSL.

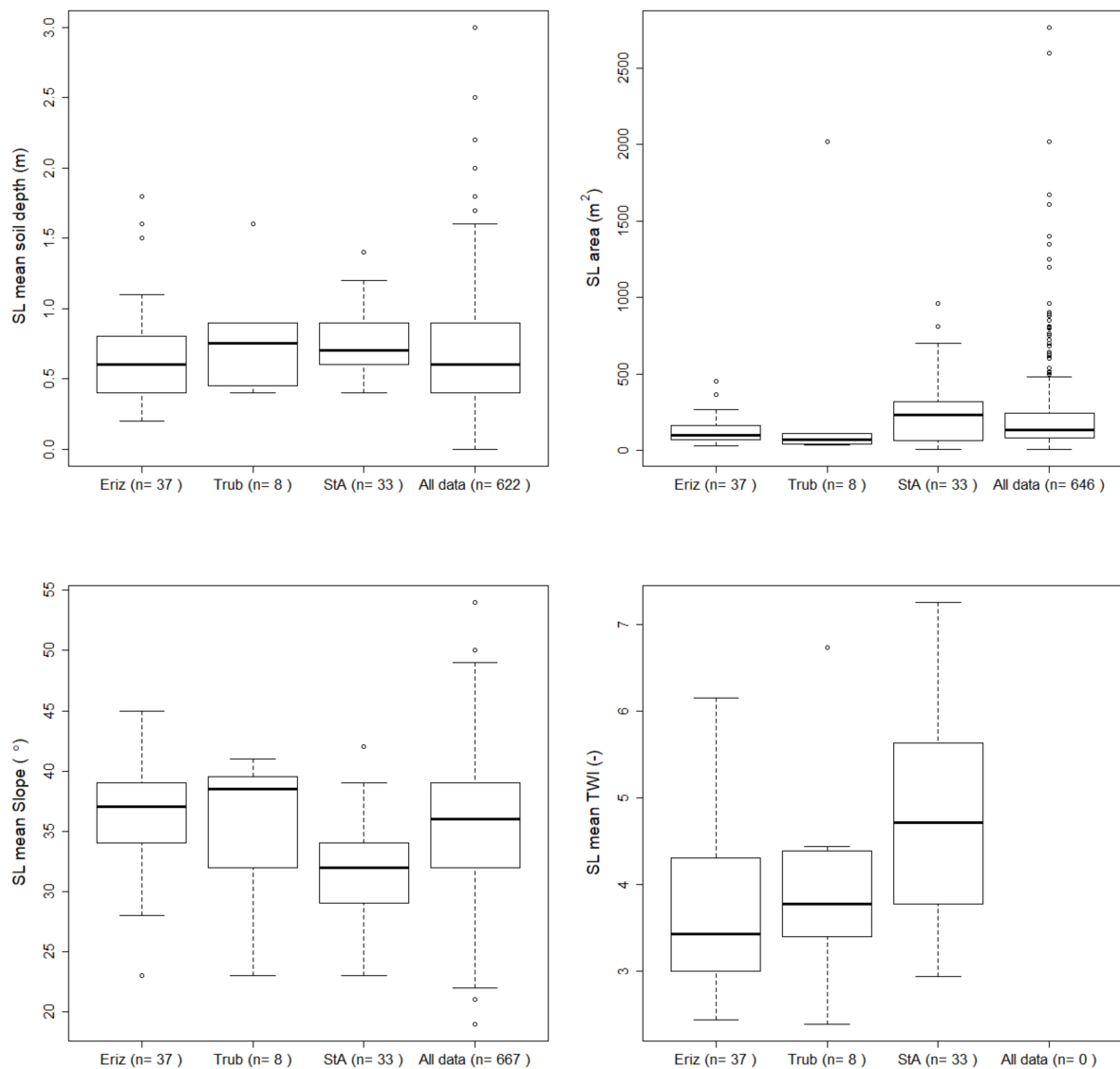


Figure 4.4. – Dans le sens horaire : box plot de la profondeur moyenne du sol de la zone d'arrachement (ZA) pour les trois zones d'études et l'ensemble des données (All data) ; box plot de la surface des ZA ; box plot de la pente moyenne des ZA ; box plot des valeurs de TWI moyennes des ZA.

Les moyennes et les distributions des valeurs PRCC des 800 tests de sensibilité LHS sont présentés dans la figure 4.5. Les valeurs moyennes de $PRCC \geq 0.2$ montrent une grande sensibilité de SlideForMAP à ce paramètre. Ici, les valeurs positives indiquent que l'augmentation du paramètre étudié augmente l'instabilité de la pente. Les résultats montrent que des estimations précises des paramètres de profondeur du sol (SD), de la cohésion (SC), de l'angle de frottement interne (Phi) et le renforcement des racines (RR) sont de la plus haute importance. De plus, il est clair que SlideforMap peut être utilisé pour tester différents scénarios de précipitation (P), car cela reste un des paramètres le plus sensible. Il est également montré que les variables qui influencent énormément les temps de calcul du modèle n'ont que peu ou pas d'influence sur les résultats, comme la résolution des rasters d'entrées (MNT et TWI) et la densité des glissements générée (i.e., au final, cela détermine le nombre de glissements à évaluer). Par conséquent, SlideforMap peut être utilisé à une échelle régionale avec une résolution relativement grossière (5 ou 10 m).

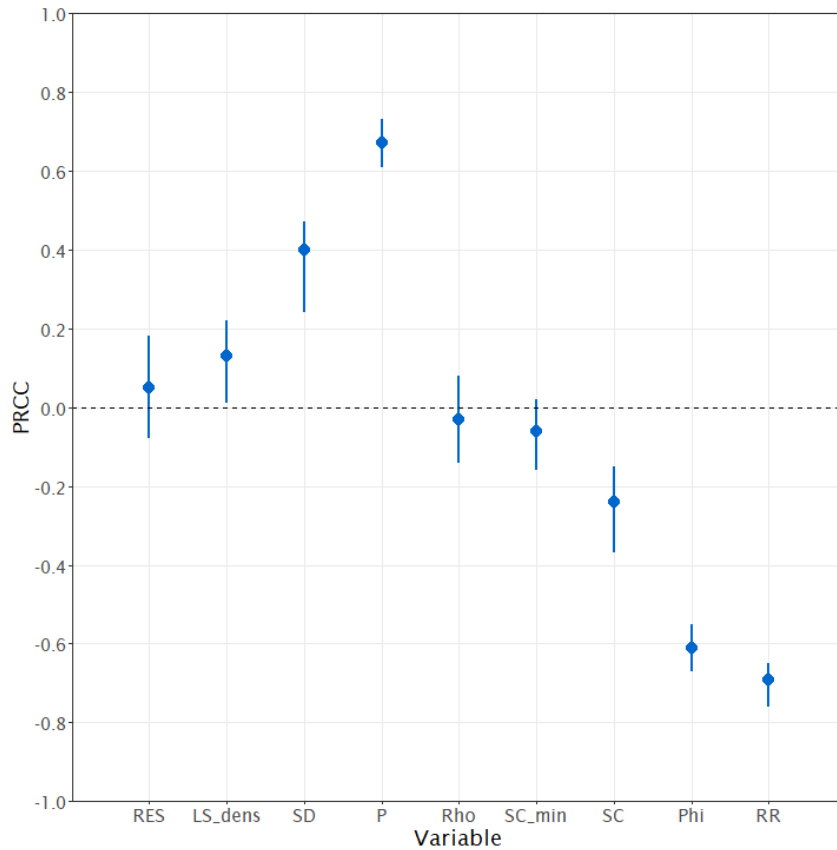
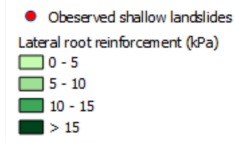
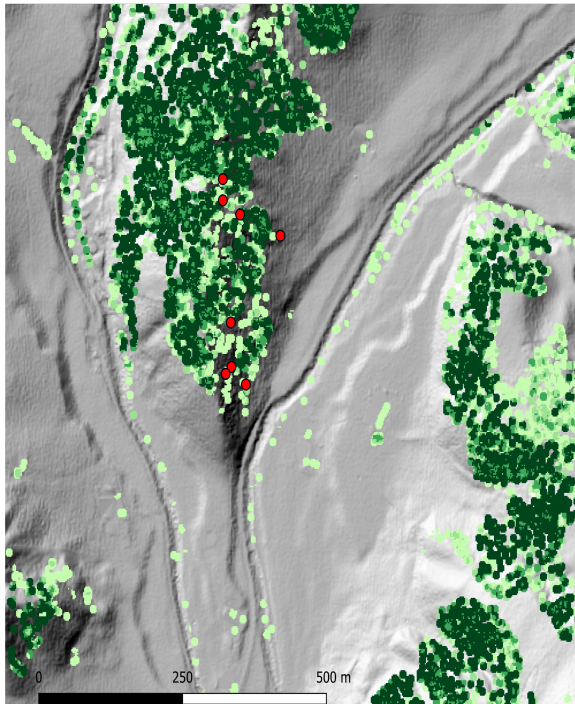


Figure 4.5. – Les moyennes et les distributions des valeurs PRCC pour toutes les variables testées dans l'analyse de sensibilité LHS (*RES* = résolution des rasters d'entrées; *LS_dens* = densité des glissements générés; *SD* = profondeur du sol; *P* = intensité de pluie; *RHO* (ρ) = densité du sol; *SC_{min}* = cohésion du sol min. sous des conditions saturé; *SC* = cohésion du sol; *Phi* (ϕ) = angle de frottement interne; *RR* = renforcement des racines).

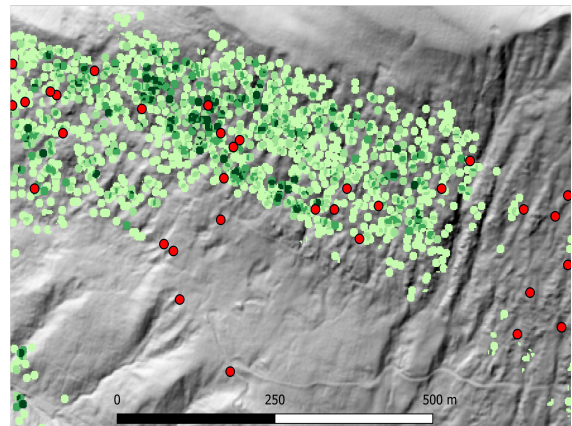
Comme le montre l'analyse de sensibilité, le renforcement des racines latérales et basales (*RR*) est un facteur important de prédiction correcte de l'instabilité. La distribution spatiale du renforcement racinaire latéral, résultant des arbres détectés et le calcul de SlideforMap, est donnée dans la figure 4.6.

Sur la base de ces résultats, ainsi que ceux de SOSlope, nous pouvons conclure qu'il est primordial d'avoir une bonne représentation du terrain, du sous-sol et de la végétation. Ceci est valable pour tous les modèles d'arrachement qui dépendent d'un modèle de terrain numérique, et qui prennent en compte les caractéristiques du sol ainsi que le renforcement spatiale du système racinaire de manière explicite. Concernant les caractéristiques du sol, la connaissance de la profondeur de celui-ci est déterminante, et l'importance de l'angle de frottement interne ou de la cohésion du sol dépend du modèle utilisé. Par conséquent, pour les analyses à des échelles locales, une analyse du terrain comprenant l'échantillonnage de sol est un prérequis.

Trub



Sta



Eriz

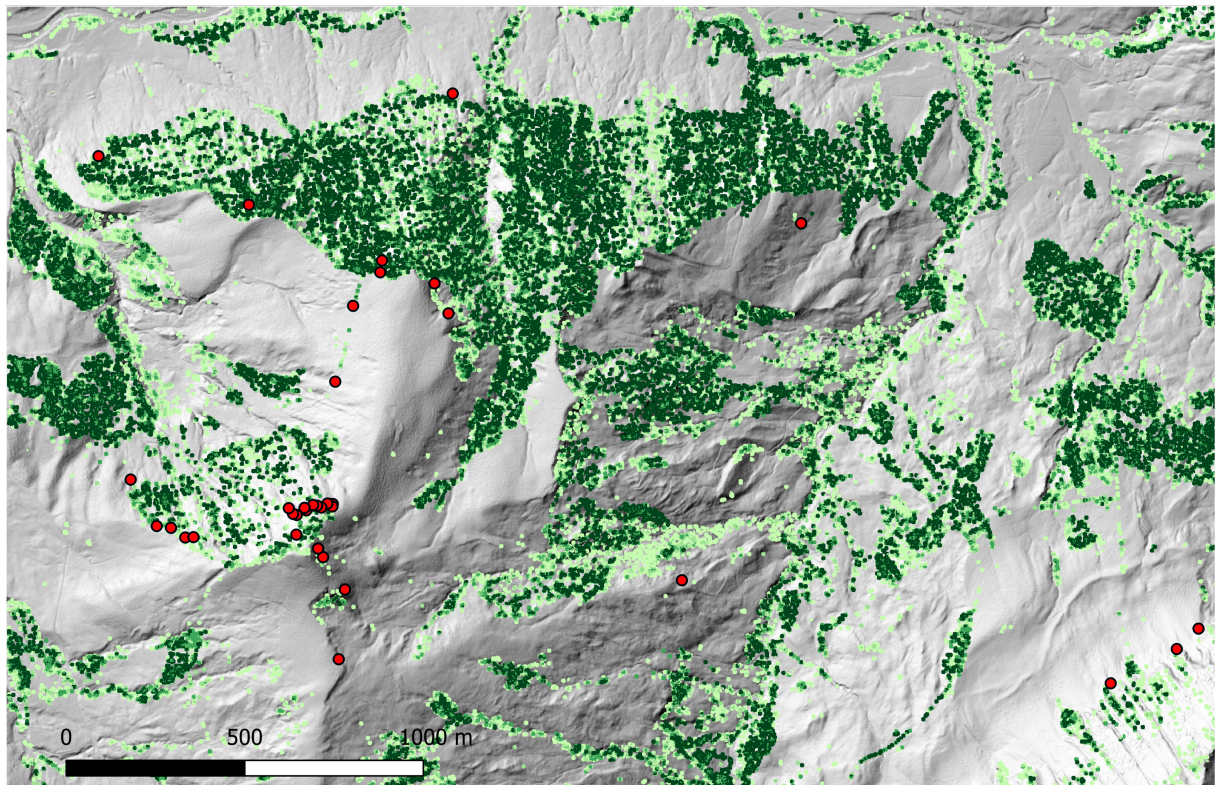
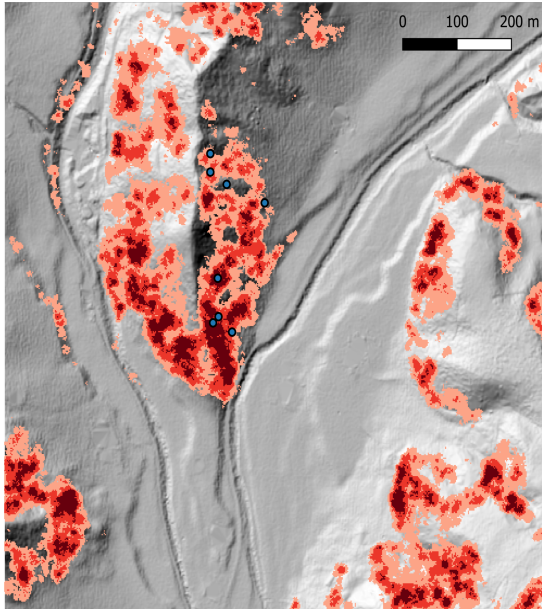


Figure 4.6. – La distribution spatiale du renforcement des racines utilisé par SlideforMap dans les trois zones d'étude.

Le résultat principal de SlideForMAP - la probabilité de l'arrachement des glissements superficiels par cellule - pour les trois zones d'étude est présenté dans la figure 4.7. La comparaison des événements historiques avec la probabilité d'arrachement (*landslide susceptibility*), exprimé en AUC, montre que la prédiction dans la zone d'Eriz et de Trub fonctionne de manière très satisfaisante. En revanche, dans la zone de StA (Saint Antönien), il y a encore un potentiel d'amélioration (voir tableau). Afin d'étudier le gain de précision en utilisant la détection des arbres individuels nous avons également calculé l'AUC basé sur une approche générale de renforcement des racines. Pour cela, nous avons attribué une valeur uniforme de 2 kN pour toutes les zones forestières selon le modèle topographique du paysage (swissTLM3D) de Swisstopo. Les résultats montrent que le gain est minimal.

Trub



● Observed shallow landslides

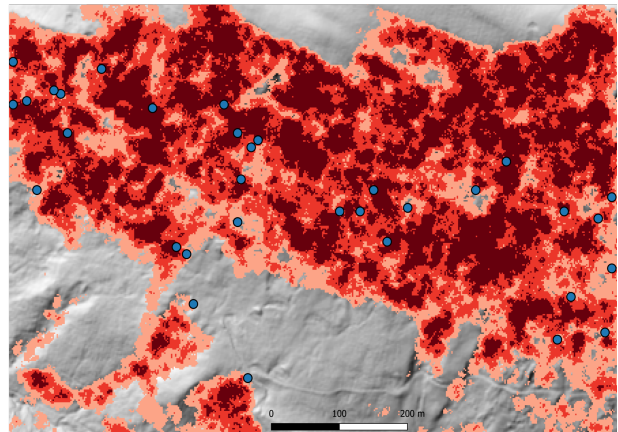
Shallow landslide susceptibility (-)

25 - 50 %

50 - 75 %

> 75 %

StA



Eriz

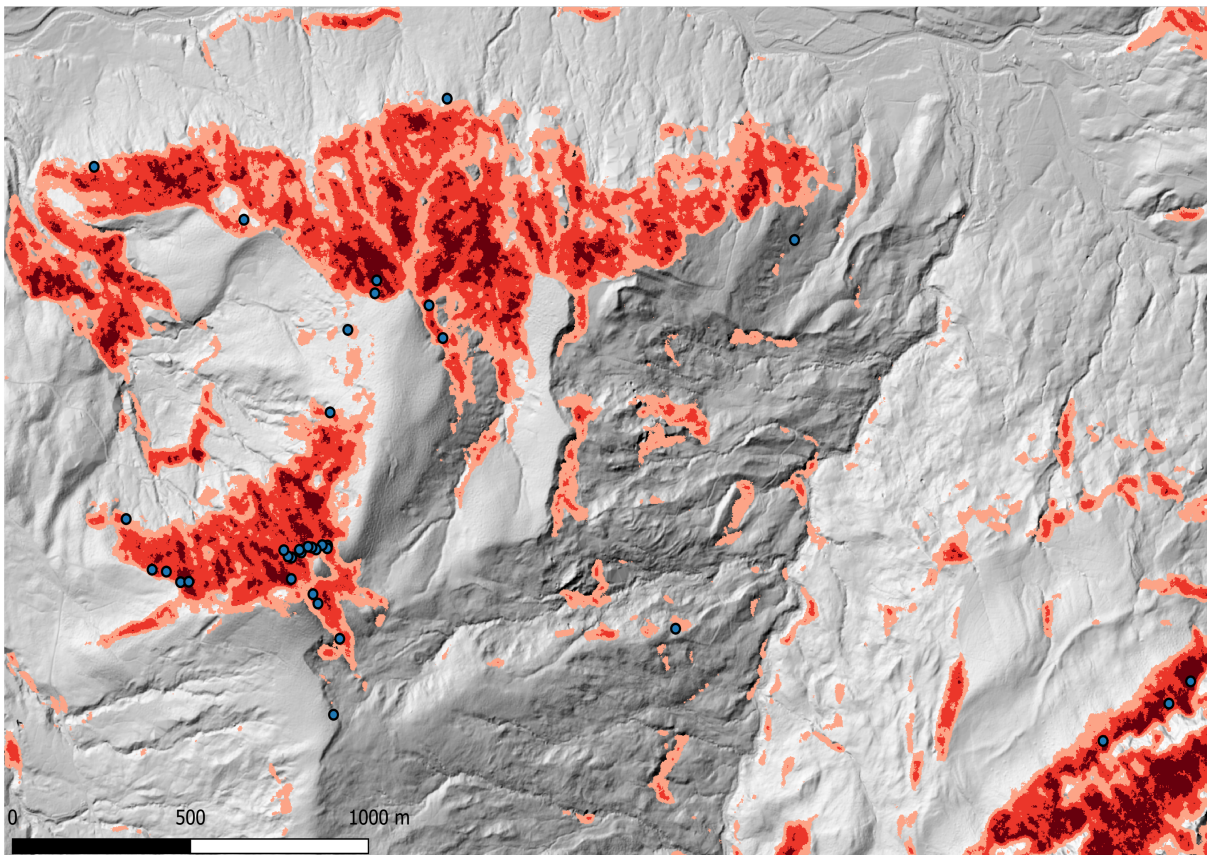


Figure 4.7. – Probabilité de l'arrachement des glissements superficiels par cellule pour les trois zones d'étude modélisée par SlideForMAP.

Table 4.1. – AUC pour différentes méthodes de calcul du renforcement des racines.

	Eriz	Trub	StA
AUC - Détection des arbres individuels	0.76	0.77	0.56
AUC - Valeur de renforcement des racines uniforme (2 kN) pour la zone forestière	0.75	0.76	0.56

4.3. Fiche technique pour l'analyse de disposition

Basé sur les expériences de la modélisation des zones d'arrachement (ZA) des glissements superficiels à l'échelle de versant (et régionale), nous proposons une fiche technique pour la pratique qui est présentée dans l'annexe A. Ces expériences ne sont pas seulement basées sur ce projet, mais aussi sur d'autres études effectuées (entre autre Schwarz *et al.* (2014), Dorren et Schwarz (2016), Cohen et Schwarz (2017) et Schwarz *et al.* (2019)).

5. Méthodes de l'analyse de la propagation

Ce chapitre explique les différentes étapes qui ont permis de développer le modèle SlideForce. Nous avons développé trois axes en parallèle.

Premièrement, nous avons exécuté des expériences en laboratoire analogues aux travaux de Hürlimann *et al.* (2015) afin d'améliorer les connaissances de la teneur en eau et de la distribution granulométrique sur la distance de propagation du matériau.

Deuxièmement, nous avons adapté YADE pour les coulées de boue en intégrant et en adaptant la loi de contact de Lüding (2008). Par la suite nous avons utilisé les résultats des expériences à grande échelle de Veltheim pour calibrer le modèle YADE en prenant en compte l'effet de la teneur en eau et en fines particules présentes dans le matériau en mouvement. Ensuite nous avons rétro-calculé 28 événements historiques de coulées de boue de versant avec YADE et avons classé ces événements en quatre types de coulée (TC) sur la base de deux paramètres de YADE représentant l'effet de la teneur en eau et la distribution granulométrique.

Troisièmement, nous avons adapté le modèle FLOW-R (Horton *et al.*, 2013) pour les coulées de boues et utilisé le nouveau modèle appelé SlideForce pour rétro-calculer les mêmes 28 événements historiques de coulées de boue de versant.

Enfin, nous avons pu comparer les résultats de YADE et SlideForce afin de calibrer les paramètres d'entrée du modèle SlideForce pour chacun des quatre TC définis. Finalement, nous avons optimisé le code de SlideForce afin d'avoir une base solide pour le développement d'un outil de simulation des coulées de boue applicable dans la pratique. La fig. 5.1 montre le déroulement de notre analyse de propagation. Les sous-chapitres suivants présentent en détail les différentes étapes.

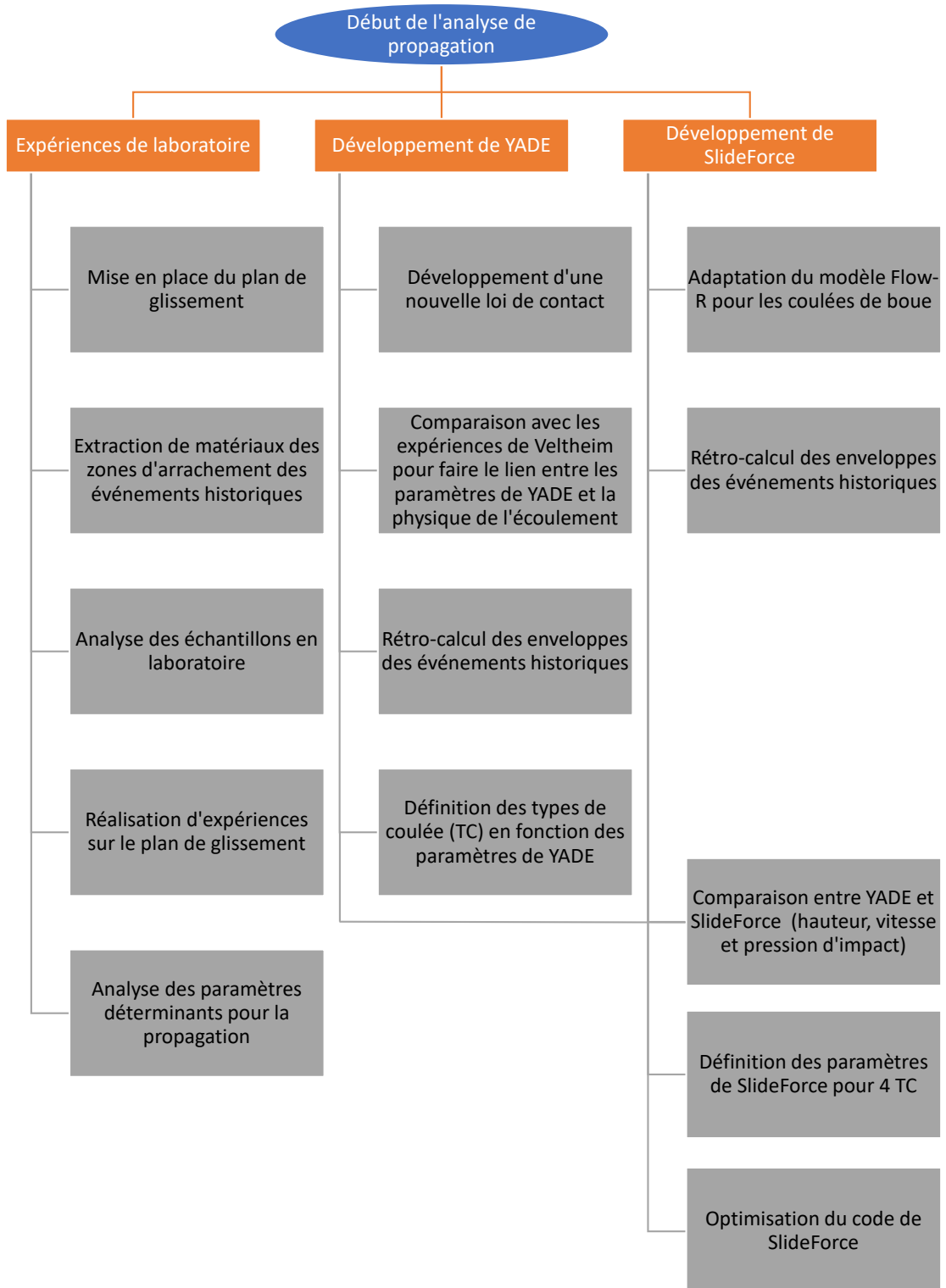


Figure 5.1. – Déroulement de l'analyse de propagation de coulées de boue de versant.

5.1. Expériences de laboratoire

Les expériences de propagation réalisées dans le laboratoire de la BFH-HAFL ont été effectués en collaboration avec la BFH-AHB de Burgdorf. La construction du plan incliné a été financée par la BFH. Les expériences réalisées ont été financées par les cantons de Berne, Lucerne, Tessin, Glaris, Saint-Gall ainsi que la Principauté du Liechtenstein. Une description détaillée de ces expériences se trouve dans Albaba *et al.* (2020).

5.1.1. But des expériences en laboratoire

Les expériences en laboratoire de Hürlimann *et al.* (2015) ont montré une forte influence de la teneur en eau sur la distance d'écoulement du matériau en mouvement. Les résultats suggèrent qu'une très faible augmentation de la teneur en eau allonge de manière exponentielle la distance de propagation. L'analyse de divers mélanges artificiels d'argile et de sable a montré qu'une augmentation de la teneur en argile réduisait sensiblement la distance maximale d'écoulement (voir fig. 5.2). Les tests de laboratoire effectués dans le cadre de notre projet avaient pour but d'étudier le lien entre la teneur en eau, la proportion d'argile et la distance d'écoulement sur la base de matériaux naturels extraits de terrains ayant subi des coulées de boue de versant. Comme pour Hürlimann *et al.* (2015), la teneur en eau a été calculée comme le rapport entre le poids de l'eau et le poids total de l'échantillon.

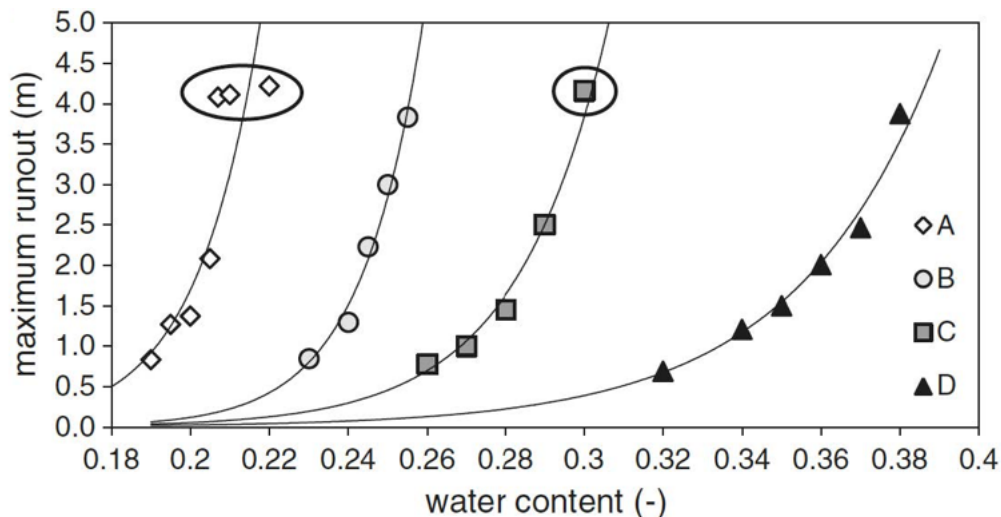


Figure 5.2. – Corrélation entre la teneur en eau et la distance de propagation des différentes distributions granulométriques (la teneur en argile ou la fraction fine augmente de A à D), voir Hürlimann *et al.* (2015).

5.1.2. Mise en place de l'expérience

Nous avons construit au sein du laboratoire de la HAFL un plan incliné grâce auquel nous avons réalisé les expériences de coulées de boue de versant. Le plan de glissement est recouvert d'un contreplaqué, doté d'un revêtement rugueux qui imite la rugosité naturelle des sols et sur lequel le matériau peut s'écouler (fig. 5.3). Le plan de glissement est fixé sur un cadre métallique permettant une inclinaison de celui-ci à 30°. Enfin, le plan de glissement est long de 5,20 m pour une largeur de 1,25m, et est marqué d'un raster de mesure de 10 x 10 cm pour faciliter les mesures et l'enregistrement des expériences.

Pour chaque test, le matériau de sol ajusté au contenu en eau souhaité est placé dans un récipient qui est vidé manuellement sur la surface de glissement (voir fig. 5.3b). Le récipient est en verre acrylique, a une base rectangulaire et une ouverture de 40 cm de large. La boîte a été construite de telle manière à ce qu'elle puisse contenir différents volumes de test allant jusqu'à 20 litres. Dans la direction de la ligne de pente, un mur à charnière a été installé. Le volet d'ouverture est actionné par un système de cordon manuel. Pendant le remplissage, la paroi à charnière est fermée. Dès que le verrou est relâché, le mur est ouvert par un poids

de traction à l'autre extrémité du cordon et le matériau s'écoule alors librement vers le bas. Chaque test a été enregistré avec une caméra à haute vitesse (Chronos 1.4 - 1057 fps) pour observer le comportement du matériau et la vitesse d'écoulement. La caméra a enregistré la totalité du plan incliné, tandis qu'une deuxième caméra (Sony Cyber Shot) s'est concentrée sur les premiers 30-40 cm de celui-ci.



Figure 5.3. – Vue d'ensemble du plan incliné (a), plan rapproché de la boîte de remplissage (b).

5.1.3. Préparation du matériau

Pour éviter que l'expérience ne soit altérée par la présence d'artefact insensible à l'humidification ou à une ségrégation du mélange, le matériel d'essai prélevé sur le terrain a été préalablement passé au travers un tamis de 8 mm. Pour chaque essai, trois échantillons ont été prélevés dans des plateaux en aluminium et laissés dans le séchoir à 105° Celsius pendant 24 heures pour déterminer la teneur en eau exacte par échantillon.

5.1.4. Déroulement de l'expérience

Après avoir mélangé le matériau d'essai avec la quantité d'eau souhaitée, le mélange a été versé dans un récipient sec de 5 litres dont on extraira la densité. Avant chaque test, le plan incliné a été humidifié afin que les conditions initiales soient les mêmes qu'à la suite de fortes précipitations. Après avoir déclenché le mécanisme d'ouverture et réalisé l'écoulement du matériau sur la glissière, la forme du dépôt a été mesurée à l'aide des coordonnées du raster. Ensuite, l'épaisseur de dépôt a été mesurée tout les 10 cm le long de l'écoulement et au centre de celui-ci jusqu'à la mesure de propagation maximale. Pour chaque teneur en eau, trois tests ont été effectués afin de déterminer la distance moyenne d'écoulement. Pour chacun des trois essais, trois échantillons de matériel ont été prélevés pour déterminer la teneur exacte en eau.

5.2. Modélisation d'éléments discrets avec YADE

La simulation numérique de cette étude a été réalisée en utilisant la méthode des éléments discrets (*Discrete Element Method - DEM*). Ce type de méthode est largement utilisé pour la modélisation de milieux granulaires.

(Maurin *et al.*, 2016; Papachristos *et al.*, 2017; Mede *et al.*, 2018). C'est particulièrement efficace pour la simulation d'ensembles granulaires où le milieu peut être décrit à une échelle microscopique. La méthode est basée sur un schéma de différence finie explicite proposé par Cundall et Strack (1979). Elle s'applique pour un ensemble de corps discrets interagissant entre eux, et dont l'interaction est gouvernée par une loi de contact. Différentes forces de contact peuvent être considérées à la fois dans la direction normale et dans la direction tangentielle. La mise en application est une alternance de calcul entre l'application de la seconde loi de Newton sur le mouvement des particules et une loi force-déplacement pour l'interaction entre les particules. En comparaison avec la méthode des éléments finis (FEM), la méthode des éléments discret permet de modéliser de grands déplacements entre éléments et est peu coûteuse en temps de calcul, et est particulièrement adaptée à la résolution de problèmes discontinus en milieu granulaire.

YADE (Yet Another Dynamic Engine) est un environnement open-source extensible pour la modélisation numérique discrète d'éléments finis (Šmilauer *et al.*, 2010). La boucle de simulation dans YADE commence par la détection des contacts entre les particules (fig. 5.4). Ensuite, la loi de contact choisie est appliquée, entraînant un nouveau calcul de positions et vitesses des particules. YADE contient les principaux composants permettant l'application de la méthode des éléments discret, notamment les lois de Newton, les algorithmes d'intégration temporelle, les méthodes d'amortissement, la détection des collisions, les classes de données (stockage des informations sur les corps et les interactions) et les méthodes de commande OpenGL pour dessiner les géométries les plus courantes (Šmilauer *et al.*, 2015).

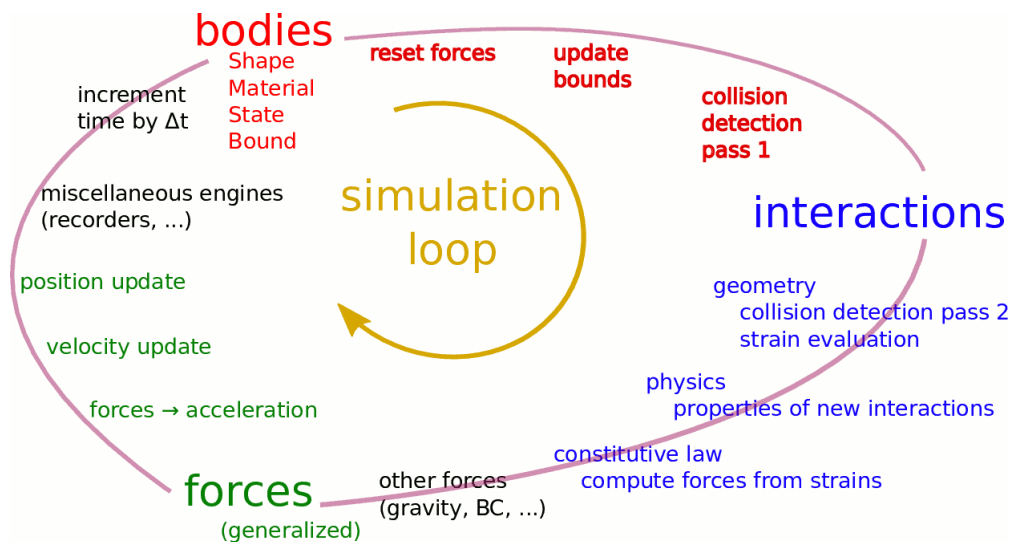


Figure 5.4. – Déroulement des simulations en YADE.

5.2.1. Loi de contact

Pour les simulations réalisées avec YADE dans le cadre de ce projet, deux types d'interactions possibles peuvent avoir lieu. Le premier type d'interaction est l'interaction particule-paroi qui décrit le contact entre une particule de l'écoulement et un objet paroi qui pourrait être la base de l'écoulement ou une barrière rigide dans la simulation. Ce type d'interaction est régi dans cette étude par une loi de contact viscoélastique (Schwager et Poeschel, 2007) qui a été fréquemment utilisée dans de nombreuses études antérieures sur les écoulements granulaires en pente (Teufelsbauer *et al.*, 2011; Albaba *et al.*, 2015; Leonardi *et al.*, 2016). La partie élastique de la loi de contact est représentée par un ressort qui est connecté en parallèle à un point de contact représentant l'amortissement visqueux. La dissipation de l'énergie est en partie contrôlée par la collision des particules et est liée au coefficient de restitution des matériaux granulaires.

Le second type d'interaction est au contact particule-particule, entre deux objets sphériques dans un écoulement granulaire. Pour décrire cette interaction, nous avons implémenté une loi de contact Adhésive-élastoplastique dans le code Open-Source de YADE. Cette implémentation est basée sur le travail de Luding (2008) pour reproduire le comportement d'un écoulement cohésif et suggère l'influence d'une force hystérétique F_{hys} régissant l'interaction entre deux particules. La force normale est alors calculée comme suit (voir aussi fig. 5.5) :

$$F_{hys} = \begin{cases} k_1 \delta & \text{si } k_2(\delta - \delta_0) \geq k_1 \delta \\ k_2(\delta - \delta_0) & \text{si } k_1(\delta) > k_2(\delta - \delta_0) > -k_c \delta \\ -k_c \delta & \text{si } -k_c \delta \geq k_2(\delta - \delta_0) \end{cases} \quad (5.1)$$

où k_1 , k_2 et k_c sont des paramètres de rigidité, respectivement pour les phases de chargement, de déchargement et d'adhésion des contacts. δ est la distance de chevauchement entre deux particules dans la direction normale.

Lorsqu'un contact entre deux particules est établi, avec les particules interagissant l'une contre l'autre, la force hystérétique augmente linéairement avec l'augmentation de la déformation δ le long de la direction de k_1 . La déformation maximal atteinte (δ_{max}) est actualisée au fur et à mesure que la déformation au contact augmente. Dès que la décharge commence, la déformation atteinte sera temporairement enregistrée en tant que δ_{max} et la direction de force-déformation sera indiquée par le paramètre de rigidité k_2 . En cas de recharge, le chemin de k_2 sera suivi de nouveau jusqu'à atteindre la déformation maximale enregistrée δ_{max} . Par la suite, toute charge supplémentaire continuerait le long de k_1 . En cas de décharge en dessous de la limite δ_0 qui représente le croisement entre k_2 et l'axe de déformation et est calculé en tant que $\delta_0 = (1 - k_1/k_2)\delta_{max}$, une force adhésive serait alors activée, limitée par la valeur de force minimum suivante : $f_{min} = -k_c \delta_{min}$.

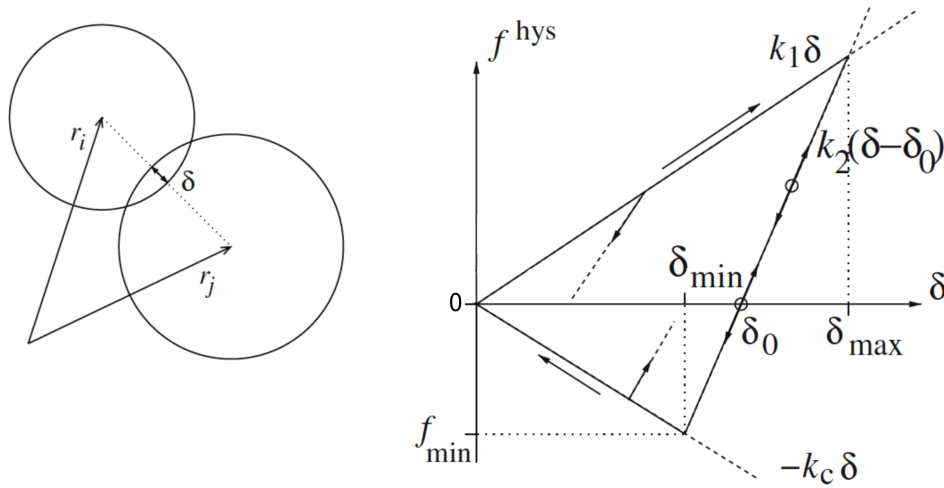


Figure 5.5. – Une représentation schématique des trois phases de la loi de contact dans la direction normale.

En plus de la composante hystérétique de la force, il y a la composante visqueuse de la force f_{visc} (voir pour information Schwager et Poeschel (2007)) qui est le produit du coefficient d'amortissement visqueux (γ_n), qui dépend de la valeur choisie du coefficient de restitution ϵ_n (pris égal à 0,3 comme indiqué par les précédentes études de DEM sur les écoulements granulaires le long d'un plan incliné (Chanut *et al.*, 2010; Albaba *et al.*, 2015)), et de la vitesse dans la direction normale (v_n) qui donne la composante de la force d'interaction dans la direction normale \mathbf{F}_n suivante :

$$\mathbf{F}_n = (F_{hys} + \gamma_n v_n) \mathbf{n} \quad (5.2)$$

La composante tangentielle de la force normale est régie par le critère classique de défaillance Mohr-Coloumb comme suit :

$$\mathbf{F}_t = \begin{cases} \frac{k_t u_t}{|k_t u_t|} |\mathbf{F}_n| \tan \Phi_p & \text{si } |k_t u_t| > |\mathbf{F}_n| \tan \Phi_p \\ k_t u_t & \text{sinon} \end{cases} \quad (5.3)$$

où k_t est le paramètre de rigidité tangentielle, u_t est le déplacement tangentiel, Φ_p est l'angle de frottement interparticulaire à l'échelle microscopique.

La rigidité normale du contact entre deux particules (k_1) est calculée comme suit (Catalano *et al.*, 2014) :

$$k_1 = \frac{2E_1r_1E_2r_2}{E_1r_1 + E_2r_2} \quad (5.4)$$

où E_1 et E_2 sont les modules élastiques de la première et de la deuxième particule (tous deux pris comme 10^8 Pa) et r_1 et r_2 sont respectivement les rayons de la première et de la deuxième particule.

5.3. Expérimentations de terrain de coulées de boue de versant

Une série d'expérimentations de terrain à l'échelle réelle sur les coulées boue de versant a été réalisée entre 2008 et 2010 sur le site expérimental de Veltheim dans le canton d'Argovie en Suisse (voir Bugnion *et al.* (2012)). Les objectifs de ces expérimentations étaient de mesurer la hauteur, la vitesse, ainsi que la pression des coulées de boue de versant. Une barrière flexible, largement utilisée en cas réels comme mesure de protection contre de nombreux types de mouvements de masse (Volkwein, 2005; Brighenti *et al.*, 2013; Albaba *et al.*, 2017), a été installée en aval du canal et a été intensivement instrumentée afin de mesurer les forces et déformations internes développées dans la barrière impactées par les flux. Au total, 16 tests ont été effectués, 8 consistaient en un seul déversement et 8 une série de déversements successifs, où les coulées de débris étaient successivement relâchées sans nettoyage du canal. Chaque rejet avait un volume constant de 50 m^3 . Ces expérimentations à grande échelle ont ensuite été rétro-calculées à l'aide de YADE comme décrit dans les sous-chapitres 5.3.3, 5.3.4 et 5.3.5.

5.3.1. Géométrie et matériel utilisé

Sur le site de Veltheim (CH), un canal de 41 m de long et 8 m de large a été creusé sur le flanc d'une carrière de roche (fig. 5.6). Le canal a été creusé jusqu'aux roches encaissantes, créant des parois latérales de 1 mètre. Le matériau excavé a ensuite été utilisé pour préparer le mélange utilisé pour l'expérience, entraînant de légères différences dans la distribution granulaire des matériaux testés. En outre, différents niveaux de teneur en eau ont été ajoutés aux matériaux testés pour un éventail final de 14 à 28 %, résultant en des densités comprises entre 1760 et 2110 kg/m^3 . Le canal a été instrumenté avec des capteurs de distance laser en deux positions, soit 14 et 26 m de la porte du réservoir. De plus, deux plaques de pression (dimension : 160 mm x 225 mm et 240 mm x 295 mm, capacité de signal de 2 kHz) ont été installées à 30 m de la porte du réservoir avec des zones de mesure de pression de 0,0144 m^2 et 0,04 m^2 , respectivement pour la petite et la grande plaque. Le débit testé était similaire à celui des coulées de débris faiblement canalisés. La figure 5.7 montre des captures de l'essai 10 peu après le relâchement (3 secondes après le relâchement) et après avoir heurté les capteurs de pression (6 secondes après le relâchement).

5.3.2. Paramètres mesurés lors des expérimentations

Pour chaque test réalisé, la hauteur d'écoulement aux deux sections a été mesurée à l'aide de capteurs laser. Les sections 1 et 2 sont situées à des distances respectives de 14 m et 26 m en aval du réservoir de départ, où les distances sont mesurées parallèlement à la pente comme le montre la figure 5.6. De plus, avec deux capteurs installés à 30 cm l'un de l'autre dans la section 2, la vitesse de la surface supérieure d'écoulement a été dérivée en utilisant une fonction de corrélation discrète des signaux de hauteur des deux capteurs. La vitesse moyenne à l'avant de la section 2 a été rétro-calculée en utilisant des données relatives au temps d'arrivée du flux et à la distance aux sections 1 et 2. La pression appliquée par le matériau en écoulement sur les petites et grandes plaques a également été mesurée et un mécanisme de filtrage a été appliqué. Un filtre des valeurs de pression a été appliqué afin d'éliminer les oscillations causées par les contacts durs dus aux gros grains qui frappent les capteurs. Il a été appliqué en remplaçant chaque valeur de signal par la valeur moyenne sur un intervalle de 0,05 seconde. Nous avons étudié les relations possibles entre ces paramètres mesurés (vitesse d'écoulement et hauteur) dans les expériences et la teneur en eau et en fines particules des matériaux libérés. Des études antérieures d'expériences à l'échelle du laboratoire sur les coulées de boues de versant ont montré que l'augmentation de la teneur en eau était directement corrélée à une augmentation de la distance d'écoulement, ce qui pourrait également indiquer une augmentation possible de la vitesse d'écoulement (voir

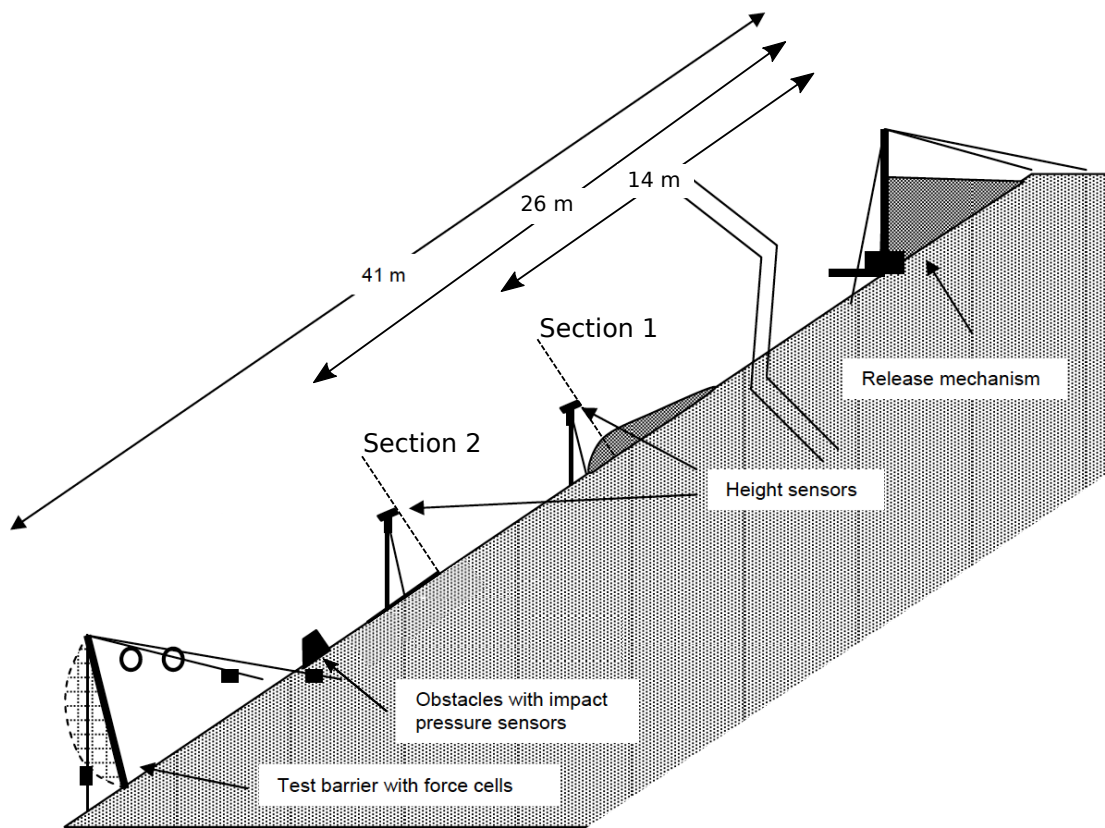


Figure 5.6. – Une représentation schématique de la mise en place des expérimentations sur le terrain.

Hürlimann *et al.* (2015)). En outre, une corrélation négative a été observée entre la teneur en argile et la distance d'écoulement. Ces deux relations se sont avérées non linéaires.

5.3.3. Modélisation des expérimentations de Veltheim en YADE

Afin d'adapter les lois d'écoulement de YADE et de déterminer la paramétrisation optimale permettant de reproduire la cinématique de l'écoulement et la pression d'impact, nous avons simulé les différentes expérimentations de Veltheim. Pour simuler l'écoulement sur un plan incliné, une classe d'objets muraux a été utilisée dans YADE pour créer un canal composé d'une base et de deux parois latérales. Le plan incliné était long de 41 m, large de 8 m, canalisé avec des côtés de 1 m de hauteur et incliné à 30° . Un réservoir rectangulaire a été créé à l'endroit où commence l'écoulement. Le réservoir a pour dimension 7 m de long, 8 m de large et 1,8 m de haut. À l'intérieur de celui-ci, on a créé des échantillons granulaires composés de particules sphériques dont les diamètres uniformément répartis allaient de 50 mm à 100 mm et dont le diamètre moyen était de $d_{50} = 75$ mm. La densité intrinsèque des particules est $\rho_p = 2500 \text{ kg/m}^{-3}$. Des paquets de particules ont été générés au début de l'expérience, le volume total de chaque échantillon granulaire étant d'environ 50 m^3 . Par la suite, sous l'effet de la gravité, les particules se déposent au fond du réservoir, créant ainsi un échantillon statique et dense. Une fois cette étape franchie, la simulation de l'écoulement peut commencer par l'ouverture partielle de la porte du réservoir sur une hauteur de 0,8 m, permettant ainsi aux particules de s'écouler sur le plan incliné (fig.5.8a). Différentes simulations numériques ont été effectuées en faisant varier le rapport $\sqrt{k_1/k_2}$ et l'angle de frottement basal microscopique entre les particules et le socle du plan incliné (φ_b), tout en fixant l'angle d'inclinaison α du plan incliné à 30° . La friction interparticulaire φ a été fixée à 40° . La rigidité tangentielle du contact (k_t) a été prise comme $\frac{2}{7}k_n$ suivant Silbert *et al.* (2001) et k_c était égal à k_1 .



(a)



(b)

Figure 5.7. – Captures d'écran du test n°10 : **(a)** 3 secondes après l'ouverture du barrage ; **(b)** 6 secondes après l'ouverture

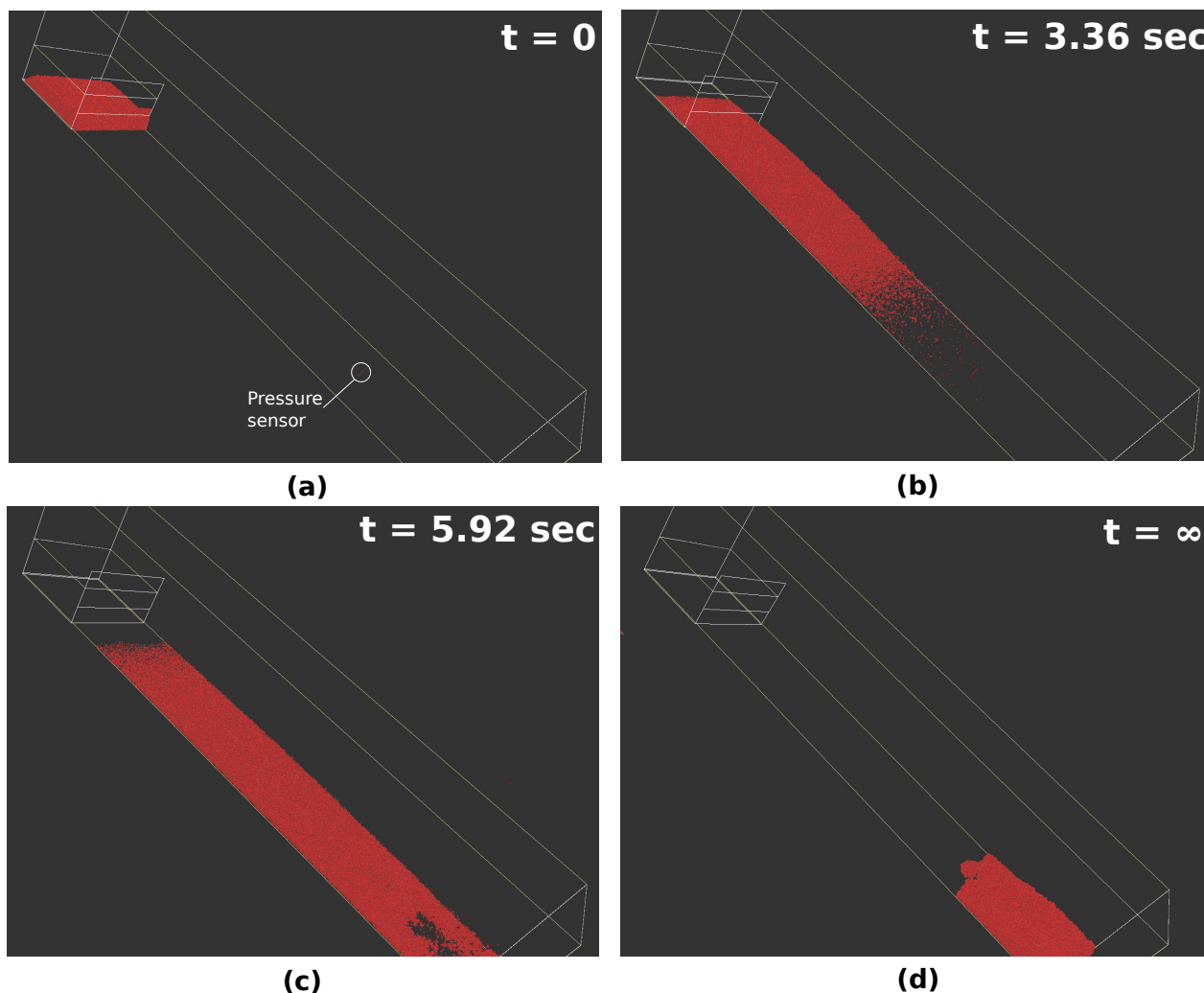


Figure 5.8. – Une série de captures d'écran lors d'une simulation de YADE avec $\phi_b = 30^\circ$ et $\sqrt{k_1/k_2} = 0.3$: **a** directement après l'ouverture des portes du réservoir ; **b** à $t = 3.36$ seconds ; **c** à $t = 5.92$ seconds ; **d** à la fin de la simulation (d)

5.3.4. Mécanisme de mesure des paramètres dans YADE

YADE étant un code à éléments discrets, les paramètres tels que la hauteur, la vitesse et la pression sont caractérisés à l'échelle des particules (micro). Afin de présenter ces paramètres à une macro-échelle comparable à celle des données expérimentales, il faut moyenniser ces paramètres à l'échelle particulière afin de représenter la masse en écoulement comme un milieu continu. Pour comparer la vitesse moyenne du front simulé avec les données de l'expérience de Veltheim, le temps d'arrivée de l'écoulement simulé a été calculé aux positions 1 et 2, puis moyenné sur la distance entre ces deux positions.

La hauteur maximale de l'écoulement à la position 2 est mesurée comme la hauteur maximale de la masse principale en écoulement à cette position, sans prendre en compte les particules en mouvement solitaire. Tout d'abord, une boîte virtuelle centrée sur la position 2, ayant une longueur de $5 \times d_{50}$, une largeur et une hauteur égales à celles du canal a été utilisée. Les propriétés de l'écoulement, telles que les coordonnées de position en x (dans la direction de l'écoulement), y (perpendiculaire à l'écoulement) et z (perpendiculaire au plan incliné) ainsi que la vitesse d'écoulement dans la direction de l'écoulement ont été enregistrées toutes les 0,1 seconde pour toutes les particules à l'intérieur de cette boîte. Ensuite, des mesures de la hauteur des particules à des périodes comprises entre 25 et 75 % de la durée totale de l'impact ont été sélectionnées pour chaque simulation, afin d'exclure le front et la queue de l'écoulement dispersé et dilué (Jiang et Towhata, 2013; Albaba *et al.*, 2015), comme ceux de la figure 5.8b. Enfin, la fréquence cumulée de 90 % de la hauteur d'écoulement des

Table 5.1. – Principales caractéristiques de l'écoulement et paramètres mesurés pendant les expérimentations de Veltheim, utilisées pour l'étalonnage du modèle YADE.

Nr. de lâché	Densité humide (kg/m^3)	Fraction massique d'eau (%)	Hauteur d'écoulement Max. - pos. 2 (m)	Fraction massique de fins (%)	V. Moy du front (m/s)	Pres. Max sur le grand capteur (kPa)
9	1,790	28	48	0.29	10.2	65.9
10	1,900	18	21	0.4	8.2	96
11	2,060	16	27	0.38	9	94.6
13	1,880	22	28	0.33	8.4	98.5
14	1,990	17	25	0.4	9.1	138
15	1,830	23	25	0.37	8.9	109.4
16	2,110	14	41	0.37	6.4	69.2

particules dans la boîte a été sélectionnée. La hauteur de flux maximale dans YADE comparée à l'expérience était alors la valeur maximale de la fréquence cumulée sélectionnées pour tous les échantillons collectés chaque 0,1 seconde.

5.3.5. Comparaison entre les résultats de YADE et les données expérimentales

Pour étalonner le modèle YADE, seuls les premiers lâchés de certains essais de l'expérience sur le terrain ont été pris en compte afin d'éviter une possible perturbation des paramètres mesurés lié à la présence de dépôts de lâchés précédents (essais 'XX.1' dans le tableau 4 de Bugnion *et al.* (2012) où XX est le numéro de l'essai). Dans le modèle YADE, aucun matériau ne se dépose sur le plan incliné et les lâchés multiples seraient donc difficiles à reproduire. Sept tests issus des données expérimentales ont été sélectionnés pour être comparés aux résultats de YADE. La numérotation suit la classification des données donnée par Bugnion *et al.* (2012). Le tableau 5.1 résume les principales propriétés des matériaux de ces essais et les paramètres mesurés.

Tout d'abord, une série de simulations faisant varier l'ensemble des paramètres (ϕ_b , $\sqrt{k_1/k_2}$) a été réalisée. Une plage comprise entre 20 et 40° a été choisie pour ϕ_b avec une augmentation par pas de 5°, tandis que $\sqrt{k_1/k_2}$ varie entre 0,3 et 0,45 avec un pas de 0,03. Ces intervalles ont été sélectionnés sur la base de tests préliminaires du modèle. Les simulations avec les valeurs ϕ_b et $\sqrt{k_1/k_2}$ en dehors des plages de test pré-sélectionnées se sont avérées soit entraîner des flux très rapides avec des pressions d'impact très élevées, soit des flux qui ne glisseraient pas le long du canal. Par la suite, toutes les simulations effectuées ont été comparées avec chaque expérience sélectionnée afin de trouver la meilleure adéquation en termes de : (a) hauteur maximale de l'écoulement à la position 2 (H_{max}), (b) vitesse moyenne du front entre les positions 1 et 2 (V_{moyen}), et (c) pression maximale appliquée au grand capteur (P_{max}). Les résultats de pression sur le petit capteur ont été ignorés car ils n'ont pas été mesurés pour chaque test dans Bugnion *et al.* (2012). En outre, dans les simulations de YADE, plus le capteur est petit, plus le signal de force serait discret en raison de la présence de moins de particules par impact. Le meilleur ajustement pour chaque test expérimental sélectionné a été déterminé comme étant le plus faible pourcentage (R_{min}) d'erreur pour les trois paramètres comme suit :

$$R_{min} = \min_{\forall i \in n_s} \left(\frac{\sqrt{(H_{DEM})_i - H_{EXP}}}{H_{EXP}} + \frac{\sqrt{(V_{DEM})_i - V_{EXP}}}{V_{EXP}} + \frac{\sqrt{(P_{DEM})_i - P_{EXP}}}{P_{EXP}} \right) \quad (5.5)$$

Où n_s est le nombre total de simulations

Après avoir trouvé le meilleur ensemble de paramètres (ϕ_b , $\sqrt{k_1/k_2}$) pour chaque expérience, les relations possibles entre ces deux paramètres et l'état initial des échantillons granulaires (c'est-à-dire la teneur en eau et en matériaux fins) ont été étudiées.

5.4. Modélisation de la propagation d'événements historiques avec YADE

5.4.1. Préparation des données

Dans une simulation typique d'éléments discrets dans YADE, les géométries peuvent être importées à partir de nombreux formats couramment utilisés tels que STL (STereo-Lithography) ou MESH, produits par un programme de CAO (Conception Assisté par Ordinateur) (Haustein *et al.*, 2017). Afin de pouvoir simuler des événements historiques dans YADE, les modèles de terrain géodésiques dans les SIG devaient être ajoutés à l'environnement particulière de YADE. Ceci a été réalisé en convertissant le modèle en fichier STL qui est un format utilisé dans les logiciels de stéréolithographie. Le fichier STL est par la suite importé dans YADE puis représenté en triangles 3D formant la géométrie du versant à modéliser (fig. 5.9).

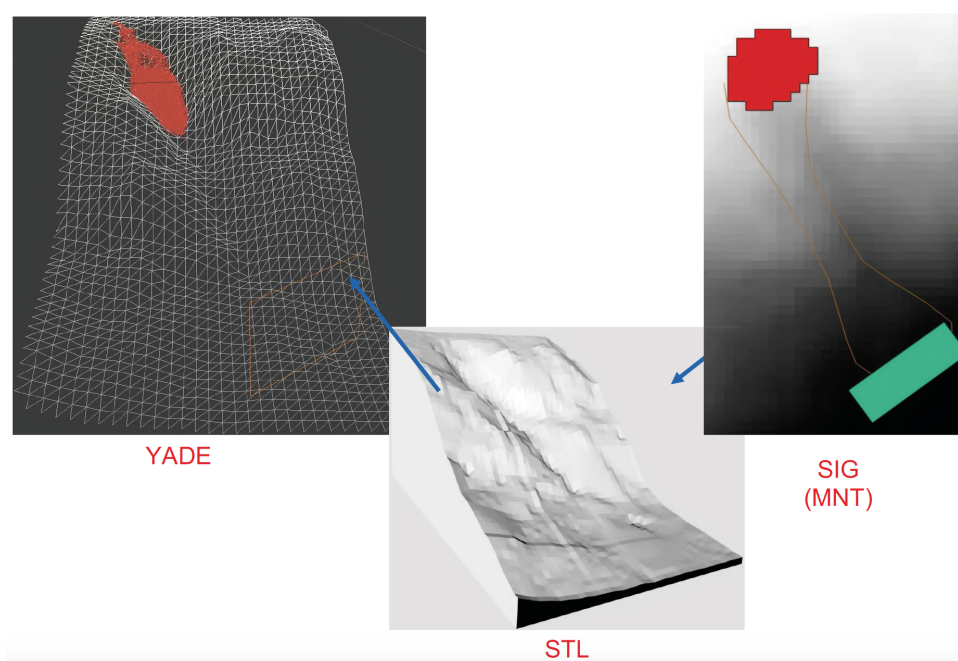


Figure 5.9. – Conversion d'un modèle numérique de terrain en objet tridimensionnel en YADE en utilisant le format STL.

La zone de départ de chaque événement est représentée par une ellipse, comme illustré précédemment dans la section 2.2. Afin de définir le volume de glissement dans YADE, des bandes de même largeur sont créées avec une surface totale similaire à celle de l'ellipse. Chaque bande est ensuite remplie de particules dont la profondeur est similaire à la profondeur de glissement de la zone de départ de l'événement historique (fig.5.10). La simulation commence sous l'effet de la gravité à l'endroit où les particules sont déposées sur l'objet 3D (triangles) du versant d'intérêt. Une fois qu'un équilibre quasi-statique est atteint, on laisse les particules glisser le long de la pente.

5.4.2. Post-traitement des résultats de YADE en SIG

Comme les simulations dans YADE sont basées sur l'interaction entre des particules discrètes, il a été nécessaire de préparer les résultats de YADE en SIG afin de créer des enveloppes comparables aux données des événements historiques (selon le processus de la figure 5.11). Pour cela, les positions des particules sont extraites depuis YADE à intervalles réguliers pendant la simulation. Au cours du processus de préparation, les groupes de masse cohésifs sont tout d'abord identifiés pour chaque pas de temps et leurs enveloppes sont générées. Pour identifier les groupes de masse, les positions des particules par pas de temps sont agrégées dans une cellule de 2 x 2 m.

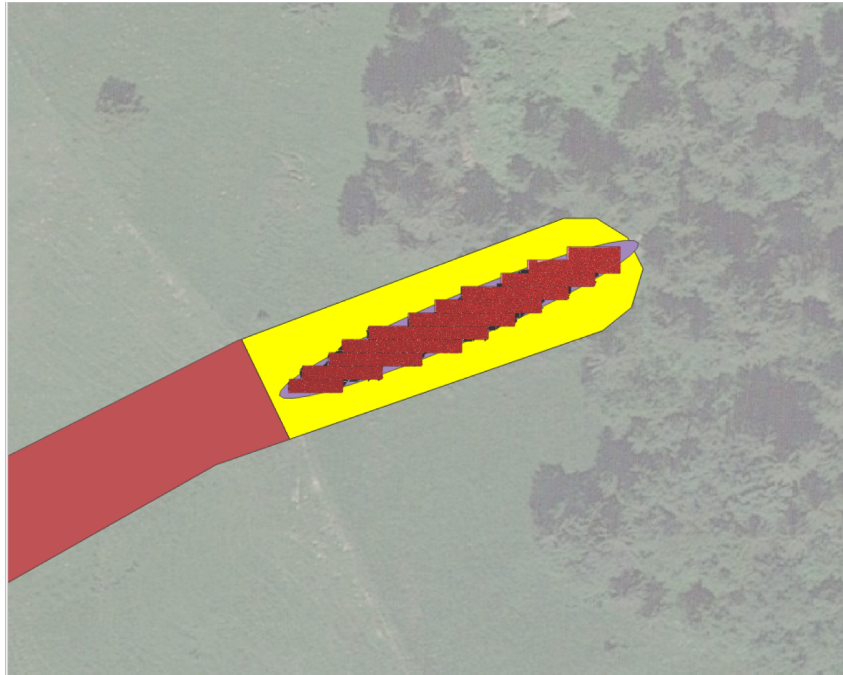


Figure 5.10. – Ellipse représentant la zone d'arrachement et divisée en bandes remplies de particules pour la modélisation d'éléments discrets.

Pour faire cela, nous avons analysé ces positions en utilisant des voxels (cellules 3D) avec des arêtes de 0.2 m. Les cellules contenant plus de 0,05 % du nombre total de particules sont potentiellement candidates, et sont fusionnées avec des cellules candidates voisines. Chaque groupe résultant avec au moins 1% du nombre total de particules est considéré comme un groupe de masse contigu pour lequel l'enveloppe concave est générée. Cette enveloppe est stockée avec des attributs tels que le nombre de particules, la masse, l'épaisseur de dépôt et la vitesse. En combinant (fonction *Union* en SIG) les enveloppes de groupe de tous les pas de temps précédents, l'enveloppe de la coulée de boue de versant sur pente simulée est générée pour le pas de temps considéré. Des attributs tels que le chevauchement avec l'enveloppe de l'événement historique (proportion de la surface de l'enveloppe originale couverte par l'enveloppe simulée), le nombre total de particules, la masse contenue dans l'enveloppe et la vitesse, ainsi que l'épaisseur de dépôt du groupe de particules le plus important au dernier pas de temps sont également stockés. Ces attributs sur les enveloppes sont ensuite utilisés pour évaluer la conformité des coulées de boue de versant simulées par rapport à l'événement historique. Les attributs sur les groupes individuels peuvent être utilisés pour des analyses telles que l'estimation de la pression au front de propagation.

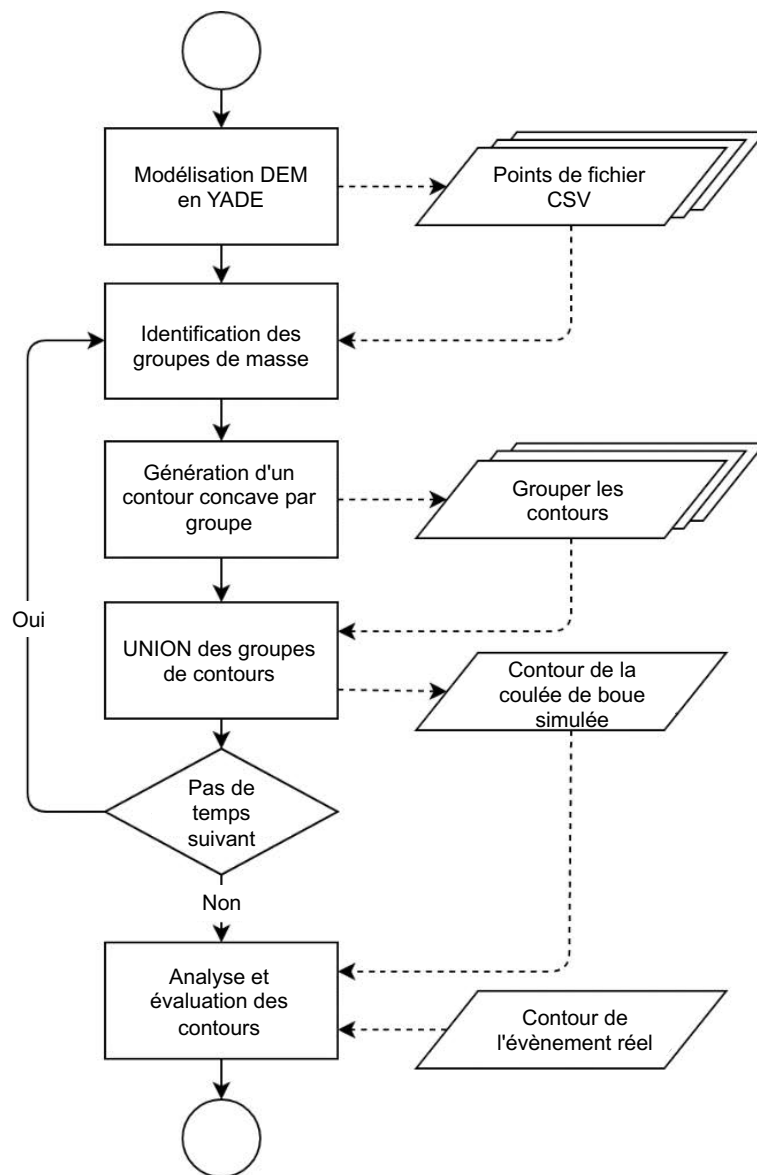


Figure 5.11. – Organigramme de programmation du post-traitement des résultats de YADE en SIG.

5.4.3. Meilleures simulations et pressions d'impact

L'analyse des meilleures simulations YADE et des expériences de terrain correspondantes ont montré que les teneurs en eau et en matériaux fins de la coulée en mouvement pouvaient être corrélées aux deux paramètres du modèle YADE ϕ_b et $\sqrt{k_1/k_2}$. En conséquence, chacun des 28 cas sera simulé en utilisant un ensemble de valeurs pour ϕ_b et $\sqrt{k_1/k_2}$ dans lequel le meilleur ajustement sera sélectionné, en fonction de la meilleure correspondance entre le polygone de l'évènement historique et celui de la simulation YADE. Quatre types d'évènements peuvent alors être identifiés :

- Événements très fluides avec une forte adhésion, simulés avec $\phi_b < 27.5^\circ$ et $\sqrt{k_1/k_2} < 0.375$.
- Événements fluides avec une forte adhésion, simulés avec $\phi_b > 27.5^\circ$ et $\sqrt{k_1/k_2} < 0.375$.
- Événements très fluides avec une faible adhésion, simulés avec $\phi_b < 27.5^\circ$ et $\sqrt{k_1/k_2} > 0.375$.
- Événements fluides avec une faible adhésion, simulés avec $\phi_b > 27.5^\circ$ et $\sqrt{k_1/k_2} > 0.375$.

Après avoir sélectionné le couple de paramètres le mieux adapté pour la reproduction de chaque événement historique, la pression d'impact est estimée en effectuant une nouvelle simulation. Un objet mural est introduit dans la simulation juste avant la zone de dépôt, d'une largeur de 2 mètres et d'une hauteur de $3 * d_{50}$ (afin d'avoir un nombre suffisant de contacts avec l'objet mural). La pression d'impact est alors calculée comme étant la force totale appliquée par chacune des particules interagissant avec la paroi divisée par la surface de la paroi.

5.5. Modélisation de la propagation d'événements historiques avec SlideForce

5.5.1. Présentation du modèle SlideForce

SlideForce est un modèle physico-probabiliste de prédiction de l'écoulement des coulées de boue de versant écrit en MATLAB. SlideForce est dérivé du modèle FLOW-R développé par Horton *et al.* (2013). Il décrit la redistribution d'une masse sur un Modèle Numérique de Terrain (MNT) et a pour but de modéliser la propagation, la vitesse, la hauteur d'écoulement et la pression associée aux coulées de boues de versant. L'algorithme de direction de l'écoulement utilisé dans SlideForce (voir éq. 5.6) remonte à Holmgren (1994) et calcule la distribution de la masse en mouvement de chaque cellule vers les cellules adjacentes.

Les gradients de chaque cellule par rapport aux cellules voisines sont calculés sur la base d'un MNT, un gradient négatif entre deux cellules entraîne automatiquement un écoulement nul, la masse peut s'écouler vers toutes les autres cellules. La direction d'écoulement est calculé grâce à l'algorithme de direction de l'écoulement 5.6 qui décrit la répartition de la masse centrale vers les cellules adjacentes.

$$G_i = \frac{\tan(\beta_i)^x}{\sum_{j=1}^8 \tan(\beta_j)^x} \forall (\tan\beta > 0), x > 1 \quad (5.6)$$

où i et j reflètent les directions d'écoulement, G_i représente la proportion de l'écoulement dans la direction i comme représenté dans la figure 5.12, $\tan(\beta_i)$ représente le gradient entre la cellule centrale et la cellule voisine dans la direction i et x est un exposant variable de contrôle de la direction de propagation des coulées de boue de versant. Le paramètre x est une variable sensible au type de matériau modélisé (Horton *et al.*, 2013). Celle-ci influence la divergence de l'écoulement, ainsi une valeur de x faible entraînera une convergence du fluide tandis qu'une valeur forte entraînera une divergence de l'écoulement. Dans notre modèle, cette valeur est basée sur une valeur de base x_{basis} et une valeur aléatoire x_{var} . SlideForce étant un modèle probabiliste, une variation aléatoire de la divergence de l'écoulement permet de reproduire divers écoulements de glissements de terrain pour un même type de matériau initial.

$$x = x_{basis} + x_{var}, x_{var} \in [0, x_{var}] \quad (5.7)$$

L'étude de Claessens *et al.* (2005) suggère une valeur d'exposant $x = 4$ pour les coulées de boue de versant.

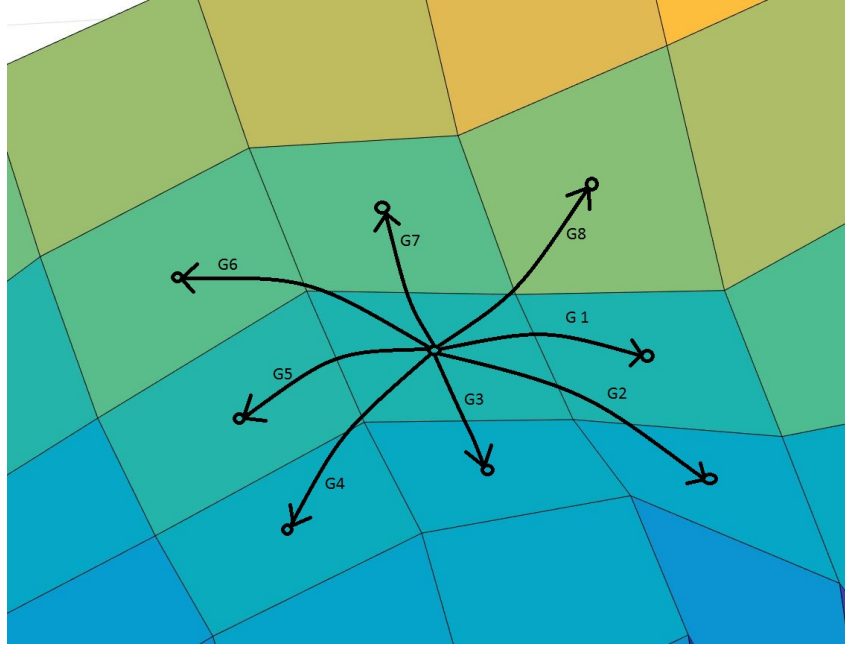


Figure 5.12. – Direction d'écoulement depuis une cellule centrale (d'après Scherer (2016)).

Un des paramètres le plus important dans SlideForce en ce qui concerne l'arrêt de la simulation est la hauteur d'écoulement limite $MovMass_{limit}$. La quantité (i.e., la hauteur) de la masse en mouvement $MovMass$ est calculé à chaque pas de temps dans chaque cellule. Le seuil $MovMass_{limit}$ est défini tel que la hauteur d'écoulement en dessous de laquelle la modélisation sera stoppée :

$$MovMass < MovMass_{limit} = 0 \quad (5.8)$$

Un autre paramètre qui définit la convergence ou la divergence de l'écoulement dans SlideForce est la quantité de matériel appliqué dans l'axe de plus grande pente Q_p . Pour chaque simulation, le paramètre Q_p , donné en %, définit la proportion de matériel obligatoirement dirigé dans la direction de plus grande pente. Ainsi si $Q_p = 100\%$, tout la masse s'écoulera dans la direction de plus grande pente, si $Q_p = 0\%$, l'écoulement sera régi par les autres paramètres de SlideForce.

Finalement, afin de corriger les formes de masse irrégulières résultant de la redistribution à chaque pas de temps, deux filtres géométriques ($WinOP$) peuvent être appliqué dans SlideForce. Ceux ci influencent la répartition des masses à chaque pas de temps de calcul au travers de l'application d'un filtre sur la cellule centrale et les 8 cellules adjacentes. Ainsi, les options d'utilisation de $WinOP$ suivantes se présentent :

- $WinOP = 0$, aucune filtre géométrique appliqué
- $WinOP = 1$, filtre géométrique moyennant l'épaisseur d'écoulement basé sur la quantité de matériel dans la cellule centrale et celle des 9 cases adjacentes
- $WinOP = 2$, filtre géométrique médian basé sur sur la quantité de matériel dans la cellule centrale et celle des 9 cases adjacentes

Le modèle de vitesse V (en m/s) utilisé dans SlideForce est basé sur le modèle de friction de Perla *et al.* (1980), calculé grâce aux formules suivantes :

$$V_i = \sqrt{(A_i \cdot \omega \cdot (1 - \exp(B_i)) + V_0^2 \cdot \exp(B_i))} \quad (5.9)$$

$$A_i = g \cdot (\sin(B_i) - \mu \cdot \cos(\beta_i)) \quad (5.10)$$

$$B_i = (-2 \cdot L_i) / \omega \quad (5.11)$$

ici ω est le rapport masse-à-résistance (*mass-to-drag ratio*), μ est un coefficient de friction (-), V_0 est la vitesse initiale de la coulée (en m/s), g est la valeur de la pesanteur normale (9.8 m/s^2) et L_i est la longueur du segment i (en m).

Le calcul de la pression P (en Pa) est basé sur Scheidegger (1975) :

$$P = \rho \cdot g \cdot \left(h + \frac{V^2}{2 \cdot g} \right) \quad (5.12)$$

ici ρ est la densité des matériaux de la coulée de boue (en kg/m^3), h est la hauteur d'écoulement.

5.5.2. Comparaison avec les événements historiques et les simulations de YADE

Pour chaque événement historique nous avons testé toutes les combinaisons de paramètre possible (en total 5760 combinaisons ; voir tableau 5.2). Pour cela, nous avons exécuté 10 simulations par combinaison de paramètres, ce qui a résulté en un nombre total de simulations de 1,6 million. La table montre que nous avons également testé l'effet de la hauteur maximale de l'écoulement $H_{coul_{max}}$. Ceci est un paramètre à définir par l'utilisateur dans la version finale de SlideForce. Les modélisations de SlideForce étant basées sur un calcul rasterisé, nous avons pu comparé les enveloppes des événements historiques rasterisées avec les modélisations de SlideForce.

Table 5.2. – Valeurs des paramètres testés dans SlideForce.

Paramètre de SlideForce	Valeurs testées
$MovMass_{limit}$	0.01, 0.05, 0.1, 0.2
X_{basis}	1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 20
X_{var}	0.2, 0.5, 1, 2
$WinOP$	0, 1, 2
Q_p	0, 25, 50, 75, 100
$H_{coul_{max}}$	1.5, 2, 2.5

La figure 5.13 montre l'approche utilisée pour cette comparaison pour une modélisation dans le cas de Root (LU). $Real = 1$ signifie que la coulée de boue de versant a été observée et cartographiée dans cette cellule, $Model = 1$ signifie que le modèle a simulé un passage dans cette cellule. Si $Real = 1$ & $Model = 1$, on observe un chevauchement, si $Real = 0$ & $Model = 1$, on observe une sur-modélisation. Ensuite, pour chaque événement historique, nous avons déterminé le nombre de cellules de chevauchement et de sur-modélisation pour définir les meilleures simulations. Une reproduction idéale de l'évènement aurait alors un chevauchement de 100% et 0% de sur-modélisation. Sur cette base, nous avons choisi les 30 meilleures simulations pour chaque cas en imposant le critère suivant ; minimum 80 % de chevauchement et maximum 20 % de sur-modélisation, puis en sélectionnant les 30 cas se rapprochant au mieux du cas idéal. Ces meilleures simulations se trouvent dans la zone indiquée par les traits pointillés rouge dans la figure 5.14. Enfin, en couplant le type de coulée, définie pour chaque événement grâce aux résultats de YADE, avec les 30 meilleures simulations de SlideForce, nous avons pu définir des distributions de valeurs de paramètre pour chaque type de coulée dans SlideForce.

Après avoir définies les plages de valeurs pour tous les paramètres, nous avons exécuté 500 simulations par événement historique afin de reproduire les 28 cas. Pour définir les zones d'arrachements, nous avons utilisé les mêmes zones et volumes de départ que YADE. Ensuite nous avons comparé les hauteurs d'écoulement (H_{coul}), les vitesses et les pressions simulées par YADE et SlideForce. De plus, nous avons comparé les enveloppes des événements historiques et les zones de propagation simulées et pour chaque cas nous avons déterminé le TC reproduisant au mieux l'évènement historique. Ensuite, afin de comparer les enveloppes des zones de propagation (réelles vs. simulées), nous avons testé l'influence de la valeur de probabilité d'atteinte en filtrant les données modélisées à l'aide de différentes valeurs celle-ci et ce dans le but de représenter au mieux l'enveloppe de l'évènement historique (Annexe D).

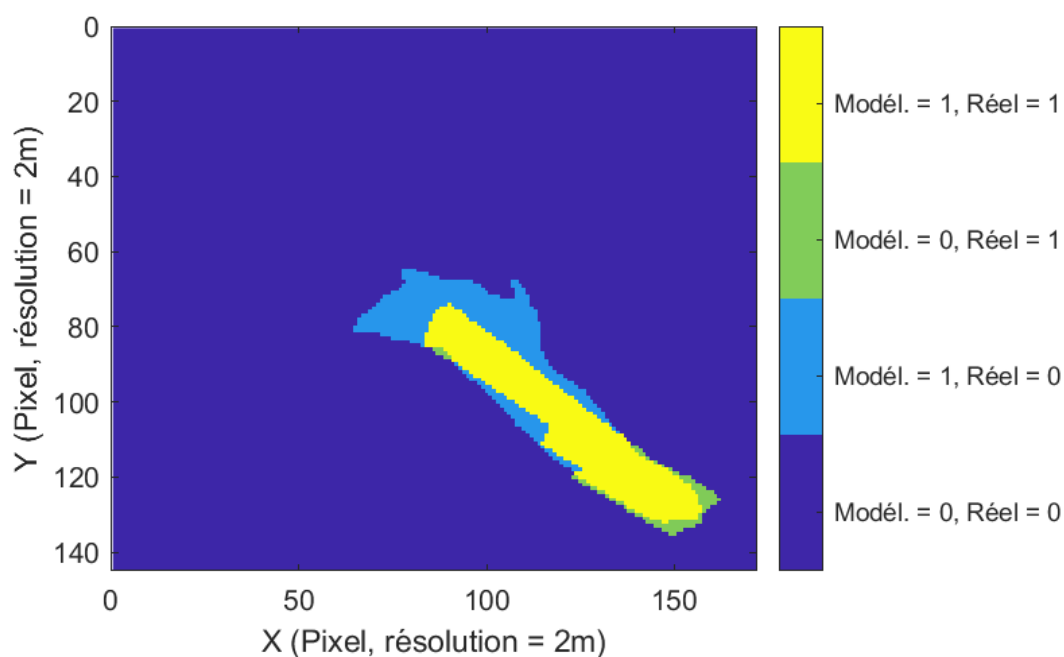


Figure 5.13. – Comparaison entre une simulation et l'événement historique pour le cas de Root (LU).

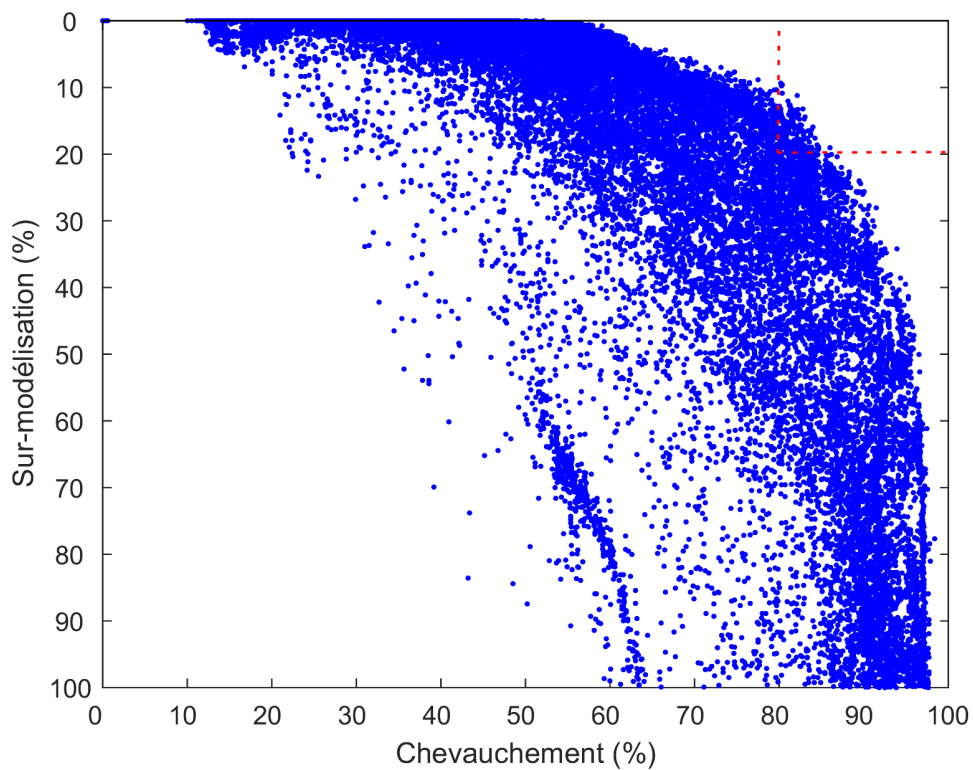


Figure 5.14. – Exemple visuel des pourcentages de chevauchement et sur-modélisation pour les 5760 combinaisons simulées pour un des 28 événements historiques. La zone indiquée par les traits pointillés rouge marque les meilleures reproductions de l'enveloppe de cet événement.

6. Résultats de l'analyse de la propagation

6.1. Résultats de laboratoire

La figure 6.1 montre la relation entre la distance de propagation et la teneur en eau pour les matériaux extraits des sols de Trub (BE), Curio (TI) et Gantrisch (BE). Le matériau de Trub et de Curio se comporte de manière similaire au matériau C de Hürlimann *et al.* (2015). Comme les distributions de taille des particules sont comparables, cela correspond à nos attentes. Similairement, il a été constaté que le matériau argileux de Gantrisch doit avoir une très forte teneur en eau pour pouvoir couvrir des distances de propagation extrêmes.

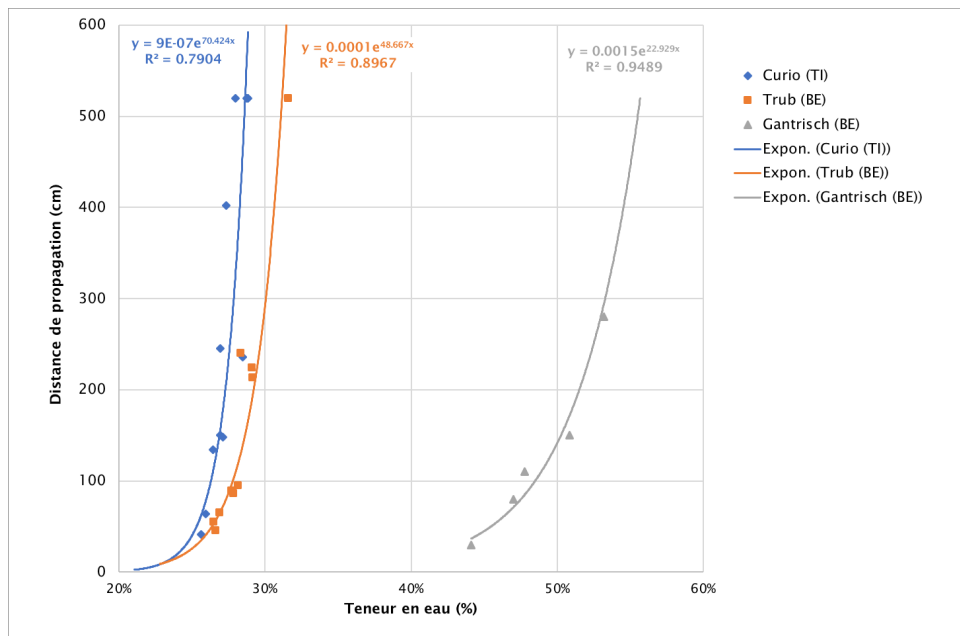


Figure 6.1. – Relation entre la distance de propagation et la teneur en eau pour les matériaux extraits des sols.

6.2. Résultats de YADE des expérimentations de terrain

6.2.1. Hauteur d'écoulement et vitesse

La figure 6.2a montre la comparaison entre la hauteur maximale d'écoulement mesurée à la section 2 dans les expérimentations de terrain sélectionnées avec les valeurs des simulations numériques correspondantes les mieux adaptées. On peut voir qu'un très bon lien est observé pour les essais 10 et 11 lorsqu'on les compare aux résultats de YADE. Pour les tests 13, 14, 15 et 16, un lien relativement bon est observé, la marge d'erreur maximale étant de 15 %. La concordance la plus faible est observée pour le test n°9 qui présente un écart de près de +38%. Ce test a montré la plus grande variation par rapport à la moyenne lorsqu'il est comparé à d'autres tests expérimentaux.

Pour la vitesse d'écoulement, on observe une meilleure corrélation entre l'expérience et les résultats de YADE (fig. 6.2b). Par exemple, pour les tests 10, 11 et 13, la vitesse moyenne observée est bien reproduite par YADE. Pour les tests 9, 14 et 15, une vitesse d'écoulement relativement similaire est observée à la fois pour l'expérience et le modèle. La seule différence importante entre YADE et l'expérimentation est observée pour

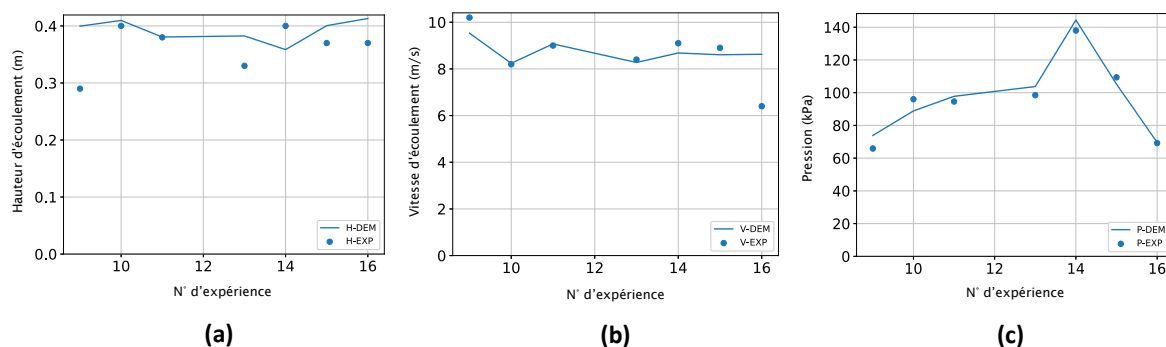


Figure 6.2. – **(a)** hauteur maximale d'écoulement à la section 2 pour les données expérimentales (H-Exp) et les simulations correspondantes du meilleur ajustement de YADE (H-DEM) ; **(b)** vitesse du front d'écoulement, mesurée entre les sections 1 et 2, pour les données expérimentales (V-Exp) et les simulations de YADE correspondantes les mieux adaptées (V-DEM) ; **(c)** pression maximale appliquée au grand capteur pour les données expérimentales (P-Exp) et les simulations de YADE correspondantes les mieux adaptées (P-DEM).

le test n°16 pour lequel la valeur expérimentale est de 6,4 m/s et la vitesse d'écoulement de la simulation la mieux adaptée est de 8,5 m/s.

6.2.2. Pression d'impact

La figure 6.2c montre la pression d'impact maximale appliquée au grand capteur pour les simulations de l'expérience et du modèle à éléments discrets. Une très bonne corrélation est observée pour la plupart des expériences par rapport aux simulations correspondantes ajustées. Pour l'essai n°9, la pression maximale enregistrée pendant l'expérience était égale à 65,9 kPa alors que la valeur du modèle correspondant enregistrée dans la simulation était de 73,8 kPa, ce qui donne un écart de +11%. Tous les autres tests ont eu des valeurs d'écart plus faibles lors de la comparaison des pressions entre les expériences et les simulations les mieux ajustées. La meilleure corrélation est observée pour les tests 11, 15 et 16 où les erreurs ne dépassent pas 4%. Cependant, il est important de comparer l'évolution de la pression pour les différents tests en plus de la comparaison avec les valeurs de pression maximale. En effet, différentes évolutions de la pression peuvent mener à la même valeur maximale. Un intervalle de filtrage plus important a été appliqué aux signaux de pression de l'expérience et aux simulations de YADE afin d'obtenir des courbes d'évolution de la pression qui peuvent être comparées correctement.

L'évolution de la pression appliquée au grand capteur pendant l'essai expérimental n°9 est illustrée sur la figure 6.3a avec sa simulation correspondante de YADE la mieux ajustée. Au début de l'impact ($3,25 < t < 4,2$ secondes), la courbe de YADE commence à enregistrer les valeurs de pression qui sont dues aux groupes de particules diluées qui se détachent de l'écoulement principal et percutent individuellement la paroi rigide représentant le capteur de pression dans la simulation. Par la suite, les deux courbes s'accordent bien l'une avec l'autre jusqu'à atteindre des valeurs de pointe similaires à des moments proches (64 et 70 kPa pour l'expérience et YADE respectivement). Après la phase de pression d'impact maximale, les deux pressions commencent à diminuer avec des taux similaires jusqu'à $t = 6,35$ secondes. Une nouvelle diminution de la pression s'avère plus rapide dans l'expérience par rapport à YADE où la diminution se produit sur des périodes plus longues. À la fin, le signal de pression dans YADE est en retard de 2 secondes par rapport à celui de l'expérience.

Des observations similaires peuvent être faites en comparant les valeurs de pression de l'essai n°14 avec la simulation de YADE correspondante (fig. 6.3b). Une première phase d'impact du groupe de particules diluées provoque une augmentation des valeurs de pression pour YADE sans augmentation équivalente dans l'expérience. Par la suite, les deux courbes de pression s'accordent bien jusqu'à atteindre des pics très similaires (122 et 128 kPa pour l'expérience et YADE respectivement). La diminution de la pression qui suit les pics a des taux similaires pour l'expérience et la modélisation YADE jusqu'à ce que $t = 8$ secondes. Par la suite, les

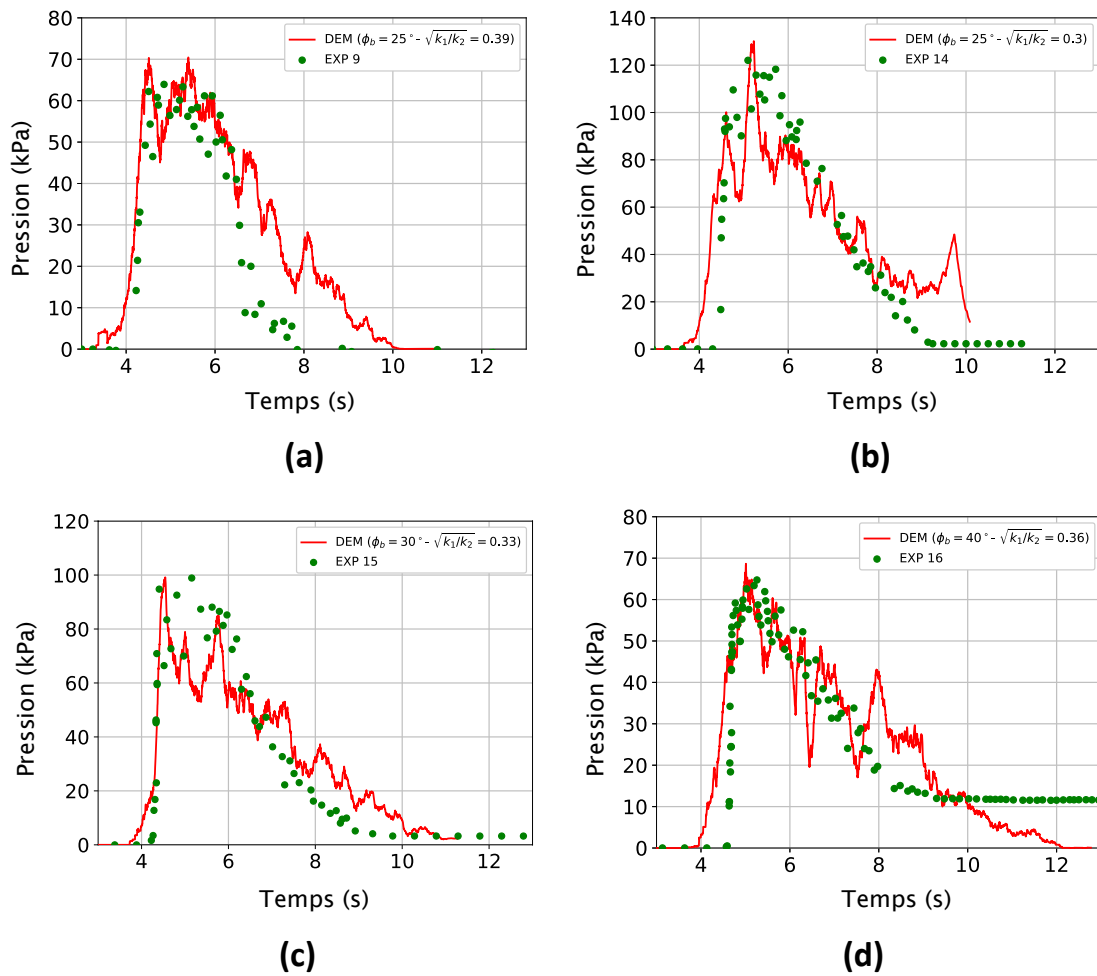


Figure 6.3. – Évolution de la pression d'impact sur la grande plaque pour l'essai et la simulation de YADE respective ajustée : (a) n°9; (b) n°14; (c) n°15; (d) n°16.

valeurs de pression de l'expérience diminuent plus rapidement tandis que celles de YADE accusent un retard, ce qui fait que la durée totale de l'impact de YADE est supérieure à celle de l'expérience.

Les essais 11, 13 et 15, dont les conditions initiales du matériau granulaire étaient très similaires et dont les valeurs des paramètres mesurés (vitesse et pression en hauteur) étaient également semblables, se sont avérés les mieux adaptés à des ensembles de paramètres similaires dans YADE ($\phi_b = (25, 30, 30^\circ)$, $\sqrt{k_1/k_2} = (0.33, 0.30, 0.33)$). Par exemple, la comparaison entre les valeurs de pression enregistrées au cours de l'expérience n°15 et celles de la simulation correspondante du meilleur ajustement de YADE révèle une tendance similaire (fig. 6.3c). Au début, l'évolution du signal de pression dans YADE commence un peu plus tôt que celle de l'expérience. Par la suite, une forte augmentation de la pression est observée pour l'expérience et YADE, où tous deux atteignent des valeurs maximales de force d'impact en très peu de temps. Les pics atteints sont très similaires en valeur et correspondent à 100 kPa pour les deux signaux. Après le pic, les valeurs de pression de l'expérience diminuent à une vitesse similaire à celle de YADE jusqu'à ce que $t = 6,5$ secondes. Une nouvelle diminution du signal de pression est plus rapide pour l'expérience alors que le signal de YADE est retardé, mais avec une marge plus petite par rapport aux tests précédents.

La dernière comparaison concerne le test n°16 qui s'avère être en accord avec la simulation correspondante du meilleur ajustement de YADE concernant l'évolution de la pression (fig. 6.3d). À part le début précoce de la courbe de YADE (environ 0,5 seconde plus tôt), qui est dû au front de dilution, on constate que les deux courbes atteignent des valeurs de pression de pointe très similaires (65 kPa pour l'expérience et 69 kPa pour la simulation de YADE) à un moment similaire ($t = 5,2$ s). Ensuite, les deux courbes de pression commencent

à diminuer à des taux similaires jusqu'à $t = 7,5$ secondes. On constate alors que les valeurs de pression de l'essai n°16 diminuent plus rapidement que celles de la simulation jusqu'à atteindre des valeurs de pression statique d'environ 12 kPa, ce qui indique le dépôt d'un certain matériau sur le capteur de pression. La courbe de YADE diminue progressivement sur une plus longue période jusqu'à atteindre zéro à $t = 12,1$ secondes.

6.2.3. Meilleur ajustement des paramètres de YADE

Les résultats de toutes les simulations de YADE sont mieux adaptés aux données expérimentales des tests effectués sur le site de Veltheim en utilisant l'équation (5.5). La figure 6.4 montre la correspondance entre les tests expérimentaux et leurs paramètres YADE respectifs les mieux ajustés, sur la base de comparaisons de la hauteur d'écoulement, de la vitesse d'écoulement et de la pression d'impact sur le grand capteur. Les tests 10, 11, 13, 14 et 15 se sont avérés reproductibles avec des valeurs très similaires de l'ensemble de paramètres $\sqrt{k_1/k_2}$ et ϕ_b (fig. 6.4). Ces tests se sont avérés avoir des valeurs similaires de la teneur en eau du matériau granulaire préparé dans le réservoir (entre 16 et 23%). En outre, ils ont tendance à avoir des valeurs similaires de contenu fin (limon et argile) qui se situe entre 21 et 28%. Le test n°9 est le mieux reproduit par $\sqrt{k_1/k_2} = 0,36$ et $\phi_b = 25^\circ$ tandis que le test n°16 est le mieux reproduit par $\sqrt{k_1/k_2} = 0,36$ et $\phi_b = 40^\circ$.

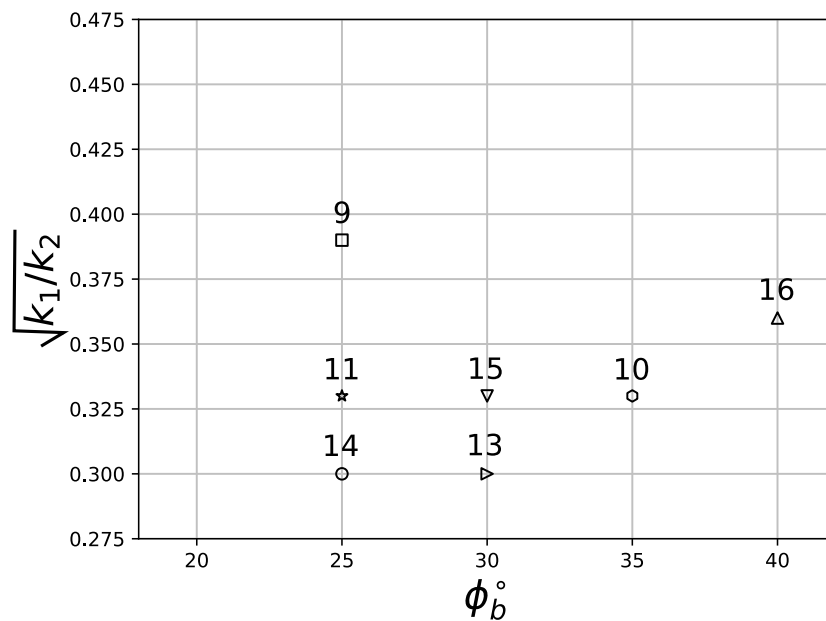


Figure 6.4. – Ensemble de paramètres le mieux adapté ($\sqrt{k_1/k_2}$ et ϕ_b) pour chacun des essais expérimentaux sélectionnés sur la base de la comparaison de la hauteur d'écoulement, de la vitesse frontale moyenne et de la pression maximale appliquée.

6.3. Résultats de YADE des événements historiques

6.3.1. Influence des paramètres de YADE sur la distance de propagation

Les simulations avec toutes les combinaisons de paramètres YADE pour les six zones d'étude qui ont été instiguées sur place (cas n°2, 8, 10, 12, 13 et 17) montrent une grande variation des distances de propagation (fig. 6.5). Cela correspond à l'influence de la teneur en eau, de manière analogue aux tests en laboratoire. Dans YADE, la teneur en eau est contrôlée par l'angle de frottement basal, tandis que la teneur en particules fines est contrôlée par le paramètre d'adhésion entre les particules ($\sqrt{k_1/k_2}$). Les résultats des différentes combinaisons de paramètres en YADE montrent que le rapport entre la distance de propagation simulée et la distance de propagation mesurée varie entre 10 et 185%. Ceci est directement lié à la valeur de l'angle de

frottement de base : une valeur faible entraîne de longues distances de propagation, tandis qu'une valeur très élevée entraîne une absence totale d'écoulement du matériau.

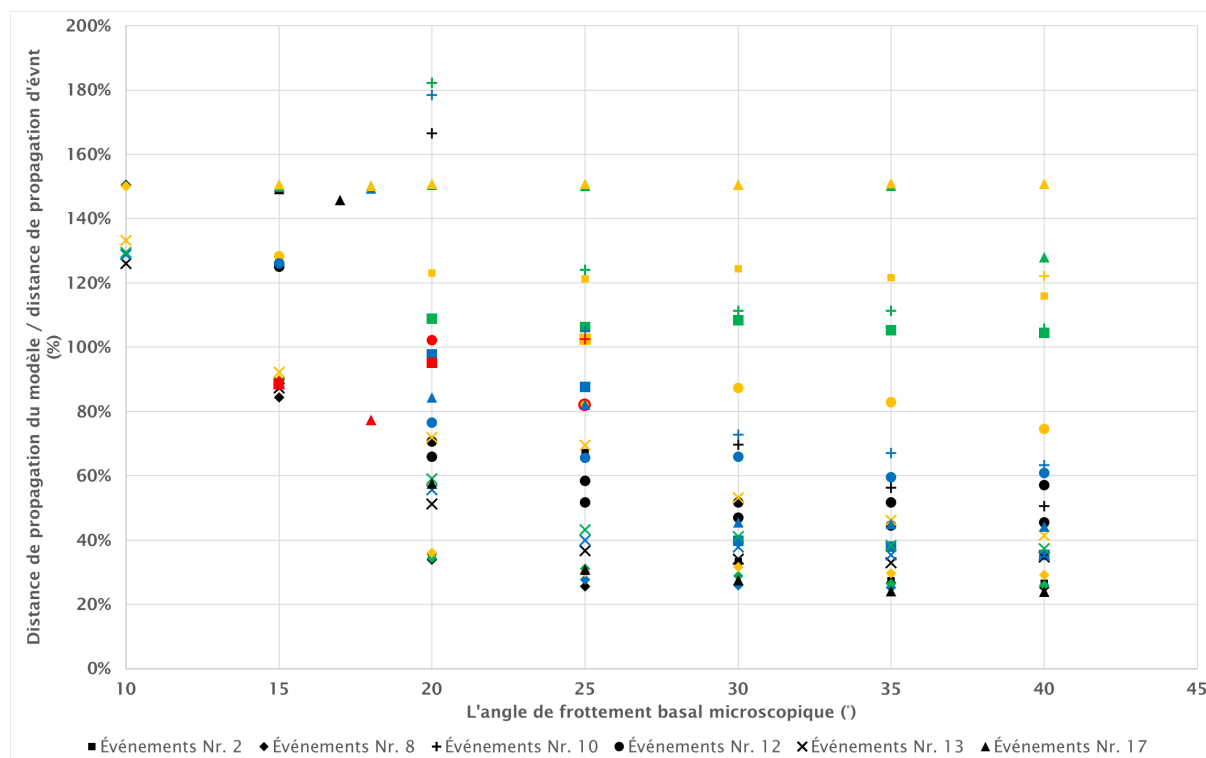


Figure 6.5. – Relation entre l'angle de frottement de base du modèle et la distance de propagation (simulation / réalité) pour six cas d'étude (n°2, 8, 10, 12, 13 et 17). Noir : $\sqrt{k_1/k_2} = 0,30$, bleu : $\sqrt{k_1/k_2} = 0,35$, vert : $\sqrt{k_1/k_2} = 0,40$ et jaune : $\sqrt{k_1/k_2} = 0,45$. Les marqueurs rouges représentent les paramètres idéaux.

En outre, l'influence de l'angle de frottement sur la distance de propagation varie considérablement selon le cas étudié. Par exemple, le rapport entre la distance de propagation réelle et simulée varie de 24% à 150%, avec un $\sqrt{k_1/k_2} = 0,3$ et un angle de frottement réduit de 40° à 15°. Pour l'événement n°13 et pour la même variation de l'angle de frottement, on constate que la distance de propagation varie de 33% à 87%. Cela s'explique notamment par le fait que la sensibilité des paramètres du modèle est également liée aux conditions topographiques du cas étudié.

6.3.2. Catégorisation des meilleures simulations

Les simulations les mieux adaptées sont classées en quatre catégories de type de coulée (TC), comme indiqué dans la section 5.4.3. (fig. 6.6). 5 événements sur les 28 sont reproduits dans YADE en utilisant le paramètre défini par la TC 1 qui correspond à un événement très fluide avec une faible adhérence. Un seul événement (n°4) a été produit par le jeu de paramètres de la TC 2. La majorité des événements (19) ont été produits par l'ensemble des paramètres de la TC 3. Ces événements ont été simulés par un angle de frottement relativement faible et une forte adhérence. Les dernières 3 simulations sont produites par l'ensemble des paramètres de la TC 4. Cette catégorisation est liée aux simulations de SlideForce afin de classer les paramètres en fonction de la fluidité de l'événement et de son contenu en particules fines (voir 6.4.2).

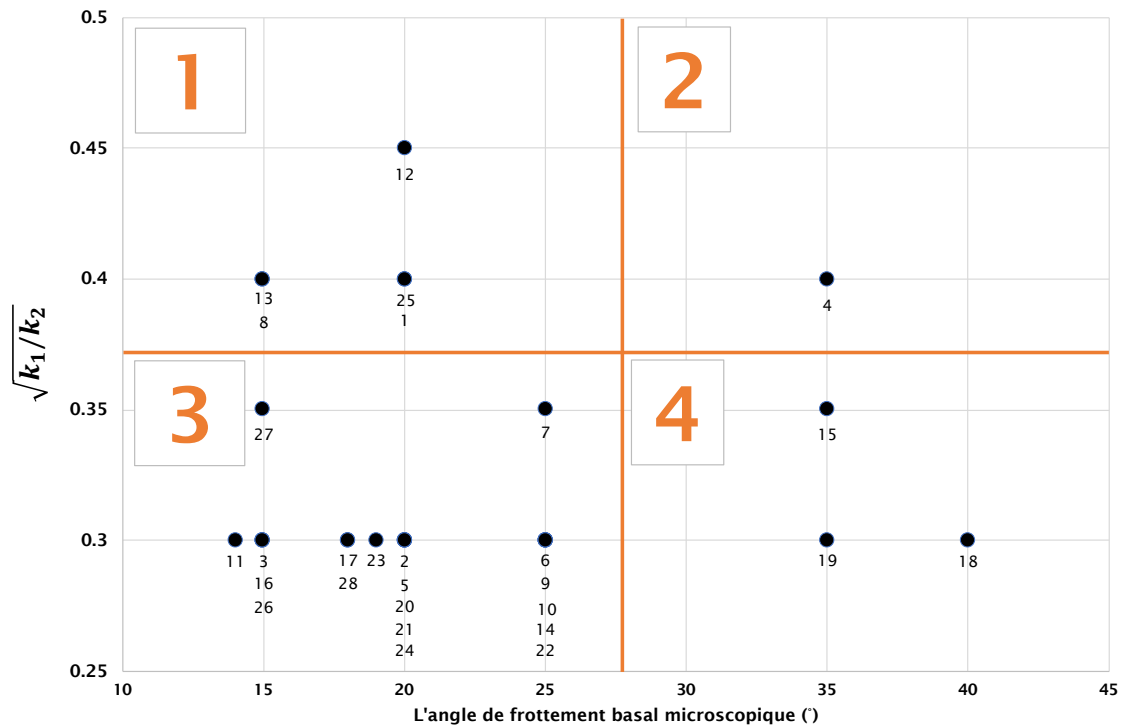


Figure 6.6. – Classification des meilleures simulations pour les 28 événements historiques en quatre type de coulée (TC) : TC 1 = événements très fluides avec une faible adhérence ; TC 2 = événements fluides avec une faible adhérence ; TC 3 = événements très fluides avec une forte adhérence ; TC 4 = événements fluides avec une forte adhérence.

6.4. Résultats de SlideForce

6.4.1. Calibration des paramètres

Basé sur l'approche décrite dans la section 5.5, chaque événements à été modélisé en utilisant un large panel de combinaisons afin d'extraire les meilleures combinaisons de paramètres applicables a la simulations des événements réels. Étant donné la variabilité des paramètres utilisés et la versatilité du modèle SlideForce, nous observons une grande variation de la distance de propagation maximale. Cependant, nous avons aussi observé que pour chaque modélisation d'événement réel, nous pouvons extraire plusieurs combinaisons de paramètres qui sont convaincantes afin de reproduire l'événement réel (voir fig. 5.13). Afin de proposer un modèle robuste utilisable pour la pratique, nous avons utilisé les distributions des valeurs de paramètres pour chacun des 4 TC défini par les résultats de YADE pour reproduire les événements historiques (voir fig. 6.6).

Le premier paramètre $MovMass_{limit}$ décrivant l'épaisseur conditionnelle minimale de l'arrêt des simulations oscille entre 1 cm et 10 cm (voir fig. 6.7). $MovMass_{limit} = 1$ cm est possible uniquement pour TC = 1, soit un événement très fluide avec une faible adhérence. $MovMass_{limit} = 5$ cm et $MovMass_{limit} = 10$ cm sont possibles pour les 4 TC, avec la condition à 10 cm prenant le plus d'importance avec la TC 2 (moins fluide avec une faible adhérence).

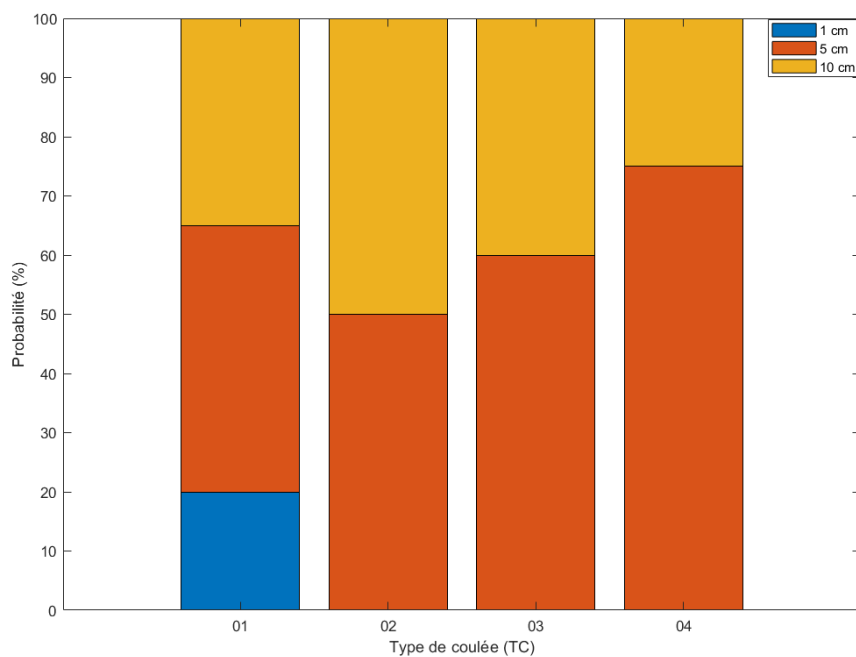


Figure 6.7. – Variabilité de la profondeur d'arrêt de modélisation de l'écoulement ($MovMassLimit$) selon le type de coulée.

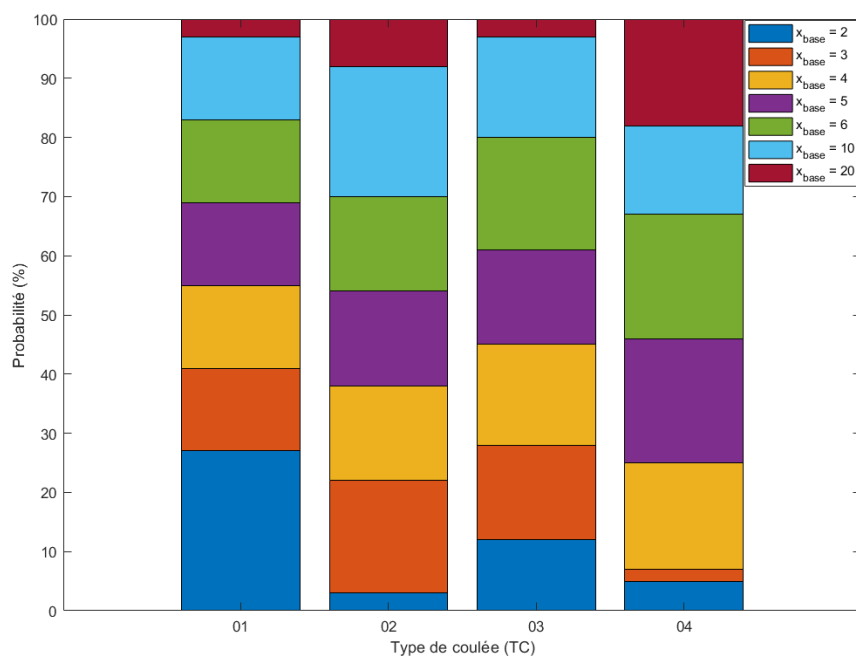


Figure 6.8. – Variabilité du paramètre x_{base} .

La plage de variation de la valeur x utilisée dans l'équation de Holmgren (eq. 5.6) est montrée dans la figure 6.8. Toute la plage de valeur étudiée lors de la calibration du modèle SlideForce est finalement utilisée, allant d'une valeur de $x_{base} = 2$ (coulée très divergente) à $x_{base} = 20$ (coulée très convergente). Chaque valeur de x_{base} est associée à une valeur fixe pour la variation aléatoire x_{var} , permettant de reproduire la variabilité de

l'écoulement. Ces valeurs sont données dans le tableau 6.1 et découlent des analyses des paramètres utilisés pour reproduire des événements réels.

Table 6.1. – Les valeurs x_{var} selon le TC et la valeur de x_{base} .

TC	x_{base}	2	3	4	5	6	10	20
TC 1	x_{var}	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.8	3.8
TC 2	x_{var}	2.11	2.09	2.08	2.07	2.06	2.01	1.89
TC 3	x_{var}	2.25	2.27	2.27	2.30	2.30	2.32	2.37
TC 4	x_{var}	1.7	1.75	1.8	1.85	1.9	2.1	2.5

Suite aux essais préliminaires, les variations de la quantité de matériel appliquée dans l'axe de plus grande pente (Q_p) ont été fixées à 0, 50 et 100%. Ainsi pour chaque modélisation de coulée de boue de versant, la répartition des valeurs de (Q_p) est donnée dans la figure 6.9. Les TC 1, 2 et 3 sont simulés avec des valeurs de Q_p de 0, 50 et 100%, tandis que TC 4 sera modélisé avec une majorité de valeurs de $Q_p = 100\%$ (env. 60%) et le reste de $Q_p = 50\%$.

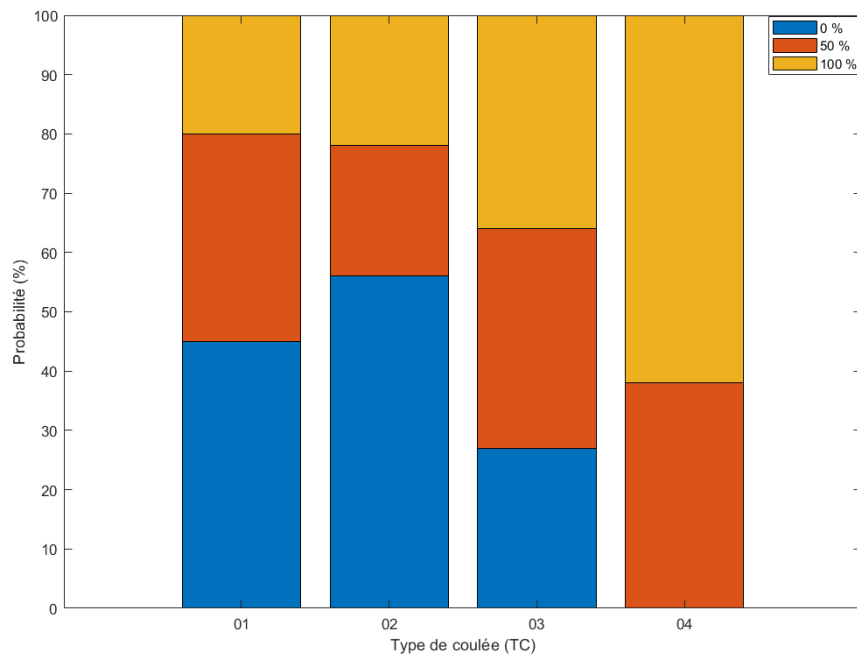


Figure 6.9. – Poids (%) dans la direction de plus grande pente.

Enfin, la figure 6.10 représente l'opérateur géométrique *WinOP* appliqué à la masse dans la coulée après chaque pas de redistribution dans *SlideForce*. Pour TC 2, on observe une utilisation unique du filtre n°1, qui est un filtre moyen. Pour TC 4, les filtres moyen (n°1) et médian (n°2) sont utilisés, tandis que pour TC 1 et 3 les opérateurs géométriques utilisés sont les opérateurs moyen, médian ainsi qu'aucun opérateur.

Table 6.2. – Valeurs des paramètres pour le calcul de la vitesse.

Type de coulée (TC)	1	2	3	4
μ (coefficient de friction)	0.2	0.35	0.20	0.35
ω (mass-to-drag ratio)	80	80	40	40

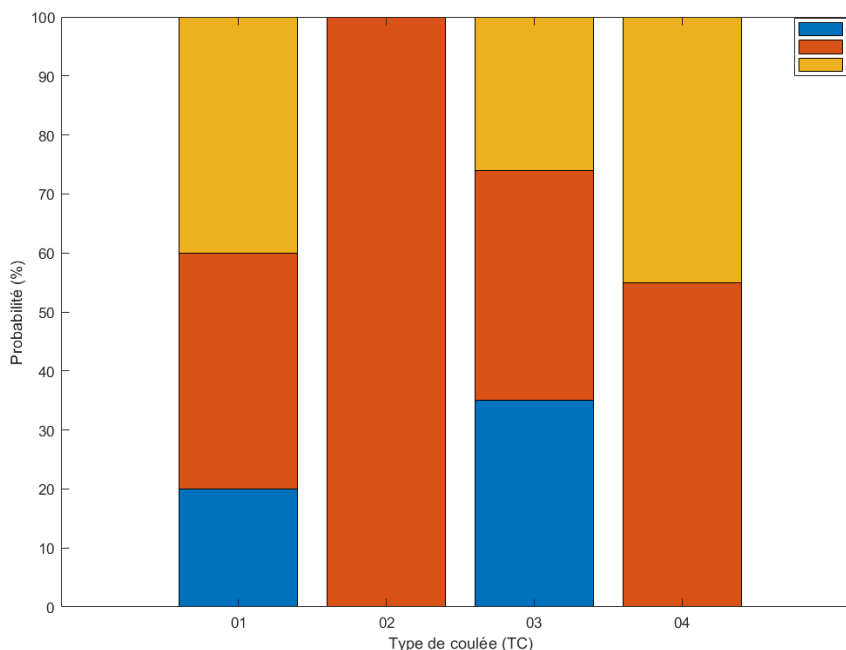


Figure 6.10. – Opérateur géométrique : 0 : Pas de filtre appliqué, 1 : filtre moyen, 2 : filtre médian.

Basé sur les résultats de YADE, nous avons également fixé les paramètres ω (*mass-to-drag ratio*) et μ , utilisés pour le calcul de vitesse dans SlideForce, pour chaque TC comme présenté dans le tableau 6.2. Pour chaque simulation, l'utilisateur a la possibilité de fixer la hauteur d'écoulement maximale ($H_{coul_{max}}$). Par défaut, $H_{coul_{max}} = 1.5$ m. La zone de départ ainsi que la profondeur d'arrachement doivent également être définies par l'utilisateur.

6.4.2. Simulation des événements historiques

En utilisant les plages de valeur définies pour tous les paramètres, nous avons exécuté 500 simulations par événement historique afin de reproduire les 28 cas. Les résultats montrent que SlideForce, en comparaison avec YADE (voir tableau 6.3), prédit systématiquement des hauteurs d'écoulement (H_{coul}) plus faibles. L'erreur moyenne (calculée comme H_{coul} de YADE minus H_{coul} de SlideForce) est de 0.5 m et l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est de 0.7 m. Pour les vitesses simulées, nous n'observons pas d'erreur systématique comparable à H_{coul} , l'erreur moyenne est seulement de -0.5 m/s. En revanche l'erreur minimale est de -7 m/s et l'erreur maximale de 11 m/s (RMSE 4.2 m/s). Comme les deux variables H_{coul} et la vitesse sont utilisées pour le calcul de la pression, l'erreur moyenne de la pression monte à 9.5 kPa (RMSE 86 kPa; min. -150 kPa, max. 353 kPa). La comparaison entre les enveloppes des événements historiques et les zones de propagation simulées a montré que, dans 17 cas (61%), la meilleure reproduction de l'événement historique par YADE et SlideForce représente un TC identique. Dans les 9 autres cas, les TC dans YADE et SlideForce diffèrent. Suite à la comparaison des enveloppes de propagation modélisées et des événements historiques (réel vs. simulés), nous avons conclu que, de manière générale, les meilleurs résultats sont obtenus grâce à une troncature des résultats sous la valeur de 50% de probabilité d'atteinte. Toutes les cartes des enveloppes des zones de propagations simulées sont disponibles dans l'annexe D.

Table 6.3. – Variables cinématiques YADE vs. SlideForce pour les 28 événements historiques.

N° Evt	YADE			SlideForce		
	<i>H_coul</i> (m)	Vitesse (m/s)	Pression (kPa)	<i>H_coul</i> (m)	Vitesse (m/s)	Pression (kPa)
1	1.0	6	47	0.5	8	67
2	1.0	7	57	0.4	9	80
3	0.2	6	31	0.2	2	7
4	0.8	13	164	0.6	8	68
5	1.0	11	120	0.1	9	75
6	0.6	4	24	0.4	8	65
7	0.6	7	49	0.3	5	28
8	0.4	6	38	0.3	5	29
9	0.6	6	43	0.2	6	36
10	2.2	7	83	0.3	9	78
11	0.6	1	12	0.2	4	16
12	1.0	1	19	0.2	4	18
13	0.6	4	25	0.5	2	12
14	1.0	7	67	0.7	12	141
15	1.4	7	69	1.0	12	147
16	0.6	7	59	0.3	10	96
17	0.2	8	59	0.1	4	19
18	0.4	2	12	0.1	9	75
19	0.8	1	15	0.5	8	66
20	1.0	8	75	0.6	10	98
21	0.6	5	30	0.3	6	37
22	2.4	11	152	0.6	18	302
23	0.8	5	37	0.3	5	28
24	1.2	13	166	0.1	7	47
25	0.6	14	187	0.3	8	62
26	1.0	22	453	0.1	11	110
27	1.2	4	39	0.9	5	34
28	0.8	5	37	0.4	8	65

7. Discussion

7.1. Analyse de l'arrachement

La surface de la zone d'arrachement simulée par SOSlope dans la zone de Curio est plus d'une fois et demi plus grande que celle indiquée dans StorMe. La surestimation pourrait s'expliquer par la profondeur du sol utilisée dans la simulation (1 - 1,3 m ; déterminée automatiquement par le modèle de profondeur de sol de SOSlope) et la répartition des arbres autour de la zone d'arrachement. La profondeur du sol détermine fortement le renforcement des racines basales : plus le sol est profond, plus les effets des racines sont faibles, et à partir d'environ 2 m, celles-ci ne sont plus présentes. Au cours de l'enquête de terrain, il a été observé aux alentours de la zone d'arrachement que la profondeur du sol était entre 0,5 à 1 m (la vraie profondeur du sol au milieu de la zone étant très difficile à estimer). Ces différences entre la profondeur réelle et la profondeur simulée du sol pourraient avoir conduit à des surestimations. Outre la profondeur du sol, la position des arbres peut également avoir une influence. Toutes les simulations ont été réalisées avec une distribution spatiale des arbres régulière, qui ne correspond pas à la réalité. Il est donc probable que le renforcement des racines simulé en raison de la distribution supposée ne corresponde pas à celui de l'ancien peuplement. Pour cette raison, les positions des arbres sont un aspect important pour la fiabilité des résultats : plus la distribution des arbres est précise, plus les résultats sont proches de la réalité.

Avec une résolution de 2 m, la dynamique du déplacement entre les cellules adjacentes est considérée avec plus de précision dans SOSlope. Cela permet au modèle de calculer un déplacement critique d'une cellule de 2 mètres et la simulation des cellules voisines qui commencent à glisser en raison de la transmission des forces. A cause des déplacements faibles (max. 4 cm au lieu de quelques mètres) simulées, nous supposons que cette dynamique pourrait être perdue en raison d'une résolution plus grossière (5 mètres le cas échéant). Par contre, d'autres expériences avec SOSlope en utilisant des résolutions de ≤ 1 m ont générés des problèmes avec la gestion de la quantité des forces de liaison. C'est pourquoi, nous conseillons d'utiliser une résolution des rasters d'entrée de 2 m.

Les simulations avec les différentes valeurs de la teneur en eau initiale du sol ont montré leurs grande importance pour la simulation d'un glissement de terrain. Cette constatation conduit à une question ouverte concernant la détermination des périodes de retour : pour les processus de glissement de terrain, seule l'intensité des précipitations sur un certain intervalle de temps est prise en compte. Étant donné que les résultats obtenus montrent une forte dépendance de la teneur en eau initiale du sol, la question se pose comment celle-ci peut également être prise en compte pour déterminer les périodes de retour des événements.

Malgré le fait que les simulations avec SOSlope aient montré que la forêt "actuelle" à Curio 1) n'est pas en mesure d'éviter des arrachements des glissements superficiels (comme dans la réalité) et que 2) la différence entre la forêt actuelle et une situation sans forêt est négligeable, le renforcement des racines est un facteur important dans la modélisation de l'arrachement des glissements superficiels. Pour Curio, les simulations réalisées ont montré qu'une forêt idéale serait en mesure de prévenir un scénario de précipitation trentennale. L'événement ayant été classé avec une période de retour de 20 à 50 ans, une forêt idéale aurait probablement été capable d'éviter le drame de Bombinasco.

Les valeurs de PRCC des tests de sensibilité LHS du modèle SlideForMAP ont également confirmé l'importance du renforcement des racines, même si une représentation précise de la forêt n'a pas amélioré la retro-calculation des événements historiques. Surtout à StA, beaucoup de glissements ont été observés dans des zones où il n'y avait peu ou pas de renforcement des racines. On remarque que l'utilisation de la méthode AUC pour des régions à pentes faibles montre des différences minimales pour différents scénarios de végétation. En outre, les zones très étendues, où l'activité historique des glissements est faible, donnent une précision plus élevée. Cela explique l'écart entre les résultats dans les trois zones étudiées, et montre qu'une des activités de recherche future devrait être le développement d'une méthode d'évaluation de la précision prenant en compte l'effet d'une activité historique faible dans les données de validation.

7.2. Analyse de la propagation

7.2.1. Expériences de laboratoire

Les résultats des tests en laboratoire avec les matériaux de sol extraits du terrain montrent une forte relation entre la teneur en eau du sol et la distance de propagation mesurée (fig. 6.1). Les courbes représentant les cas de Trub et Curio (cas n°2 et 10 respectivement) se sont avérées similaires, car elles partagent une distribution granulométrique similaire. De plus, pour le sol très cohésif de Gantrisch (BE), la teneur en eau nécessaire à la reproduction des distances de propagation similaires aux événements de Trub et Curio est bien plus élevée. Des études précédentes impliquant des expériences en laboratoire de coulées de boue de versant ont abouti à des conclusions similaires concernant l'effet de la teneur en eau et celui des matériaux fins sur la distance d'écoulement (Hürlimann *et al.*, 2015).

Bien que l'utilisation de matériaux naturels extraits de la zone de départ des événements passés engendre une plus grande variation de la distance de propagation en fonction de la teneur en eau et en particules fines, l'effet de la rupture initiale sur la distance de propagation n'a pas été pris en compte. Toutes les expériences ont été démarrées de manière similaire par une rupture soudaine du barrage. Des conditions initiales différentes conduiraient à une distance de propagation différente en raison d'un changement dans le développement de la pression de l'eau interstitielle et finalement du style de rupture.

7.2.2. Expérimentations en grandeur nature : calibration de YADE

Les résultats des simulations de meilleur ajustement basées sur la hauteur d'écoulement, la vitesse frontale moyenne et la pression maximale appliquée ont révélé que les essais expérimentaux (11, 13 et 15) pouvaient être reproduits en utilisant un ensemble de paramètres similaires dans YADE, comme déjà vu dans la section 6.2.3. Les essais n°9 et 16 ont été reproduits avec un ensemble de paramètres très différents. La différence entre les paramètres numériques du meilleur ajustement ne peut pas s'expliquer par les valeurs de pression qui sont très similaires pour les deux tests (65,9 et 69,2 KPa, respectivement pour les épreuves 9 et 16). Malgré ce fait, l'essai n°9 a enregistré la vitesse frontale moyenne la plus élevée (10,2 m/s), peut-être en raison de la teneur en eau la plus élevée (28%). Contrairement à d'autres essais, un matériau s'écoulant à une vitesse aussi élevée n'a pas contribué à une valeur de pression élevée, principalement parce que cet essai présentait un haut taux de matériaux fins (c.-à-d. le plus faible pourcentage de sable) et par conséquent la plus faible densité humide (1790 kg/m³). Toutes ces conditions se reflètent dans la valeur du paramètre de l'angle de frottement basal le mieux ajusté dans YADE, qui est parmi les plus faibles de toutes les modélisations ajustées.

D'autre part, le test n°16 avait une faible teneur en eau dans le matériau libéré (14%) mais une teneur en particules fines relativement élevée (41%). Cela a contribué de manière significative à sa densité humide, qui est la plus élevée de tous les tests (2110 kg/m³). Cependant, la faible teneur en eau du matériau granulaire pourrait être liée à sa faible vitesse frontale moyenne, qui était la plus faible de tous les tests (6,4 m/s). Cette faible vitesse d'écoulement a probablement été la principale raison de la faible valeur de pression maximale enregistrée lors de cet essai. Toutes ces conditions initiales (en particulier la faible teneur en eau) ont été retransmises dans la valeur du paramètre d'angle de frottement basal le mieux ajusté dans YADE, qui est le plus élevé parmi toutes les simulations les mieux ajustées (40°).

Il convient de noter que les tentatives de fonder le best-fit uniquement sur une partie de l'équation (5.5) n'ont pas donné de résultats cohérents en termes de relation entre les conditions initiales de l'essai expérimental et l'ensemble des paramètres du modèle $\sqrt{k_1/k_2}$ et ϕ_b .

Dans l'ensemble, pour tirer des conclusions solides sur la relation entre les conditions initiales des échantillons granulaires et les paramètres du modèle YADE, il est nécessaire de disposer de données expérimentales avec un éventail plus large de teneurs en eau et en particules fines. Les données expérimentales considérées ici présentent une gamme étroite de variation de ces deux paramètres, ce qui se reflète dans les variations étroites des valeurs de hauteur d'écoulement maximum.

7.2.3. Expérimentations en grandeur nature : calcul de pression

Les résultats des expériences de terrain ont montré que le paramètre à la plus forte variation entre les différents tests est la pression d'impact maximale. Ces fortes variations de pression étaient peut-être dues à l'interaction entre les gros blocs de l'écoulement et les capteurs de mesure sur de courtes périodes, bien que cet effet ait été minimisé en filtrant les données sur une période de 0,05 seconde. Ce phénomène est corroboré par le fait que, bien que certains tests aient eu des conditions initiales similaires (teneur en eau et en particules fines) ainsi qu'une hauteur et une vitesse d'écoulement similaires, la pression maximale enregistrée était très différente. Ceci est évident lorsque l'on compare les tests n°11 et 14 qui avaient des valeurs similaires de conditions initiales et d'écoulement mais des pressions différentes de 94,6 kPa et 138 kPa respectivement.

Les comparaisons entre l'évolution de la pression des essais expérimentaux sélectionnés et YADE ont révélé des accords généraux sur les valeurs de pression de pointe et la tendance d'impact. Toutefois, certaines divergences ont été observées concernant le taux et la durée de l'impact. La nature de YADE, dans lesquelles un groupe de particules interagit à l'échelle micro, pourrait avoir contribué à ces différences observées. Par exemple, on a constaté que les signaux de pression au cours des modélisations de YADE commençaient plus tôt que ceux des essais expérimentaux. Cela était dû au détachement d'un groupe de particules de la partie moyenne de l'écoulement, ce qui a entraîné la formation d'une partie frontale diluée qui a eu un impact précoce sur le capteur de pression (fig. 5.8b). En outre, on a constaté que la phase décroissante du signal de pression durait plus longtemps pour YADE que pour les tests expérimentaux. La formation d'une queue diluée pourrait en être responsable, car elle a besoin de plus de temps pour interagir pleinement avec le capteur (une phase de compression de la partie diluée doit d'abord se produire).

Un autre facteur important régissant la pression d'impact est le diamètre moyen des particules (d_{50}). Comme le volume total relâché est fixe, le nombre de particules dans chaque simulation diminue avec l'augmentation de la taille de celle-ci. La figure 7.1 montre l'évolution dans le temps du signal de pression pour les différents diamètres de taille de particules testés. On constate que les signaux de pression commencent relativement au même moment, ce qui indique un temps d'arrivée du flux similaire à celui de l'impact sur le capteur. Par la suite, la pression d'impact maximale est atteinte à différents moments pour les différentes tailles de diamètre. Les simulations avec des particules de petite taille atteignent le pic plus tôt que celles avec des particules de grande taille. Cependant, cette observation peut dépendre de la possibilité qu'une particule plus grosse frappe le capteur à un moment donné. L'augmentation et la diminution rapides du signal de pression, dont on constate qu'il augmente en augmentant la taille du diamètre, sont plus significatives. Cela pourrait être attribué à la distribution de la chaîne de force derrière la paroi. Les chaînes de force dépendent fortement de la position et de l'orientation des particules par rapport à l'objet qu'elles percutent (Azéma et Radjaï, 2012), qui dans ce cas est le grand capteur. La distribution des forces de contact sur le capteur devrait être différente d'une simulation à l'autre, en fonction du nombre de contacts et de la position des grandes et petites particules derrière le capteur (Albaba *et al.*, 2015). La figure 7.2 indique la pression d'impact maximale et le nombre moyen de contacts pour différentes tailles de particules. L'utilisation de $d_{50} = 0,075$ m donne un nombre moyen de contacts pour toute la période d'impact de 3,6 contacts. Ce nombre de contacts diminue rapidement avec l'augmentation de la taille moyenne des particules pour atteindre 1,8 contacts pour $d_{50} = 0,10$ m et encore 1,4 contacts pour $d_{50} = 0,15$ m. En outre, la pression d'impact maximale s'avère inversement proportionnelle au nombre de contacts avec le capteur.

Ces observations soutiennent l'hypothèse selon laquelle les valeurs de pression sont principalement dominées par les contacts directs avec des gros grains solides. Ces contacts influencent fortement le signal de pression. La probabilité qu'une grosse particule ait un impact sur le capteur de pression augmente en augmentant le diamètre moyen d_{50} en raison de la diminution du nombre de contacts. À mesure que les particules augmentent en taille et diminuent en nombre, les mécanismes d'impact tendent à être similaires à ceux des chutes de pierres (charges ponctuelles) plutôt qu'à ceux des coulées de débris (charges progressives réparties en section transversale). La diminution de la pression maximale de l'essai entre des valeurs de diamètre moyen $d_{50} = 125$ mm et $d_{50} = 100$ mm peut être interprétée comme une répercussion du positionnement aléatoire des particules créé dans la boîte au temps initial. En effet, les particules ont un positionnement aléatoire à chaque simulation, ce qui conduit à des distributions différentes dans les phases d'écoulement et d'impact.

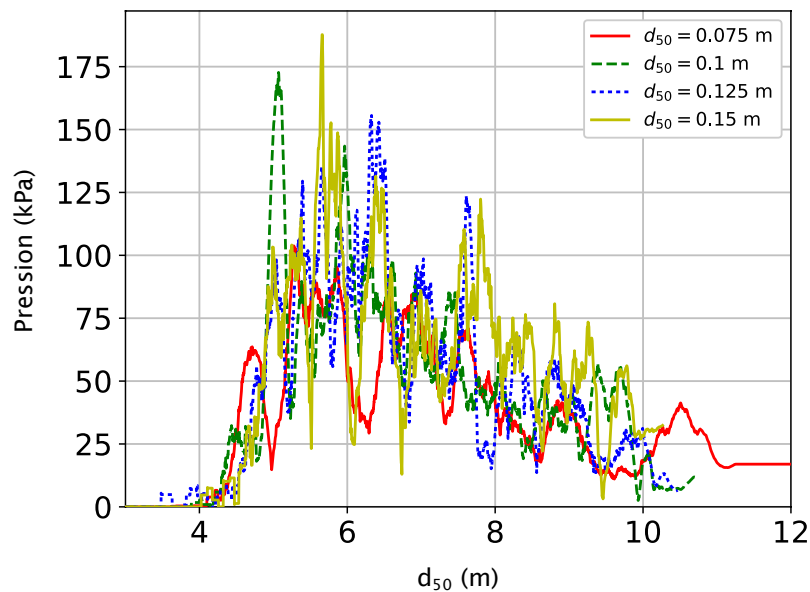


Figure 7.1. – Évolution de la pression sur la grande plaque pour différentes simulations avec différentes valeurs de d_{50} , en utilisant $\phi_b=30^\circ$, $\sqrt{k_1/k_2}=0,3$ et $\alpha = 30^\circ$.

7.2.4. Reproduction des événements historiques par YADE et SlideForce

Comme présenté dans l'annexe C, les modèles YADE et SlideForce produisent des résultats très satisfaisants quant à la reproduction de l'enveloppe de propagation des événements historiques. Nos résultats ont montré que, en générale, la valeur de 50% de probabilité d'atteinte simulée correspond le mieux avec les enveloppes des événements historiques. Cependant, nous observons que pour certains événements réels la reproduction par le modèle YADE et/ou par le modèle SlideForce est imprécise. Nous postulons que ces incertitudes peuvent avoir les sources suivantes : tout d'abord, nous avons observé lors de la création de la base de donnée des inexactitudes dans la zone départ entre les événements cartographiés en SIG et les informations de StorMe (p.ex. la largeur de la zone de départ), ce qui peut se traduire par un volume sur- ou sous-estimé du volume de départ. Ensuite, l'erreur de cartographie de l'événement réel a été corrigée autant que possible notamment avec les photos aériennes post-événements (p.ex. pour le cas n°25) cependant les photos aériennes n'étaient pas toujours disponibles, aussi persiste-t-il une incertitude quant à la comparaison des modélisations aux événements réels (p. ex. les cas n°3 et 13, où les 2 logiciels prédisent un écoulement différent de l'événement réel). Finalement, une adaptation de la valeur de probabilité d'atteinte simulée pour définir la zone de propagation réaliste produite par le modèle peut améliorer la reproduction de l'enveloppe de propagation des événements historiques. Dans le temps, l'expérience dans la pratique aidera à établir la gamme de valeurs à utiliser pour transformer la carte des probabilités d'atteinte en carte de zone de propagation réaliste.

Un autre point important est que, dans les deux modèles YADE et SlideForce, l'effet de la forêt n'a pas été pris en compte. En effet, aucun objet numérique représentant des arbres n'a été ajouté aux modèles. La forêt pourrait jouer un rôle majeur non seulement dans la stabilisation de la pente mais aussi dans la réduction de l'énergie cinétique de la masse en mouvement et l'influence de la direction d'écoulement. Les simulations numériques avec YADE et SlideForce des cas avec une forte présence de la forêt dans les zones de transit et de dépôt (cas n°12, 16 et 18) se sont avérées moins conformes aux événements historiques. Les polygones des événements simulés étaient soit plus longs que les événements historiques (par exemple, le cas n°16), soit suivaient un chemin différent en raison de l'absence d'arbres qui auraient détourné le flux (par exemple, les cas n°12 et 18). Cependant, pour les simulations avec YADE, les événements avec des angles de pente élevés mais des distances de propagation courtes dues à l'effet de la forêt ont pu être reproduits en utilisant un angle de frottement basal élevé (jusqu'à 40°), comme pour le cas n°18.

Au niveau de la cinématique, on voit des différences notables. Il a été constaté que la hauteur d'écoulement dans YADE était systématiquement plus élevée que celle modélisée dans SlideForce. Ceci est dû au diamètre

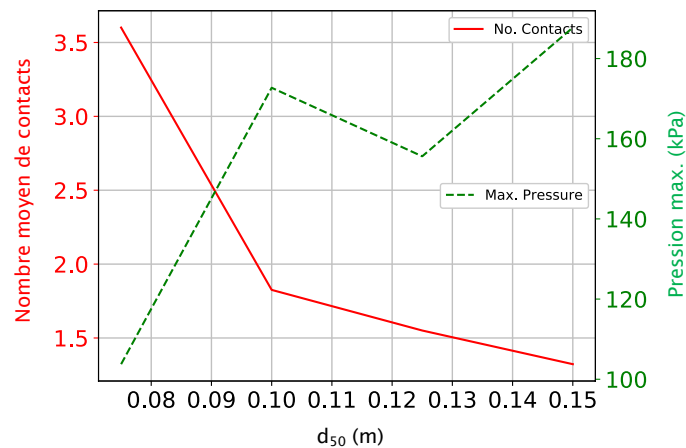


Figure 7.2. – Pression d'impact maximale et nombre moyen de contacts pour différentes simulations avec différentes valeurs de d_{50} , en utilisant $\phi_b=30^\circ$, $\sqrt{k_1/k_2}=0,3$ et $\alpha = 30^\circ$.

moyen des particules dans YADE qui a été utilisé pour créer l'ensemble granulaire dense dans la zone d'arrachement. Ces diamètres varient de 5 à 25 cm, selon le volume initial des événements historiques. La taille a été choisie de manière à ce que le nombre total de particules dans la simulation soit d'environ 100'000, afin de ne pas perdre en efficacité de temps de calcul. En outre, pour les simulations à forte adhésion (i.e. faible valeur de $\sqrt{k_1/k_2}$), on a constaté que les particules adhèrent les unes aux autres pour créer des masses de grande hauteur. De plus, le post-traitement des résultats de YADE en SIG à l'aide du raster d'approximation de voxels a également eu un effet sur la hauteur d'écoulement calculée. Les voxels étaient constitués de cubes de 20 cm d'arête. En conséquence, la hauteur d'écoulement a été estimée à 20 cm près.

Dans le modèle de SlideForce, il y a deux aspects liés à la réalité physique des coulées de boue qui méritent une amélioration : premièrement le calcul de vitesse actuel est fortement lié à la pente locale, où l'effet de la quantité de mouvement n'est pas pris en compte. Deuxièmement, SlideForce n'est pas adapté à la simulation des hauteurs d'entassement contre un bâtiment. Cela est dû au fait que la distribution des matériaux basée sur les gradients dans le MNT ne permet pas l'accumulation et la rétention de matériaux contre un mur. C'est pourquoi ce processus ne peut pas être simulé dans ce sens.

Il est difficile de savoir lequel des deux modèles (SlideForce ou YADE) est plus proche de la réalité, car des valeurs de référence sont rarement disponibles pour l'évaluation des valeurs simulées de la hauteur d'écoulement, de la vitesse et de la pression.

La pression calculée par YADE dans la simulation des événements historiques s'est avérée être affectée par le choix du diamètre moyen des particules, comme décrit dans la section 7.2.3. De plus, le mur rigide rencontré par les écoulements simulés dans YADE, qui nous a permis de calculer la pression, n'avait pas de critère de rupture (pas de déformation plastique). En conséquence, la pression calculée était uniquement due à l'interaction entre les particules en mouvement et le mur sans limite supérieure. Cela a conduit dans certains cas à des valeurs de pression très élevées en raison de la vitesse d'écoulement élevée et de la densité élevée de la masse d'écoulement. Pour cette raison, la formule de Scheidegger (1975) a été utilisée pour calculer la pression et la comparer à celles simulées par SlideForce. Cette formule prend en compte à la fois les composantes hydrodynamiques (liées à la vitesse d'écoulement) et hydrostatiques (liées à la hauteur d'écoulement) de la pression d'impact. Cependant, cela a augmenté la différence entre les pressions de YADE et SlideForce en raison des différences de hauteur d'écoulement et de vitesse entre les deux modèles.

Enfin, nous avons calculé la classe d'intensité (faible, moyenne ou forte) basée sur deux approches différentes. La première dépend soit de l'épaisseur de dépôt, soit de l'épaisseur de la ZA comme recommandé par OFEV (2016). La deuxième est basée sur la pression simulée en YADE et SlideForce (calculée selon la formule de Scheidegger (1975)), qui est ensuite comparée aux seuils de pression pour l'intensité proposée par AGN-DNG (2004)). Nous observons des différences d'appréciation de l'intensité par les deux approches. En effet, sur les 24 cas possédant des données d'épaisseur de dépôt et/ou d'épaisseur de ZA, 11 cas ont une valeur d'intensité surévaluée par la méthode AGN-DNG, 6 sont sous évalués, et 7 produisent des résultats égaux. Il est maintenant

nécessaire d'avoir des informations les plus précises possible sur la réaction de différents types de bâtiments aux effets de pression des coulées de boue afin d'obtenir une base pour redéfinir les critères d'intensité.

Afin d'améliorer la confiance dans les résultats de pression des modèles de propagation comme YADE et SlideForce pour la définition de critères d'intensité lié au risque de coulée de boue de versant, il serait maintenant très bénéfique d'avoir accès à des données de pression de haute confiance, tout en sachant que l'acquisition de ces données est très complexe.

8. Conclusions et perspectives

De ce projet nous avons pu tirer les conclusions suivantes :

- Pour la simulation des zones d'arrachements à l'échelle d'un versant en utilisant SOSlope, nous conseillons d'utiliser des rasters d'entrée de 2m et d'apporter une attention très particulière aux paramètres de cohésion, de la teneur initiale en eau, et du renforcement des racines. Les paramètres les plus sensibles de la simulation qui doivent donc être déterminés avec le plus d'exactitude possible sont : la cohésion effective du sol, l'épaisseur du sol, la teneur initiale en eau ainsi que la durée et l'intensité des précipitations.
- La distribution des arbres dans le modèle SOSlope est un facteur important pour la prédiction des zones d'arrachement.
- SlideforMap peut être utilisé pour tester différents scénarios de précipitation à une échelle régionale pour des situations avec et sans forêt. La précision apportée par des rasters de précision 5 à 10 m apporte le meilleur rapport précision/temps de calcul. Une attention particulière doit être apportée aux paramètres de profondeur du sol, de la cohésion, de l'angle de frottement interne et du renforcement des racines. Ainsi, SlideforMap peut être utilisé pour produire des cartes indicatives de mouvements de terrain spontanés superficiels.
- Les expériences de laboratoire ont montré que la teneur en eau du matériau granulaire a une forte influence sur la distance d'écoulement et qu'une faible augmentation de la teneur en eau conduit à de grandes variations de la distance d'écoulement. Au contraire, le contenu en particules fines s'est révélé inversement favorable à la distance de propagation, ainsi à teneur en eau égale, un terrain avec beaucoup de particules fines aura une probabilité de départ et une distance de propagation réduite.
- Une bonne corrélation a été observée entre le modèle YADE et les expérimentations sur le terrain en termes de vitesse frontale moyenne et de pression maximale, avec une corrélation moindre pour la hauteur d'écoulement. Des comparaisons détaillées de l'évolution de la pression entre les différentes expériences sélectionnées et les simulations YADE ont révélé la capacité du modèle à reproduire les courbes de pression observées, en particulier pendant la phase de chargement primaire conduisant à la pression maximale.
- Grâce aux expériences de laboratoires et les meilleures simulations des 28 événements historiques, nous avons pu proposer quatre types de coulée (TC) selon leur fluidité et leur adhérence.
- Les modèles YADE et SlideForce ont pu reproduire les enveloppes des 28 événements historiques de manière très encourageante. Malgré des écarts ponctuels de hauteurs et vitesse d'écoulement (i.e. pressions), les ordres de grandeurs des différences sont prometteurs.
- Nos résultats ont montré que, en général, la valeur de 50% de probabilité d'atteinte simulée correspond le mieux avec les enveloppes des événements historiques.

Au niveau des perspectives, nous voyons les points suivants :

- Nous allons optimiser les codes de SlideForMap et SlideForce (en C++) et mettre à disposition ces outils avec un manuel d'utilisateur/-trice par le biais de l'association internationale ecorisQ dans le courant de l'année 2020.
- Dans le futur, l'utilisateur de SlideForce aura la possibilité de choisir un des quatre TC décrit dans ce rapport sur la base duquel SlideForce choisira un set de paramètres. Le choix du TC se basera sur le coefficient de friction μ et le *mass-to-drag-ratio* ω (voir 5.2). Ici, le μ peut être déterminé en laboratoire ou estimé sur la base du type du sol. Le paramètre ω est déjà utilisée dans la pratique pour modéliser les coulées de boue.
- Nous recommandons d'exécuter au minimum 100 simulations par zone d'arrachement. Grâce aux distributions probabilistes de plusieurs paramètres utilisés, SlideForce produira une carte des probabilités d'atteinte dans la zone de propagation de chaque zone d'arrachement simulée. L'expérience de l'utilisation de SlideForce dans la pratique aidera à établir la gamme de valeurs à utiliser pour transformer la carte des probabilités d'atteinte simulée en carte de zone de propagation réaliste. Celle-ci fournira la base la plus importante à l'établissement d'une carte de danger en utilisant SlideForce.

- Nous allons accompagner le processus d'introduction de ce nouveau modèle de propagation dans la pratique par des cours organisés par ecorisQ. Le développement futur de SlideForce se basera fortement sur le retour des praticiens. Parallèlement, nous continuerons l'amélioration en analysant les résultats de rétro-calcul des nouveaux événements de coulée de boue.
- La méthode d'évaluation de la précision de prédiction des zones d'arrachements, basée sur l'AUC, doit être améliorée, afin de prendre en compte l'effet de l'absence des glissements potentiels (ou futurs). Actuellement, la précision de prédiction est fortement influencée par ces vrais-négatifs.
- Il est maintenant propice de commencer à développer des approches pour coupler des données de précipitations précises au niveau local avec la modélisation de l'arrachement (aussi bien à l'échelle locale et régionale).
- Les simulations de la propagation peuvent être améliorées en tenant compte de la présence éventuelle des forêts dans les modèles numériques (p. ex. la répartition, les espèces et les diamètres des arbres).
- La phase fluide peut être améliorée dans les simulations de YADE en utilisant un solveur de flux de dynamique des fluides numérique.
- Nous prévoyons de travailler avec des ingénieurs du bâtiment et des architectes afin d'étudier la réaction de différents types de bâtiments aux effets de pression des coulées de boue pour obtenir une base pour redéfinir les critères d'intensité.

Bibliographie

- AGN-DNG : Gefahreneinstufung Rutschungen i.w.S. : Permanente Rutschungen, spontane Rutschungen und Hangmuren. *Rapport Groupe de travail danger naturel et géologie AGN-DNG*, p. 17 p, 2004.
- AGN-DNG : Verbesserung der Hangmurenbeurteilung. Arbeitsbericht 1. Phase. *Rapport Groupe de travail danger naturel et géologie AGN-DNG*, p. 91 p, 2016.
- A. Albaba : *Discrete element modeling of the impact of granular debris flows on rigid and flexible structures*. Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, 2015.
- A. Albaba, N. Hollard, D. May, C. Schaller et L. Dorren : Analyse und Modellierung von Hangmuren-Ereignissen in der Schweiz und Liechtenstein - Schlussbericht. *Bericht HAFL-BFH, Zollikofen*, p. 38, 2020.
- A. Albaba, S. Lambert et T. Faug : Dry granular avalanche impact force on a rigid wall : Analytic shock solution versus discrete element simulations. *Physical Review E*, 97(5):052903, 2018. URL <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.97.052903>.
- A. Albaba, S. Lambert, F. Kneib, B. Chareyre et F. Nicot : DEM Modeling of a Flexible Barrier Impacted by a Dry Granular Flow. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50(11):3029–3048, 2017. URL <http://link.springer.com/10.1007/s00603-017-1286-z>.
- A. Albaba, S. Lambert, F. Nicot et B. Chareyre : Relation between microstructure and loading applied by a granular flow to a rigid wall using DEM modeling. *Granular Matter*, 17(5):603–616, 2015.
- A. Albaba, M. Schwarz, C. Wendeler, B. Loup et L. Dorren : Numerical modeling using an elastoplastic-adhesive discrete element code for simulating hillslope debris flows and calibration against field experiments. *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 19(11), 2019.
- E. Azéma et F. Radjaï : Force chains and contact network topology in sheared packings of elongated particles. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 85(3):31303, 2012. ISSN 15393755. URL <http://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.85.031303>.
- P. Bak, C. Tang et K. Wiesenfeld : Self-organized criticality. *Phys. Rev. A*, 38:364–374, 1988.
- K. Beven et M. Kirkby : A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1):43–69, 1979.
- BFF/EISLF : Richtlinien zur Berücksichtigung der Lawinengefahr bei raumwirksamen Tätigkeiten. *Bundesamt für Forstwesen BFF / Eidgenössische Institut für Schnee- und Lawinenforschung EISLF*, p. 21 p, 1984.
- R. Brighenti, A. Segalini et A. M. Ferrero : Debris flow hazard mitigation : A simplified analytical model for the design of flexible barriers. *Computers and Geotechnics*, 54:1–15, 2013.
- L. Bugnion, B. W. McArdell, P. Bartelt et C. Wendeler : Measurements of hillslope debris flow impact pressure on obstacles. *Landslides*, 9(2):179–187, 2012.
- E. Burroughs Jr : Landslide hazard rating for portions of the oregon coast range. *US Forest Service EM-Engineering Staff (USA)*, 1985.
- E. Catalano, B. Chareyre et E. Barthélémy : Pore-scale modeling of fluid-particles interaction and emerging poromechanical effects. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 38(1):51–71, 2014.
- B. Chanut, T. Faug et M. Naaim : Time-varying force from dense granular avalanches on a wall. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 82(4):41302, 2010. URL <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.82.041302>.

- L. Claessens, G. Heuvelink, J. Schoorl et A. Veldkamp : Dem resolution effects on shallow landslide hazard and soil redistribution modelling. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30(4):461–477, 2005.
- D. Cohen, P. Lehmann et D. Or : Fiber bundle model for multiscale modeling of hydromechanical triggering of shallow landslides. *Water resources research*, 45(10), 2009.
- D. Cohen et M. Schwarz : Tree-root control of shallow landslides. *Earth Surface Dynamics*, 5(3):451, 2017.
- P. A. Cundall et O. D. L. Strack : A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique*, 29(1):47–65, 1979.
- W.-T. Ding et W.-J. Xu : Study on the multiphase fluid-solid interaction in granular materials based on an LBM-DEM coupled method. *Powder Technology*, 335:301–314, 2018. ISSN 0032-5910. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032591018303590>.
- L. Dorren et P. Arnold : Key results of the swiss wide natural hazard risk assessment on national roads. *Proceedings of 13th INTERPRAEVENT Congress*, p. 487–493, 2016.
- L. Dorren et M. Schwarz : Quantifying the stabilizing effect of forests on shallow landslide-prone slopes. *In Ecosystem-Based Disaster Risk Reduction and Adaptation in Practice*, p. 255–270. Springer, 2016.
- ESRI : Description de la fonction courbure au sein de l'environnement de travail arcgis, esri. ESRI - Environmental Systems Research Institute. <https://desktop.arcgis.com/fr/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/curvature-function.htm>, 2016.
- T. Faug : Depth-averaged analytic solutions for free-surface granular flows impacting rigid walls down inclines. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 92(6):62310, 2015. URL <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.92.062310>.
- T. Fawcett : An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*, 27(8):861 – 874, 2006. ISSN 0167-8655. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016786550500303X>. ROC Analysis in Pattern Recognition.
- M. Frehner, B. Wasser et R. Schwitler : Gestion durable des forêts de protection. soins sylvicoles et contrôle des résultats : instructions pratiques. (l'environnement pratique). *Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne*, p. 564, 2005.
- D. Griffiths et P. Lane : Slope stability analysis by finite elements. *Geotechnique*, 49(3):387–403, 1999.
- M. Hausteijn, A. Gladky et R. Schwarze : Discrete element modeling of deformable particles in yade. *SoftwareX*, 6:118–123, 2017.
- P. Holmgren : Multiple flow direction algorithms for runoff modelling in grid based elevation models : an empirical evaluation. *Hydrological processes*, 8(4):327–334, 1994.
- P. Horton, M. Jaboyedoff, a. Rudaz, B et et M. Zimmermann : Flow-R, a model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale. *Natural hazards and earth system sciences*, 13(4):869–885, 2013.
- H. J. Hovland : Three-dimensional slope stability analysis method. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 105(ASCE 14549 Proceeding), 1979.
- A. K. Howard : The revised ASTM standard on the description and identification of soils (visual-manual procedure). *Geotechnical Testing Journal*, 10(4):229–234, 1987.
- O. Hungr, S. Leroueil et L. Picarelli : The varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2):167–194, 2014.
- M. Hürlimann, D. Rickenmann et C. Graf : Field and monitoring data of debris-flow events in the swiss alps. *Canadian geotechnical journal*, 40(1):161–175, 2003.
- M. Hürlimann, B. W. McArdell et C. Rickli : Field and laboratory analysis of the runout characteristics of hillslope debris flows in switzerland. *Geomorphology*, 232:20–32, 2015.
- R. M. Iverson : The physics of debris flows. *Reviews of geophysics*, 35(3):245–296, 1997.
- R. M. Iverson, M. E. Reid et R. G. LaHusen : Debris-flow mobilization from landslides. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 25(1):85–138, 1997.

- H. Jensen, H. Lang et J. Rinderknecht : Extreme Punktregen unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden 1901–1970. *Hydrologischer Atlas der Schweiz* - <https://hydrologischeratlas.ch/>, 1997.
- Y. J. Jiang et I. Towhata : Experimental study of dry granular flow and impact behavior against a rigid retaining wall. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46(4):713–729, 2013. ISSN 07232632. URL <http://link.springer.com/10.1007/s00603-012-0293-3><http://link.springer.com/article/10.1007/s00603-012-0293-3>.
- P. Kattel, J. Kafle, J.-T. Fischer, M. Mergili, B. M. Tuladhar et S. P. Pudasaini : Interaction of two-phase debris flow with obstacles. *Engineering Geology*, 2018.
- A. Leonardi, F. K. Wittel, M. Mendoza, R. Vetter et H. J. Herrmann : Particle-Fluid-Structure Interaction for Debris Flow Impact on Flexible Barriers. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 31(5):323–333, 2016. URL <http://doi.wiley.com/10.1111/mice.12165>.
- S. Liener, H. Kienholz, M. Liniger et B. Krummenacher : Slidisp-a procedure to locate landslide prone areas. *In Proc. of the 7th International Symposium on Landslides. Trondheim, Norway*, p. 279–284, 1996.
- B. Loup, T. Egli, M. Stucki, P. Bartelt, B. Mc Ardell et R. Baumann : Impact pressures of hillslope debris flows. *In Proceedings of 12th INTERPRAEVENT Congress*, p. 225–236, 2012.
- S. Luding : Cohesive, frictional powders : contact models for tension. *Granular matter*, 10(4):235, 2008.
- B. Malamud, D. Turcotte, F. Guzzetti et P. Reichenbach : Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(6):687–711, 2004.
- R. Maurin, J. Chauchat et P. Frey : Dense granular flow rheology in turbulent bedload transport. *Journal of Fluid Mechanics*, 804:490–512, 2016.
- M. D. McKay, R. J. Beckman et W. J. Conover : Comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. *Technometrics*, 21(2):239–245, 1979.
- T. Mede, G. Chambon, P. Hagemuller et F. Nicot : A medial axis based method for irregular grain shape representation in dem simulations. *Granular Matter*, 20(1):16, 2018.
- C. E. Metz : Basic principles of ROC analysis. *Seminars in nuclear medicine*, 8(4):283–298, 1978.
- D. G. Milledge, D. Bellugi, J. A. McKean, A. L. Densmore et W. E. Dietrich : A multidimensional stability model for predicting shallow landslide size and shape across landscapes. *Journal of Geophysical Research : Earth Surface*, 119(11):2481–2504, 2014.
- D. R. Montgomery et W. E. Dietrich : A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water resources research*, 30(4):1153–1171, 1994.
- C. Moos, P. Bebi, F. Graf, J. Mattli, C. Rickli et M. Schwarz : How does forest structure affect root reinforcement and susceptibility to shallow landslides? *Earth Surface Processes and Landforms*, 41:951–960, 2016.
- MétéoSuisse : Le climat suisse en détail. Office fédéral de météorologie et de climatologie MétéoSuisse. <https://www.meteosuisse.admin.ch/home/climat/le-climat-suisse-en-detail.html>, 2019.
- OFAT/OFEF/OFEFP : Prise en compte des dangers dus aux mouvements de terrain dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire. *Office fédéral de l'aménagement du territoire OFAT, Office fédéral de l'économie des eaux OFEE, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage OFEFP, Berne. Dangers naturels - Recommandations*, p. 42 p, 1997.
- OFEV : Protection contre les dangers dus aux mouvements de terrain. aide à l'exécution concernant la gestion des dangers dus aux glissements de terrain, aux chutes de pierres et aux coulées de boue. *Office fédéral de l'environnement, Berne. L'environnement pratique n° 1608*, p. 98 p, 2016.
- OFEV : Bois flottant dans les cours d'eau. un projet de recherche à vocation pratique. *Office fédéral de l'environnement, Berne. Connaissance de l'environnement n° 1910*, p. 100 p, 2019.
- E. Papachristos, L. Scholtès, F. Donzé et B. Chareyre : Intensity and volumetric characterizations of hydraulically driven fractures by hydro-mechanical simulations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 93:163–178, 2017.

- R. Perla, T. Cheng et D. M. McClung : A two-parameter model of snow-avalanche motion. *Journal of Glaciology*, 26(94):197–207, 1980.
- O. A. Pfiffner : *Geologie der Alpen*, vol. utb 8416. Haupt Verlag, 3e Auflage, 2015.
- N. Pollen et A. Simon : Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on stream bank stability using a fiber bundle model. *Water Resources Research*, 41(7), 2005.
- S. Reneau et W. Dietrich : Size and location of colluvial landslides in a steep forested landscape. *IAHS-AISH publication*, (165):39–48, 1987.
- C. Rickli et H. Bucher : Oberflächennahe Rutschungen, ausgelöst durch die Unwetter vom 15.–16.7. 2002 im Napfgebiet und vom 31.8–1.9. 2002 im Gebiet Appenzell. *Eidg. Forschungsanstalt (WSL) und Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG)*, 75p, 2003.
- C. Rickli, S. Kamm et H. Bucher : Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teilprojekt Flachgründige Rutschungen. *Projektbericht zuhanden des Bundesamtes für Umwelt, BAFU Rep*, p. 112, 2008.
- C. Rickli et F. Graf : Effects of forests on shallow landslides – case studies in Switzerland. *Forest Snow and Landscape Research*, 44:33–44, 2009.
- C. Rickli, P. Zimmerli et A. Boll : Effects of vegetation on shallow landslides : an analysis of the events of august 1997 in sachseln, switzerland. *In International Conference on landslides-Causes, impacts and countermeasures*, p. 575–584, 2001.
- E. Scheidegger, Adrian : *Physical aspects of natural catastrophes*. Elsevier, Amsterdam, 1975.
- B. Scherer : MFLOW – Ein Modell zur Simulation von Hangmuren. *Travail de BSc.*, p. 82, 2016.
- T. Schwager et T. Poeschel : Coefficient of restitution and linear dashpot model revisited. *Granular Matter*, 9(6):465–469, 2007. URL <http://arxiv.org/abs/cond-mat/0701278>.
- M. Schwarz, D. Cohen et D. Or : Root-soil mechanical interactions during pullout and failure of root bundles. *Journal of Geophysical Research : Earth Surface*, 115(F4), 2010.
- M. Schwarz, L. Dorren et K. Kühne : Wirkung des Waldes gegen flachgründige Rutschungen und Risikoreduktion auf Bahnanlagen und Bahnbetrieb der SBB AG. Anwendung des Konzepts PROTECT Bio anhand von drei Fallbeispielen in den Kantonen TI und LU. *Bern Wankdorf / Ittigen, im Auftrag von SBB AG und BAFU*, p. 51 p., 2019.
- M. Schwarz, F. Giadrossich et D. Cohen : Modeling root reinforcement using a root-failure weibull survival function. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(11):4367–4377, 2013.
- M. Schwarz et J. Thormann : Neue Ansätze zur Quantifizierung der Schutzwaldwirkung. *Geosciences*, 2:26–29, 2012.
- M. Schwarz, J. Mattli, L. Dorren, G. Hunziker, B. Loup, K. Hagen, B. Mazzorana, C. Rickli, P. Bebi, S. Wohlwend *et al.* : Best practice methods for shallow landslides hazard assessment—a review of the alpine region. *Wildbach-und Lawinverbau*, 78(174):222–231, 2014.
- SF (Sezione Forestale) : SIT (Sistema Informatico del Territorio). StorMe : catasto eventi naturali. *Repubblica e Cantone Ticino*, 2019.
- W. Shen, T. Zhao, J. Zhao, F. Dai et G. G. Zhou : Quantifying the impact of dry debris flow against a rigid barrier by dem analyses. *Engineering Geology*, 241:86–96, 2018.
- R. Sidle et H. Ochiai : *Landslides : processes, prediction, and land use*. Water resources monograph series, vol. 18. American Geophysical Union, Washington, 2006.
- L. E. Silbert, D. Ertas, G. S. Grest, T. C. Halsey, D. Levine et S. J. Plimpton : Granular flow down an inclined plane : Bagnold scaling and rheology. *Physical Review E*, 64(5):051302, 2001.
- A. W. Skempton et F. DeLory : Stability of natural slopes in london clay. *In Selected Papers on Soil Mechanics*, p. 70–73. Thomas Telford Publishing, 1984.
- V. Šmilauer, E. Catalano, B. Chareyre, S. Dorofeenko, J. Duriez, A. Gladky, J. Kozicki, C. Modenese, L. Scholtes, L. Sibille *et al.* : Yade documentation. *The Yade Project*, 2010.

- V. Šmilauer, E. Catalano, B. Chareyre, S. Dorofeenko, J. Duriez, A. Gladky, J. Kozicki, C. Modenese, L. Scholtes, L. Sibille *et al.* : Yade documentation 2nd ed. the yade project, 2015, 2015.
- R. Sorensen, U. Zinko et J. Seibert : On the calculation of the topographic wetness index : evaluation of different methods based on field observations. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions European Geosciences Union*, 10(1):101–112, 2006.
- S. Springman, P. Kienzler, F. Casini et A. Askarinejad : Landslide triggering experiment in a steep forested slope in switzerland. In *17th International conference on soil mechanics and geotechnical engineering, ICSMGE 2009*, vol. 2, p. 1698–1701. IOS Press, 2009.
- T. D. Stark et H. T. Eid : Performance of three-dimensional slope stability methods in practice. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering*, 124(11):1049–1060, 1998.
- Swisstopo : Swisstopo : Voyage dans le temps. <https://map.geo.admin.ch/?lang=fr&topic=echbg&layer=ch.swisstopo.pixelkarte-farbelayers=ch.swisstopo.swissimage-productlayers;timestamp=current>, 2013.
- H. Teufelsbauer, Y. Wang, S. P. Pudasaini, R. I. Borja et W. Wu : DEM simulation of impact force exerted by granular flow on rigid structures. *Acta Geotechnica*, 6(3):119–133, 2011.
- H. Teufelsbauer, Y. Wang, M. C. Chiou et W. Wu : Flow-obstacle interaction in rapid granular avalanches : DEM simulation and comparison with experiment. *Granular Matter*, 11(4):209–220, 2009.
- D. Tobler, R. Riner et R. Pfeifer : Modeling potential shallow landslides over large areas with slidisp+. In *Landslide Science and Practice*, p. 37–45. Springer, 2013.
- M. T. Van Genuchten : A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1. *Soil science society of America journal*, 44(5):892–898, 1980.
- A. Volkwein : Numerical simulation of flexible rockfall protection systems. *Proc. Computing in civil engineering*, p. 1–11, 2005.
- P. Vollmöller : A shock-capturing wave-propagation method for dry and saturated granular flows. *Journal of Computational Physics*, 199(1):150–174, 2004. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021999104000804>.
- WSL/BAFU/AGN : Dokumentation von Hangmuren und spontanen Rutschungen : Anleitung und Kommentar zum Aufnahmeformular, 2018.
- F. Wu, Y. Fan, L. Liang et C. Wang : Numerical Simulation of Dry Granular Flow Impacting a Rigid Wall Using the Discrete Element Method. *PLOS ONE*, 11(8):e0160756, 2016. URL <http://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0160756>.
- T. H. Wu, W. P. McKinnell III et D. N. Swanston : Strength of tree roots and landslides on prince of wales island, alaska. *Canadian Geotechnical Journal*, 16(1):19–33, 1979.
- F. Zimmermann, B. W. McArdell, C. Rickli et C. Scheidl : 2D runout modelling of hillslope debris flows, based on well-documented events in switzerland. *Geosciences*, 10(2):70, 2020.

Glossaire

Coulée de boue de versant - l'écoulement d'une masse visqueuse formée non chenalisé d'un mélange de matériau meuble et d'eau (en allemand: *Hangmure*; en anglais: *hillslope debris flow*).

DEM - (*Discrete Element Method*) méthode numérique qui permet de de modéliser efficacement l'interaction interparticulaire.

Enveloppe - le périmètre délimitant la zone de propagation (en allemand: *Umhüllende*).

Facteur de sécurité (SF) - également connu sous le nom (et utilisé de manière interchangeable avec) coefficient de sécurité (*Factor of Safety (FOS)* ou *Safety Factor (SF)* en anglais), exprime le rapport entre les forces déstabilisatrices et les forces de maintien..

Glissement superficiel - glissement de terrain avec une profondeur de la surface de glissement jusqu'à 2 mètres.

Modèle numérique de terrain (MNT) - représentation de la topographie d'une zone terrestre sous une forme adaptée à son utilisation par un ordinateur numérique.

SIG - Système d'Information Géographique conçu pour recueillir, stocker, traiter, analyser, gérer et présenter tous les types de données spatiales et géographique.

SlideForce - modèle 2D probabiliste de propagation des coulées de boue de versant basé sur la redistribution d'une masse rasterisée.

SlideforMAP - modèle 2D probabiliste de prédiction des zones d'arrachement des glissements superficiels à une échelle régionale.

SOSlope - modèle hydro-mécanique qui calcule les zones d'arrachement des glissements superficiels sur une pente discrétisée en un réseau bi-dimensionnel de blocs reliés par des forces de liaison, pour simuler les interactions entre les systèmes racines et sol.

Type de coulée (TC) - classification du type de coulée (TC 1 à 4) utilisées pour le modèle SlideForce selon le matériau en mouvement.

YADE (Yet Another Dynamic Engine) - une plate-forme open source pour les modèles numériques avec un forte composante dédiée à la méthode des éléments discrets (DEM) et aux couplages grains-fluides.

Zone de propagation (ZP) - zone parcourue par un mouvement de terrain gravitaire, constitué de la zone d'arrachement, de la zone de transit et de la zone de dépôt, aussi nommée zone d'arrêt.

Zone d'arrachement (ZA) - zone de provenance, aussi nommée zone de rupture, d'un glissement de terrain.

A. Annexe - Fiche technique pour la modélisation de l'arrachement

La procédure de modélisation de l'arrachement des glissements superficiels à l'échelle d'un versant se base principalement sur la procédure de détermination de la probabilité d'occurrence d'une coulée de boue décrite dans OFEV (2016). L'avantage de l'utilisation d'un modèle de simulation d'arrachement (comme par exemple le modèle SOSlope) est l'automatisation des étapes 3 - 5 proposée dans l'aide à l'exécution OFEV (2016). Pour une modélisation pertinente, nous conseillons d'exécuter les étapes décrites ci-dessous. Pour chaque étape, nous décrivons si celle-ci est impérative ou recommandée, dans l'utilisation d'un modèle en général ou spécifiquement pour SOSlope.

1. Délimitation d'une zone géologiquement uniforme. Cette étape est **impérative pour toute modélisation**.
2. Analyser le registre des événements historiques (StorMe, base de donnée Hangmuren de l'OFEV/WSL, données cantonales) ainsi que les données de base (données hydrologiques / HADES, Modèle Numérique de Terrain - MNT). Cette étape est **impérative pour toute modélisation**.
3. Identification des bassins versants qui peuvent potentiellement influencer les conditions hydrologiques du versant (i.e., les bassins versants pertinents). Cette étape est **impératif pour toute modélisation**.
4. Calcul du "TWI" (topographic wetness index) ou la zone de captage spécifique de la pente ascendante (*contributing area* dans la nouvelle version 1.5 de SOSlope) de tous les bassins versants pertinents. Autrement dit, la *contributing area* est la surface délimitée par le bassin versant spécifique pour chaque cellule. Cette étape est **généralement recommandée pour la modélisation et impérative pour SOSlope**.

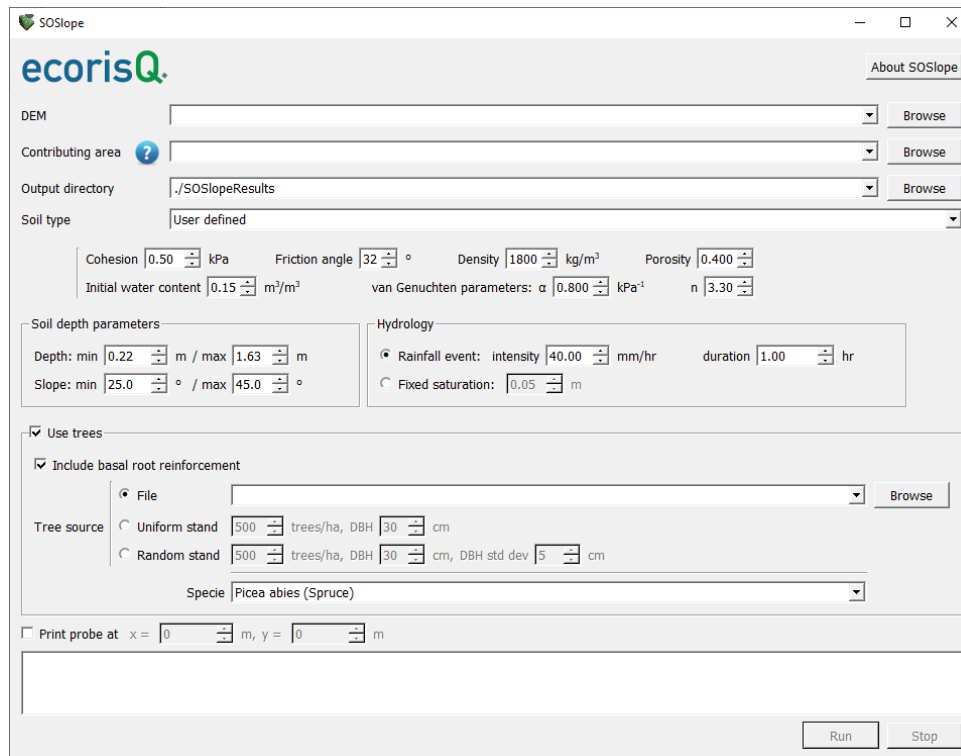


Figure A.1. – L’interface graphique de SOSlope. Le manuel disponible sur www.ecorisq.org explique les fonctions disponibles ainsi que les formats des fichiers d’entrée

5. Modélisation préliminaire des zones d’arrachement afin de déterminer les zones pertinentes (zone de rupture préférentielles des glissements de terrain) qui seront ensuite échantillonnées. Pour cela, il faut découper le MNT et le raster du *contributing area* autour du versant ou de la zone d’étude. Ensuite, il faut définir le type de sol supposant le mieux représenter la zone en question, en utilisant des valeurs par défaut pour les 9 différents type de sol USCS prédéfinis dans SOSlope ou des valeurs définies par l’utilisateur. Cette étape est **généralement recommandée pour la modélisation et impérative pour SOSlope**.
6. La première visite de terrain permettra la collecte d’échantillons de sol et la détermination du type de sol USCS (Unified Soil Classification System) ; soit en utilisant la méthode visuelle-manuelle de Howard (1987), soit en utilisant des analyses de granulométrie en laboratoire. Cette étape est **généralement recommandée pour la modélisation et impérative pour SOSlope**.
7. Sur le terrain, il faudra (si présente) également acquérir les données forestières (p.e. à l’aide d’un drone). Afin d’obtenir ces données, on peut soit utiliser des méthodes pour détecter des arbres individuels sur la base d’un modèle numérique de la hauteur de la végétation (p.e., FINT), soit en utilisant un inventaire sur le terrain afin de définir des peuplements forestiers réguliers ou irréguliers directement dans SOSlope. Cette étape est **recommandée pour toute modélisation**.
8. Modélisation de la situation actuelle (si présente, avec forêt) pour la calibration de la cohésion effective du sol. SOSlope calcule le renforcement des racines des arbres sous tension et pression. Le modèle prend en compte cet effet de la forêt en fonction des paramètres suivants :
 - les espèces d’arbres
 - la répartition des diamètres à hauteur de poitrine (DHP)
 - le nombre d’arbres par ha et, si disponible, leur répartition sur la zone (positions)
 Afin de déterminer une valeur plausible, un événement de précipitation d’une heure avec l’intensité estimée sur un an ainsi qu’une pré-humidité sèche ou humide ("teneur en eau initiale" = 15 à 35%, décrivant la teneur en eau du sol avant la précipitation) est conseillée. Ensuite, la cohésion effective du sol doit être ajustée dans le modèle afin qu’aucun glissement de terrain ne se produise. La valeur de la cohésion ainsi déterminée peut-être utilisée pour les autres simulations. L’expérience de l’application de SOSlope a montré que cette méthode est la meilleure pour produire des résultats plausibles. Cette étape est **recommandée pour toute modélisation**.

9. Modélisation de scénarios d'arrachement selon les annualités / périodes de récurrence des précipitations définies sur la base des statistiques de précipitations (valeurs de HADES - Atlas hydrologique de la Suisse). Chacun des scénarios de précipitations sélectionnés est représentatif d'une certaine période de retour. Par exemple, l'événement de 10 ans est représentatif pour une période de retour comprise entre 10 et 30 ans. Dans la plupart des cas, la durée des précipitations est supposée être d'une heure. Sur la base des événements qui ont eu lieu et de l'expérience des experts locaux, on suppose que de nombreux glissements de terrain sont causés par des précipitations relativement courtes et intensives avec une forte pré-humidité de la matrice du sol. Cette étape est **(impérative pour toute modélisation)**.
10. Deuxième enquête de terrain pour la vérification et la plausibilisation des scénarios d'arrachement simulés. Cette étape est **recommandée pour toute modélisation**. Spécifiquement, il faudra vérifier, si dans les zones d'arrachement simulées :
- la pente du terrain correspond aux valeurs utilisées pour la simulation
 - la forêt simulée correspond à la réalité
 - l'épaisseur du sol sur le terrain correspond à la valeur simulée
 - des anciennes zones d'arrachement de glissement superficiel sont représentées par la modélisation (ici, l'analyse détaillée d'un ombrage du terrain du MNT en parallèle peut être très utile)
- Si le modèle produit plus de zones d'arrachement que celles observées sur le terrain, le scénario peut être considéré comme plausible. Dans le cas où les anciennes zones d'arrachement ne sont pas représentées par la modélisation, il faudra tester d'autres combinaisons de durée/intensité des précipitations, réajuster la cohésion effective du sol ou prendre en compte une forte variation locale de l'épaisseur du sol. Néanmoins, il se peut que le modèle n'arrive pas à reproduire la réalité, souvent lié aux inconnues du sous-sol. Dans ce cas, nous proposons, d'utiliser les procédures décrites dans ; OFEV2016protectionAGN-DNG (2004).
11. Digitalisation des zones d'arrachement basée sur les déplacements simulés. Les zones d'arrachement par scénario sont finalement déterminées sur la base du déplacement résultant (> 1,5 m de déplacement parallèle à la pente). Ces zones devraient avoir un facteur de sécurité (SF), calculé comme le quotient entre les forces stabilisatrices et déstabilisatrices, plus petit que 1,2. Cette étape est **recommandée pour toute modélisation**.

B. Annexe - Analyses de sol

Les résultats de l'analyse granulométrique ainsi que les limites d'Atterberg sont présentés pour six sites qui ont été étudiés dans le cadre de ce projet (figures B.1 à B.12), en plus d'un échantillon de sol très cohésif prélevé à Gantrisch dans le canton de Berne (figures B.13 et B.14).



Kornverteilungsdiagramm

Objekt:

Trockensiebung Nasssiebung Schlämmanalyse

Prüfaufzeichnungs-Nr. 8871-J-PA-4

Wareneingangsnummer: 3573

Probennummer _____

Bezeichnung der Probe: Hangmure

Durchgang bei 2.000 mm [%]

Durchgang bei 0.063 mm [%]

Durchgang bei 0.002 mm [%]

SM	siltiger Sand	
Symbol	Gruppenname	
88.2	D ₆₀ [mm]	0.325
24.7	D ₅₀ [mm]	0.228
1.9	D ₃₀ [mm]	0.097
	D ₁₀ [mm]	0.015
	W _L [%]	28.2
	W _p [%]	24.3
	I _p [%]	3.9
	W _{L, nat} [%]	
	C _{ud}	
	C _{uc}	

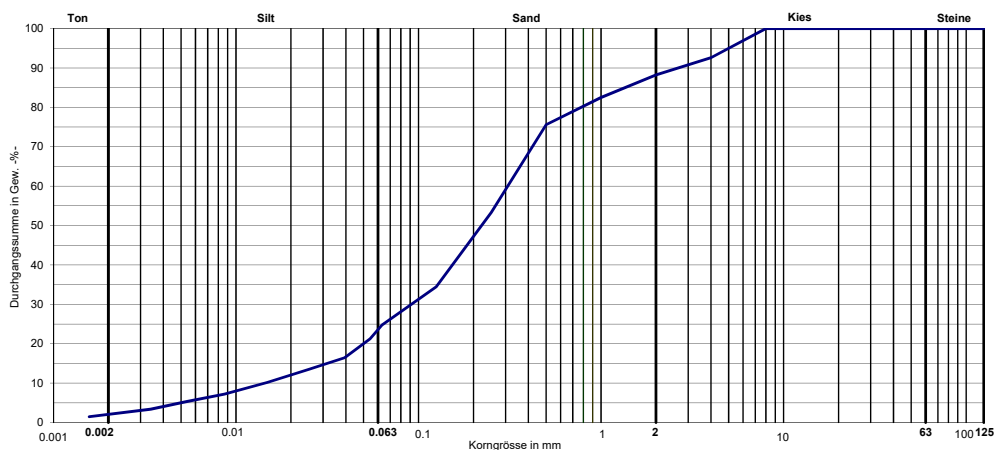


Figure B.1. – Analyse granulométrique d'un échantillon prélevé dans la zone d'arrachement du cas n°2 à Loos (Trub, BE).

Bodenklassifikation: Konsistenzgrenzen (Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenzen nach Atterberg)

SN 670 345b (Juli 2008)

Prüfaufzeichnungs-Nr.	8871-J-PA-4	Auswertung der Prüfung:	
Wareneingangsnummer:	3573	Fließgrenze w_L	$w_L = 28.2 \%$
Probennummer:		Ausrollgrenze w_P	$w_P = 24.3 \%$
Bezeichnung der Probe	ML	Plastizitätsindex I_p	$I_p = 3.9$

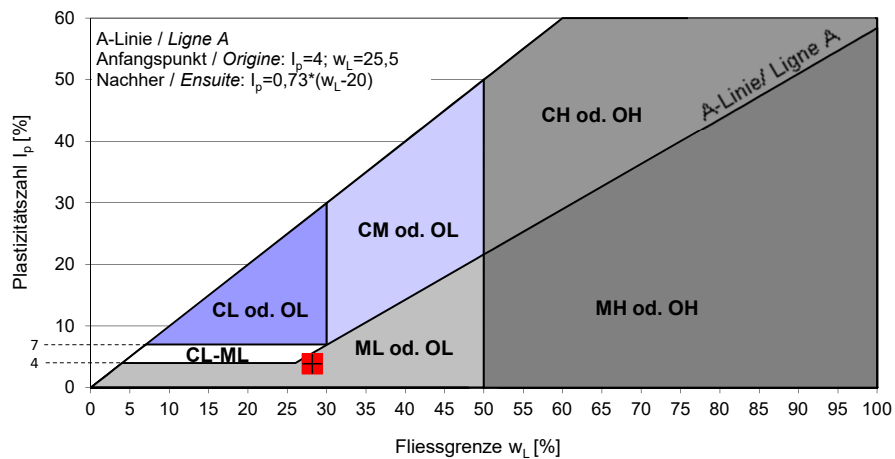
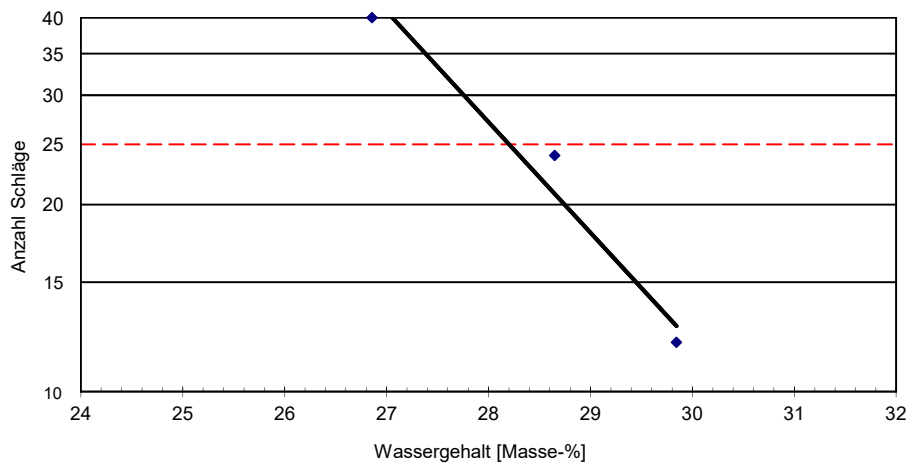


Figure B.2. – Résultats des limites d'Atterberg d'un échantillon prélevé dans la zone d'arrachement du cas n°2 à Loos (Trub, BE).

Kornverteilungsdiagramm

Objekt: Hangmure

Trockensiebung Nasssiebung Schlämmanalyse

Prüfaufzeichnungs-Nr.	8871-01-PA-42	Durchgang bei 2.000 mm [%]	99.8	D ₅₀ [mm]	0.112	w _L [%]	24.8
Wareneingangsnummer:	3583	Durchgang bei 0.063 mm [%]	27.7	D ₂₀ [mm]	0.097	w _p [%]	21.7
Probennummer	2	Durchgang bei 0.002 mm [%]	2.4	D ₃₀ [mm]	0.066	I _p [%]	3.1
Bezeichnung der Probe:	Root	C _{col}		D ₁₀ [mm]	0.026	w _{Lnat} [%]	
		C _{ud}					

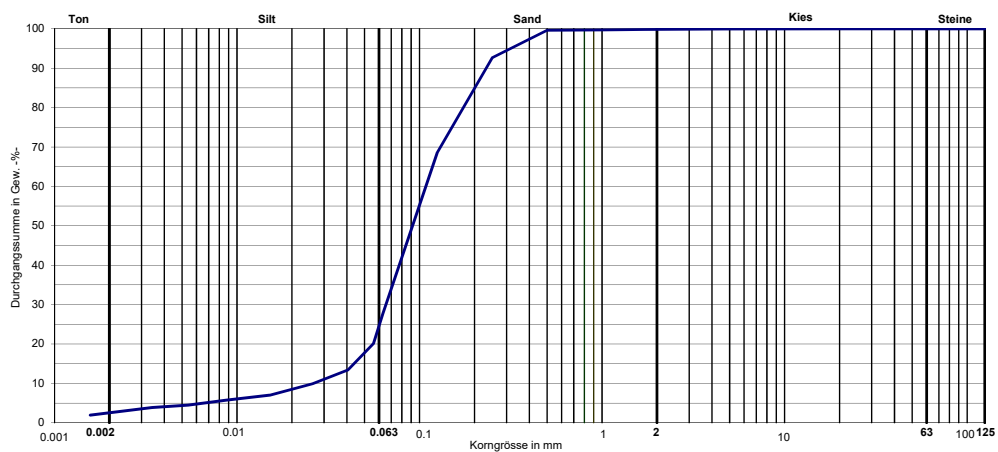


Figure B.3. – Analyse granulométrique d'un échantillon prélevé dans la zone d'arrachement du cas n°8 à Weesweide (Root, LU).

Bodenklassifikation: Konsistenzgrenzen (Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenzen nach Atterberg)

SN 670 345b (Juli 2008)

Hangmure Root

Prüfaufzeichnungs-Nr.	8871-01-PA-42	Auswertung der Prüfung:	
Wareneingangsnummer:	3583	Fließgrenze w_L	$w_L = 24.8 \%$
Probennummer:	2	Ausrollgrenze w_P	$w_P = 21.7 \%$
Bezeichnung der Probe	ML	Plastizitätsindex I_p	$I_p = 3.1$

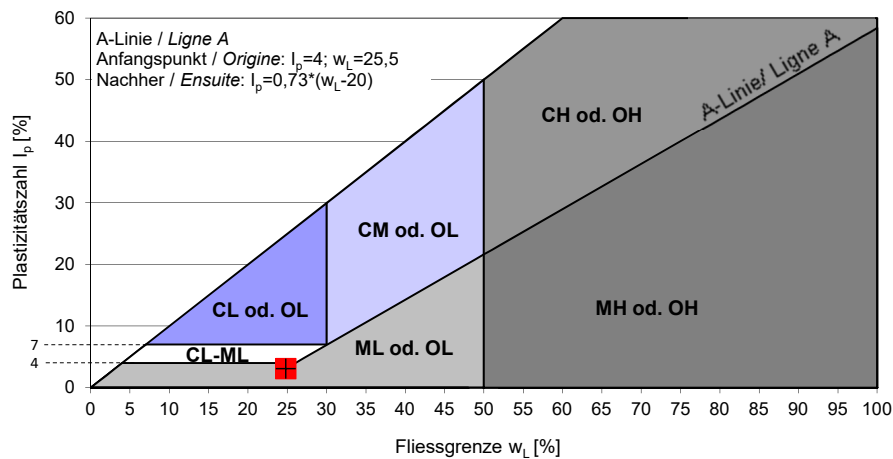
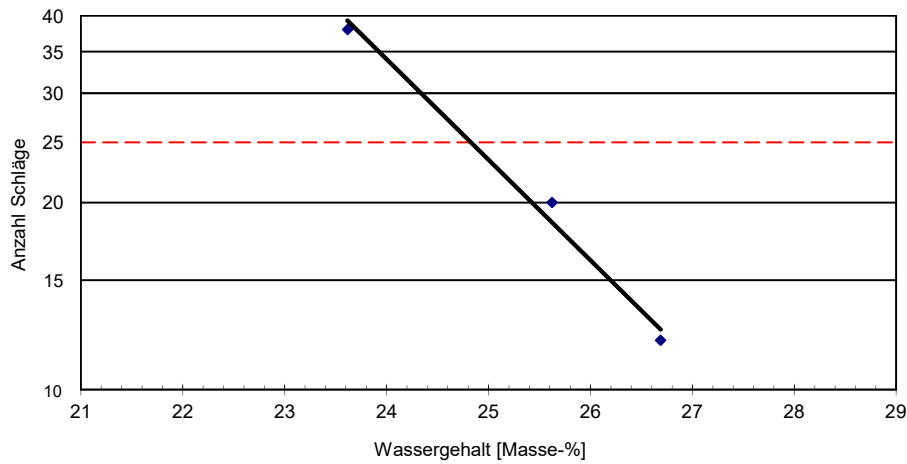


Figure B.4. – Résultats des limites d'Atterberg d'un échantillon prélevé dans la zone d'arrachement du cas n°8 à Weesweide (Root, LU).

Kornverteilungsdiagramm

Objekt:	Hangmure		
Trockensiebung <input type="checkbox"/>	Nasssiebung <input checked="" type="checkbox"/>	Schlammanalyse <input type="checkbox"/>	
Prüfaufzeichnungs-Nr.	8871-01-PA-44	Durchgang bei 2.000 mm [%]	64.0
Wareneingangsnummer:	3594	Durchgang bei 0.063 mm [%]	9.8
Probennummer	4	Durchgang bei 0.002 mm [%]	1.6
Bezeichnung der Probe:	Curio Rutschmasse	C_{ud}	1.4
		C_{u0}	27.6

SW-SM		gut abgestufter Sand mit Silt und Kies	
Symbol	Gruppenname		
D_{60} [mm]	1.778	w_L [%]	36.3
D_{50} [mm]	1.219	w_p [%]	33.5
D_{30} [mm]	0.398	I_p [%]	2.8
D_{10} [mm]	0.064	w_{Lnat} [%]	34.6

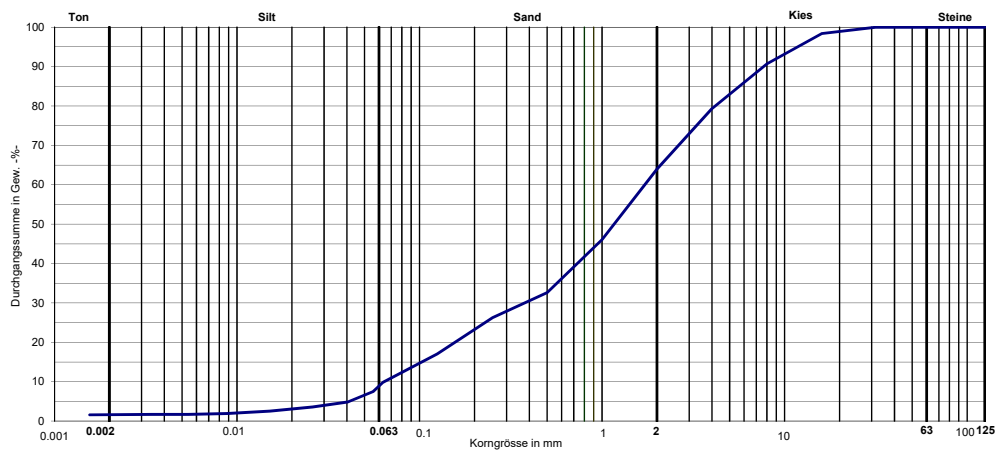


Figure B.5. – Analyse granulométrique d'un échantillon prélevé dans la zone d'arrachement du cas n°10 à Bombinasco (Curio, TI).

Bodenklassifikation: Konsistenzgrenzen (Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenzen nach Atterberg)

SN 670 345b (Juli 2008)

Curio Rutschmasse

Prüfaufzeichnungs-Nr.	8871-01-PA-44	Auswertung der Prüfung:	
Wareneingangsnummer:	3594	Fließgrenze w_L	$w_L = 36.3 \%$
Probenummer:	4	Ausrollgrenze w_P	$w_P = 33.5 \%$
Bezeichnung der Probe	ML	Plastizitätsindex I_p	$I_p = 2.8$

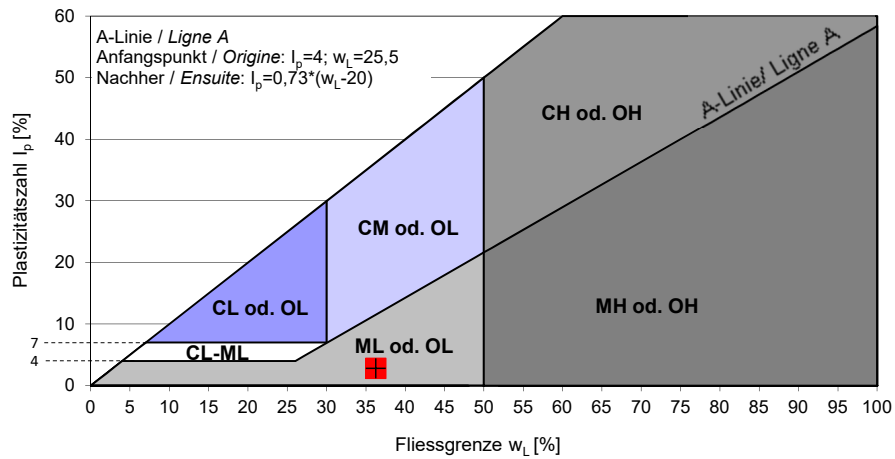
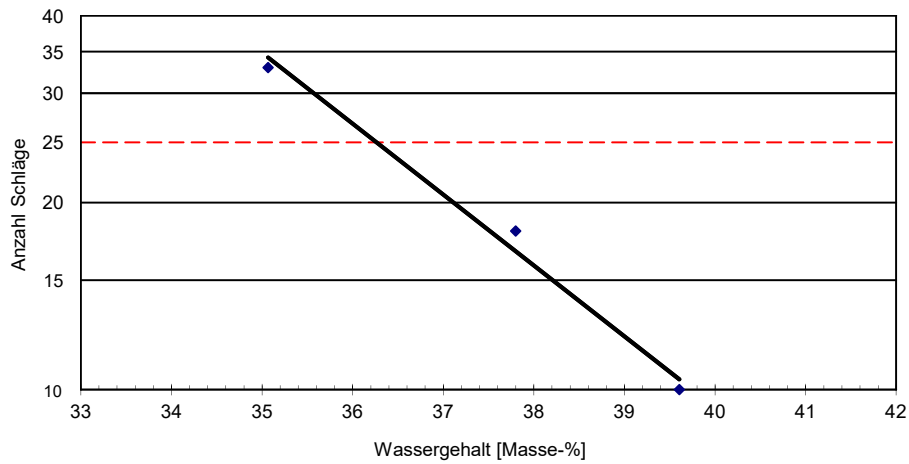


Figure B.6. – Résultats des limites d'Atterberg d'un échantillon prélevé dans la zone d'arrachement du cas n°8 à Weesweide (Curio, TI).

Kornverteilungsdiagramm

Objekt:	Hangmure		
Trockensiebung <input type="checkbox"/>	Nasssiebung <input checked="" type="checkbox"/>	Schlämmanalyse <input type="checkbox"/>	
Prüfaufzeichnungs-Nr.	8871-01-PA-47	Durchgang bei 2.000 mm [%]	72.4
Wareneingangsnummer:	3615	Durchgang bei 0.063 mm [%]	40.1
Probennummer	7	Durchgang bei 0.002 mm [%]	7.2
Bezeichnung der Probe:	Mosnang Wald	C_{ud}	
		C_{ul}	

SM		Siltiger Sand mit Kies	
Symbol	Gruppenname		
D_{60} [mm]	0.263	w_L [%]	46.9
D_{50} [mm]	0.122	w_p [%]	29.6
D_{30} [mm]	0.045	I_p [%]	17.4
D_{10} [mm]	0.003	w_{Lnat} [%]	

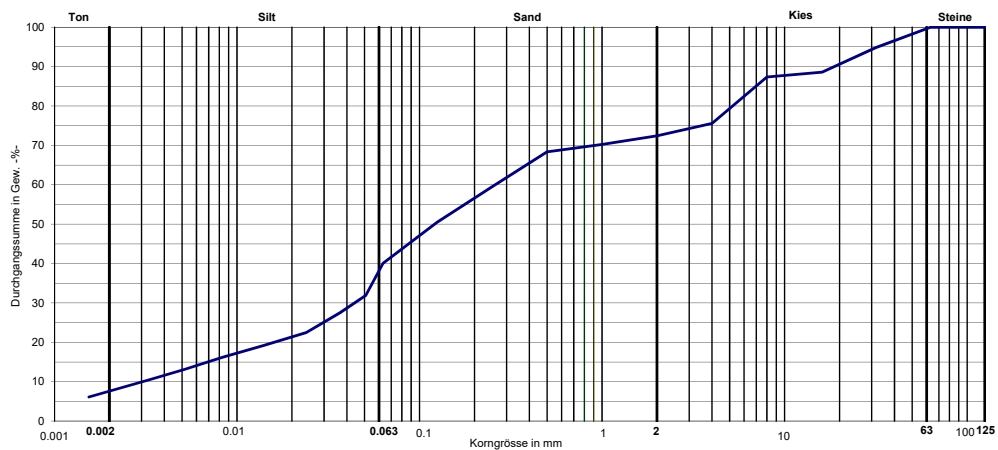


Figure B.7. – Analyse granulométrique d'un échantillon prélevé dans la zone d'arrachement du cas n°12 à Altoggenburg (Mosnang, SG).

Bodenklassifikation: Konsistenzgrenzen (Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenzen nach Atterberg)

SN 670 345b (Juli 2008) Projekt: Hangmure

Prüfaufzeichnungs-Nr.	8871-01-PA-47	Auswertung der Prüfung:	
Wareneingangsnummer:	3615	Fließgrenze w_L	$w_L = 46.9 \%$
Probennummer:	7	Ausrollgrenze w_P	$w_P = 29.6 \%$
Bezeichnung der Probe	ML	Plastizitätsindex I_p	$I_p = 17.4$

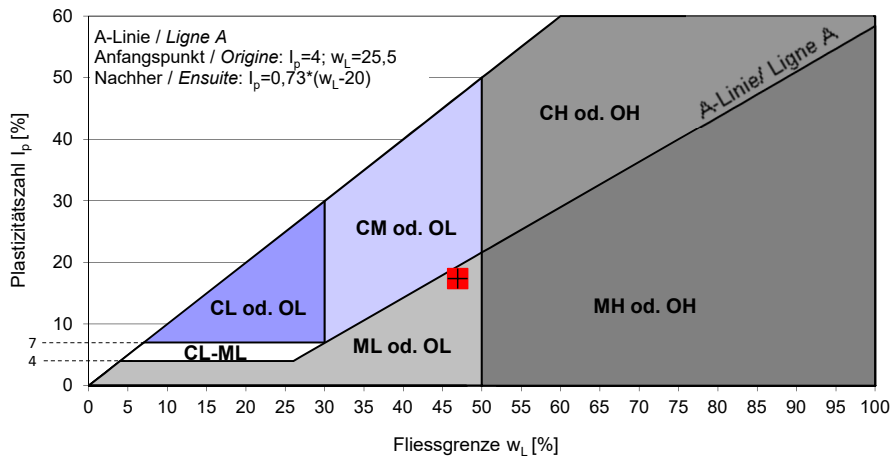
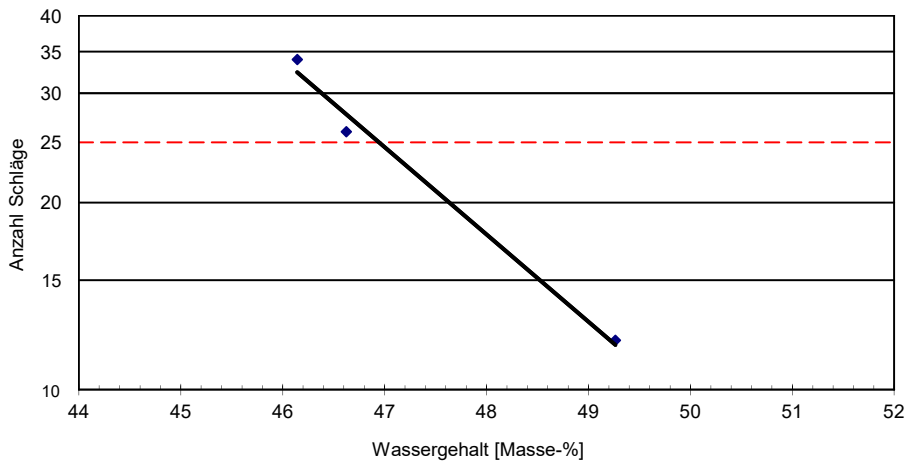


Figure B.8. – Résultats des limites d'Atterberg d'un échantillon prélevé dans la zone d'arrachement du cas n°12 à Alltogenburg (Mosnang, SG).

Kornverteilungsdiagramm

Objekt:	Hangmure		
Trockensiebung <input type="checkbox"/>	Nasssiebung <input checked="" type="checkbox"/>	Schlammanalyse <input type="checkbox"/>	
Prüfaufzeichnungs-Nr.	8871-01-PA-46	Durchgang bei 2.000 mm [%]	79.4
Wareingangsnummer:	3615	Durchgang bei 0.063 mm [%]	42.2
Probennummer	6	Durchgang bei 0.002 mm [%]	2.6
Bezeichnung der Probe:	Mosnang Feld	C_{ud}	
		C_{ul}	

SM		Siltiger Sand mit Kies	
Symbol	Gruppenname		
D_{60} [mm]	0.158	w_L [%]	44.7
D_{50} [mm]	0.095	w_p [%]	33.7
D_{30} [mm]	0.053	I_p [%]	11.0
D_{10} [mm]	0.010	w_{Lnat} [%]	

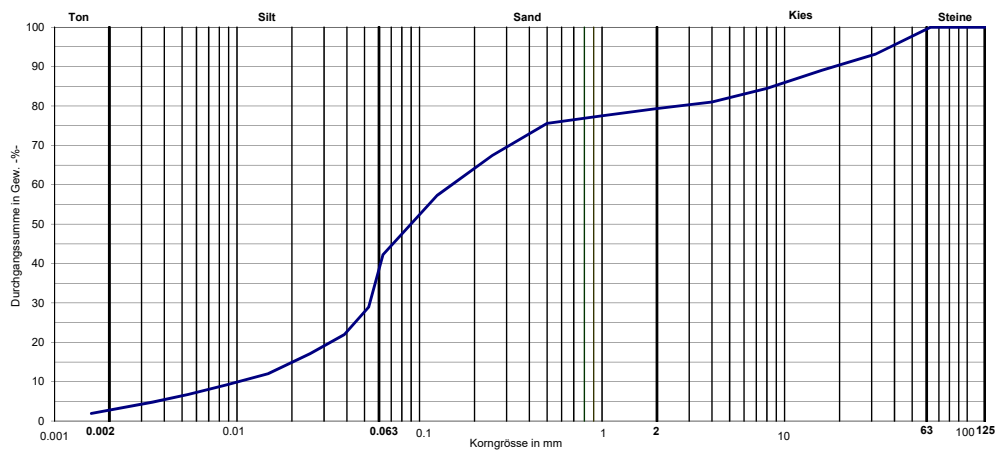


Figure B.9. – Analyse granulométrique d'un échantillon prélevé dans la zone d'arrachement du cas n°13 à Altoggenburg (Mosnang, SG).

Bodenklassifikation: Konsistenzgrenzen (Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenzen nach Atterberg)

SN 670 345b (Juli 2008) Projekt: Hangure

Prüfaufzeichnungs-Nr.	8871-01-PA-46	Auswertung der Prüfung:	
Wareneingangsnummer:	3615	Fließgrenze w_L	$w_L = 44.7 \%$
Probennummer:	6	Ausrollgrenze w_P	$w_P = 33.7 \%$
Bezeichnung der Probe	ML	Plastizitätsindex I_p	$I_p = 11.0$

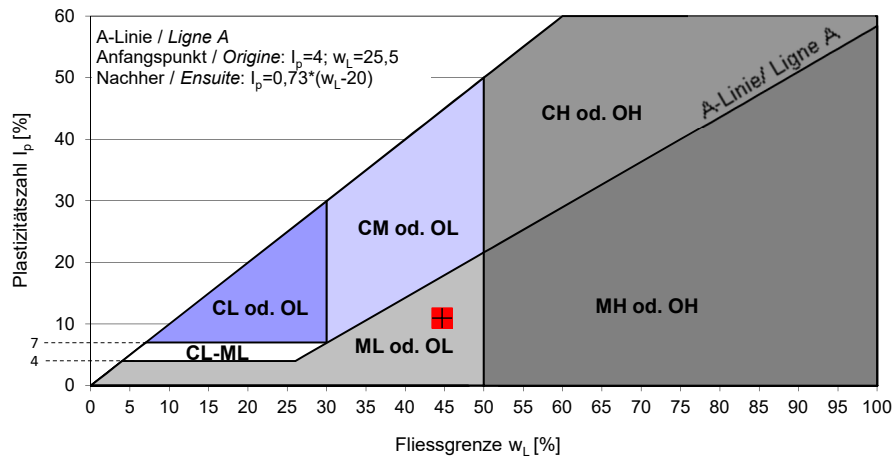
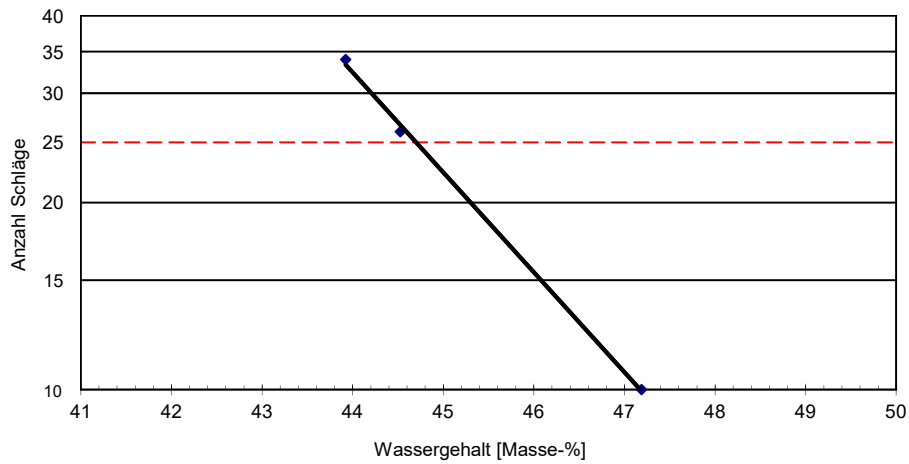


Figure B.10. – Résultats des limites d'Atterberg d'un échantillon prélevé dans la zone d'arrachement du cas n°13 à Alltrogenburg (Mosnang, SG).

Kornverteilungsdiagramm

Objekt:	Hangmure		
Trockensiebung <input type="checkbox"/>	Nasssiebung <input checked="" type="checkbox"/>	Schlammanalyse <input type="checkbox"/>	
Prüfaufzeichnungs-Nr.	8871-01-PA-49	Durchgang bei 2.000 mm [%]	87.0
Wareneingangsnummer:	3633	Durchgang bei 0.063 mm [%]	43.1
Probennummer	9	Durchgang bei 0.002 mm [%]	8.9
Bezeichnung der Probe:	Triesenberg	C_{cu}	3.8
		C_{ud}	133.3

SM		siltiger Sand	
Symbol	Gruppenname		
D_{60} [mm]	0.326	w_L [%]	45.4
D_{50} [mm]	0.118	w_p [%]	27.1
D_{30} [mm]	0.055	I_p [%]	18.3
D_{10} [mm]	0.002	w_{Lnat} [%]	

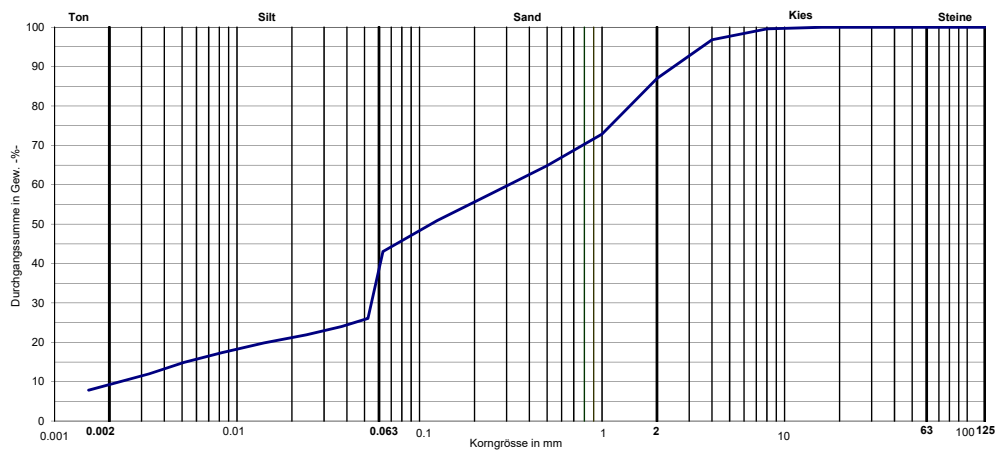


Figure B.11. – Analyse granulométrique d'un échantillon prélevé dans la zone d'arrachement du cas n°17 à Winchel (Triesenberg, LI).

Bodenklassifikation: Konsistenzgrenzen (Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenzen nach Atterberg)

SN 670 345b (Juli 2008)

Objekt:
 Hangmure Triesenberg

Prüfaufzeichnungs-Nr.	8871-01-PA-49	Auswertung der Prüfung:	
Wareneingangsnummer:	3633	Fließgrenze w_L	$w_L = 45.4 \%$
Probenummer:	9	Ausrollgrenze w_P	$w_P = 27.1 \%$
Bezeichnung der Probe	ML	Plastizitätsindex I_p	$I_p = 18.3$

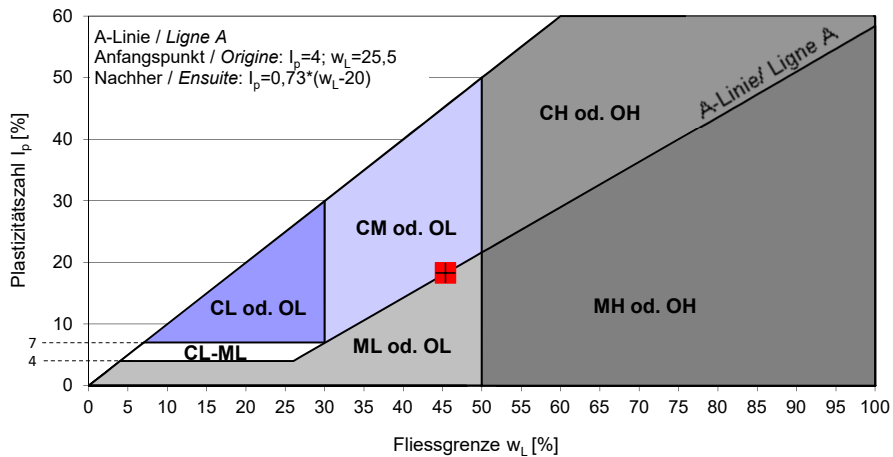
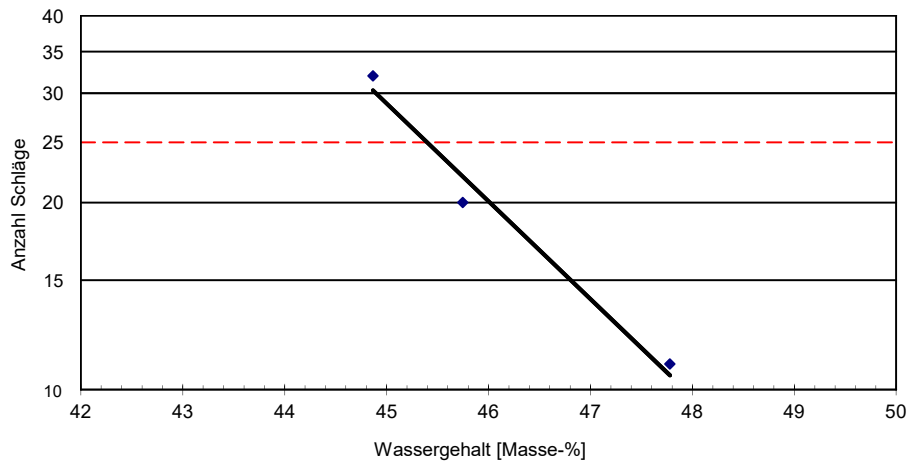


Figure B.12. – Résultats des limites d'Atterberg d'un échantillon prélevé dans la zone d'arrachement du cas n°17 à Winchel (LI).

Kornverteilungsdiagramm

Objekt:	Slide force		
Trockensiebung <input type="checkbox"/>	Nasssiebung <input checked="" type="checkbox"/>	Schlämmanalyse <input type="checkbox"/>	
Prüfaufzeichnungs-Nr.	8231-52-PA-41	Durchgang bei 2.000 mm [%]	99.4
Wareneingangsnummer:	3721	Durchgang bei 0.063 mm [%]	76.6
Probennummer	1	Durchgang bei 0.002 mm [%]	21.8
Bezeichnung der Probe:	Gantrisch Hangmurenmaterial	C_{ud}	

CM	sandiger magerer Ton		
Symbol	Gruppenname		
D_{60} [mm]	0.033	w_L [%]	42.9
D_{50} [mm]	0.020	w_p [%]	22.2
D_{30} [mm]	0.004	I_p [%]	20.7
D_{10} [mm]	0.001	w_{Lnat} [%]	

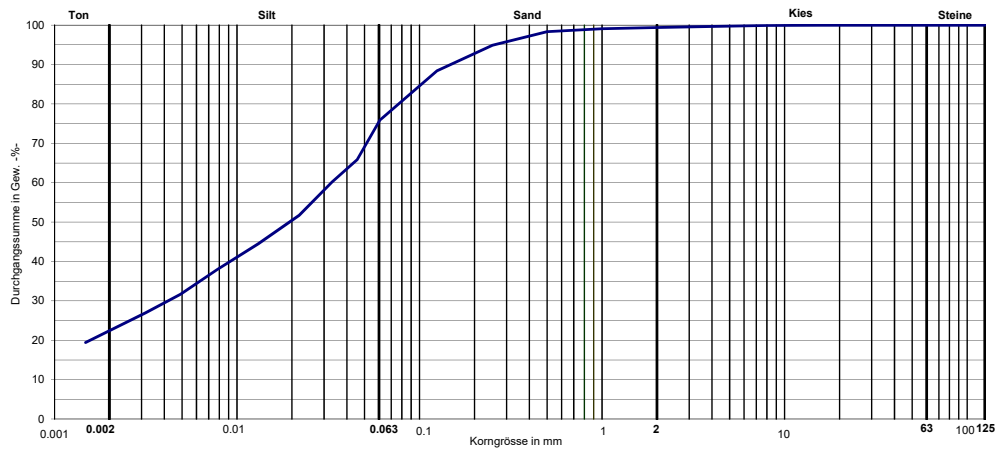


Figure B.13. – Distribution de la taille des grains d'un échantillon prélevé à Gantrisch (BE).

Bodenklassifikation: Konsistenzgrenzen (Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenzen nach Atterberg)

SN 670 345b (Juli 2008) Objekt: Slide force project

Prüfaufzeichnungen-Nr.	8231-52-PA-41	Auswertung der Prüfung:	
Wareneingangsnummer:	3721	Fließgrenze w_L	$w_L = 42.9 \%$
Probennummer:	1 Gantrisch	Ausrollgrenze w_P	$w_P = 22.2 \%$
Bezeichnung der Probe	CM	Plastizitätsindex I_p	$I_p = 20.7$

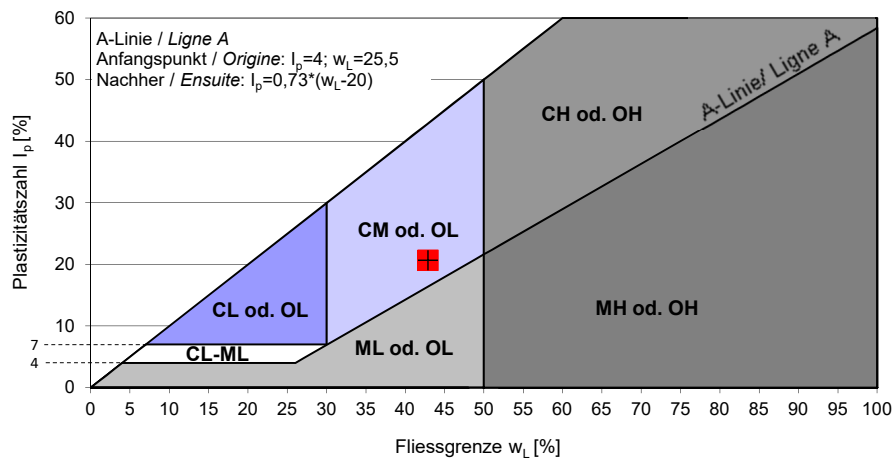
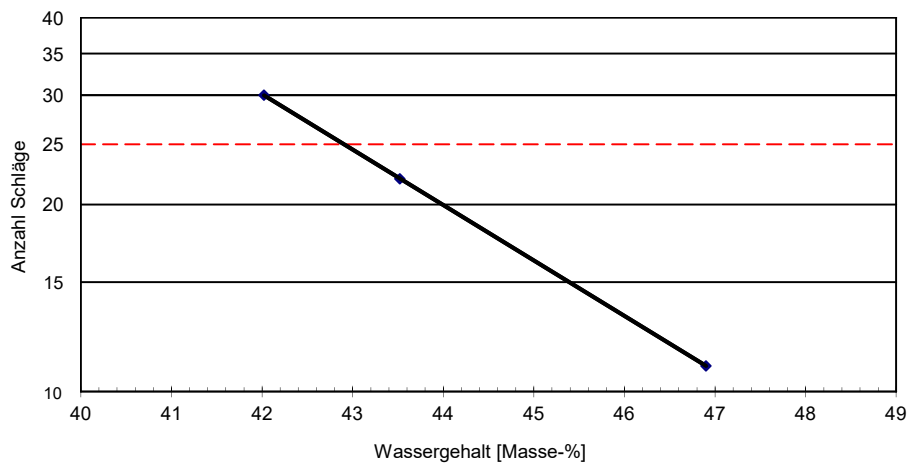


Figure B.14. – Résultats des limites d'Atterberg d'un échantillon prélevé à Gantrisch (BE).

C. Annexe - Cartes des événements historiques et simulations

Les polygones des résultats de modélisations YADE et SlideForce (défini par le seuil de 50% de probabilité d'atteinte : 100 à 50% = zone de propagation retenue) ainsi que les événements historiques (réels) de chacun des cas étudiés dans le cadre du projet sont représentés dans cette annexe.

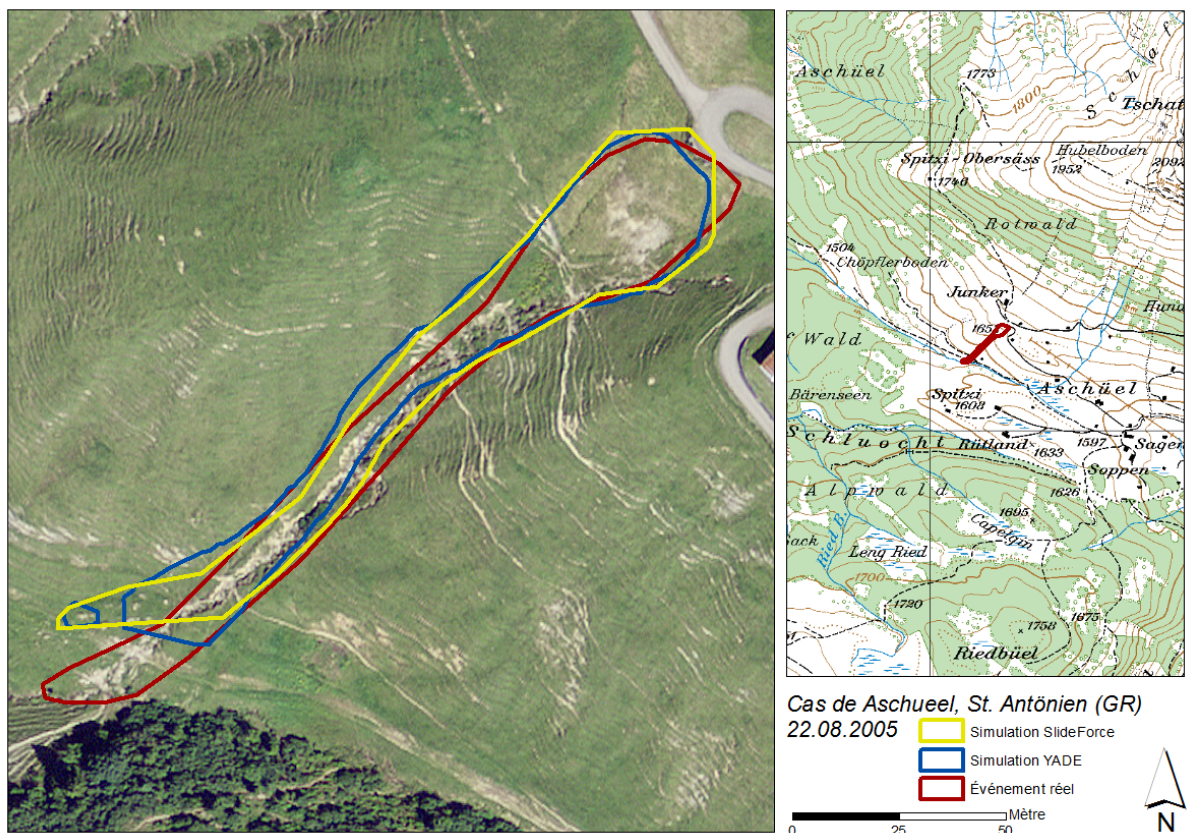


Figure C.1. – Résultats de simulation des modèles YADE et SlideForce ainsi que le périmètre correspondant de l'événement historique (réel) pour le cas d'Aschuel à St. Antonien (GR).

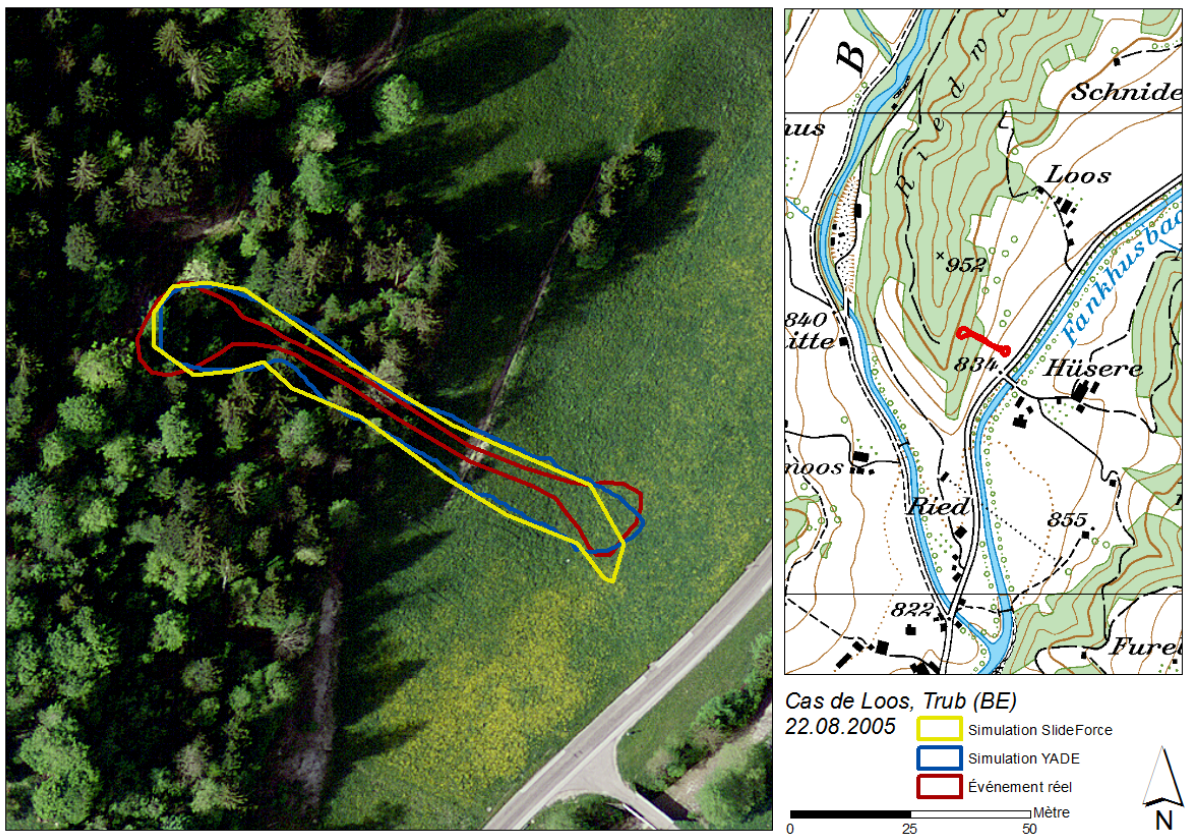


Figure C.2. – Résultats de simulation des modèles YADE et SlideForce ainsi que le périmètre correspondant de l'événement historique (réel) pour le cas de Loos à Trub (BE).

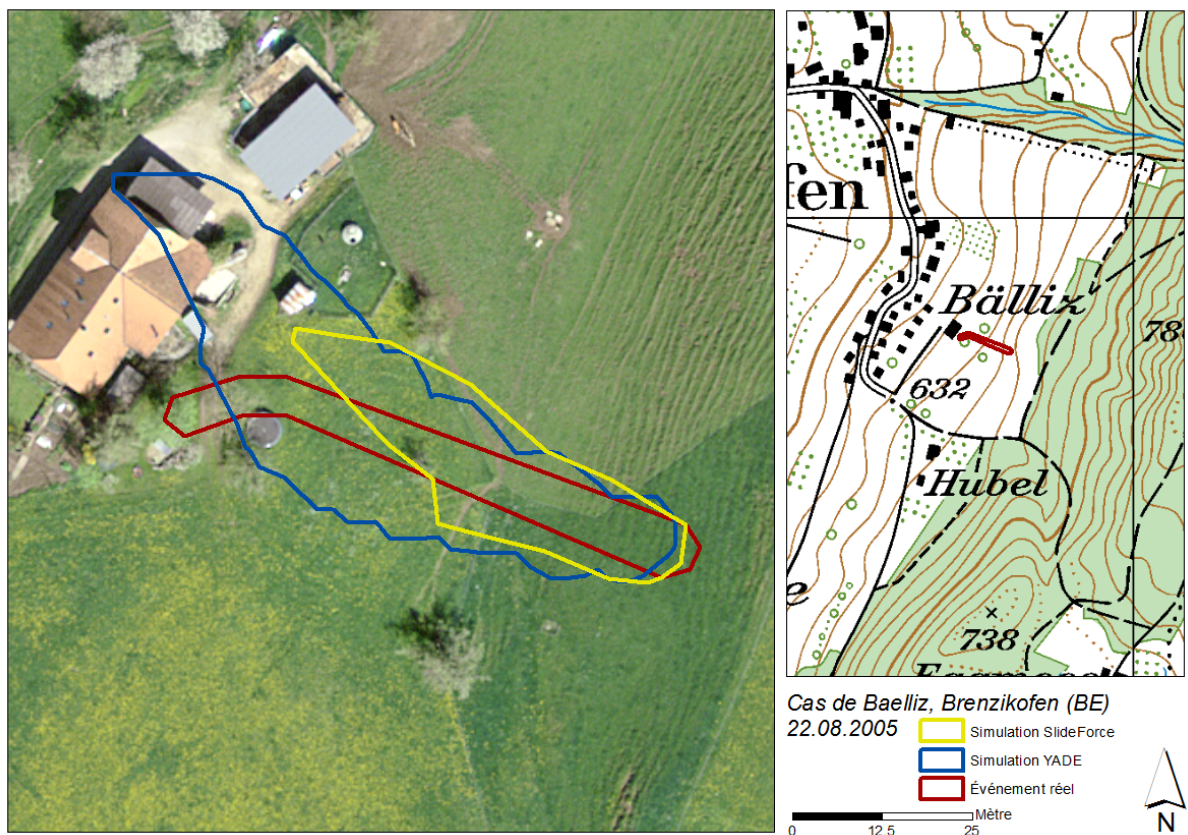


Figure C.3. – Résultats de simulation des modèles YADE et SlideForce ainsi que le périmètre correspondant de l'événement historique (réel) pour le cas de Baelliz in Brenzikofen (BE).

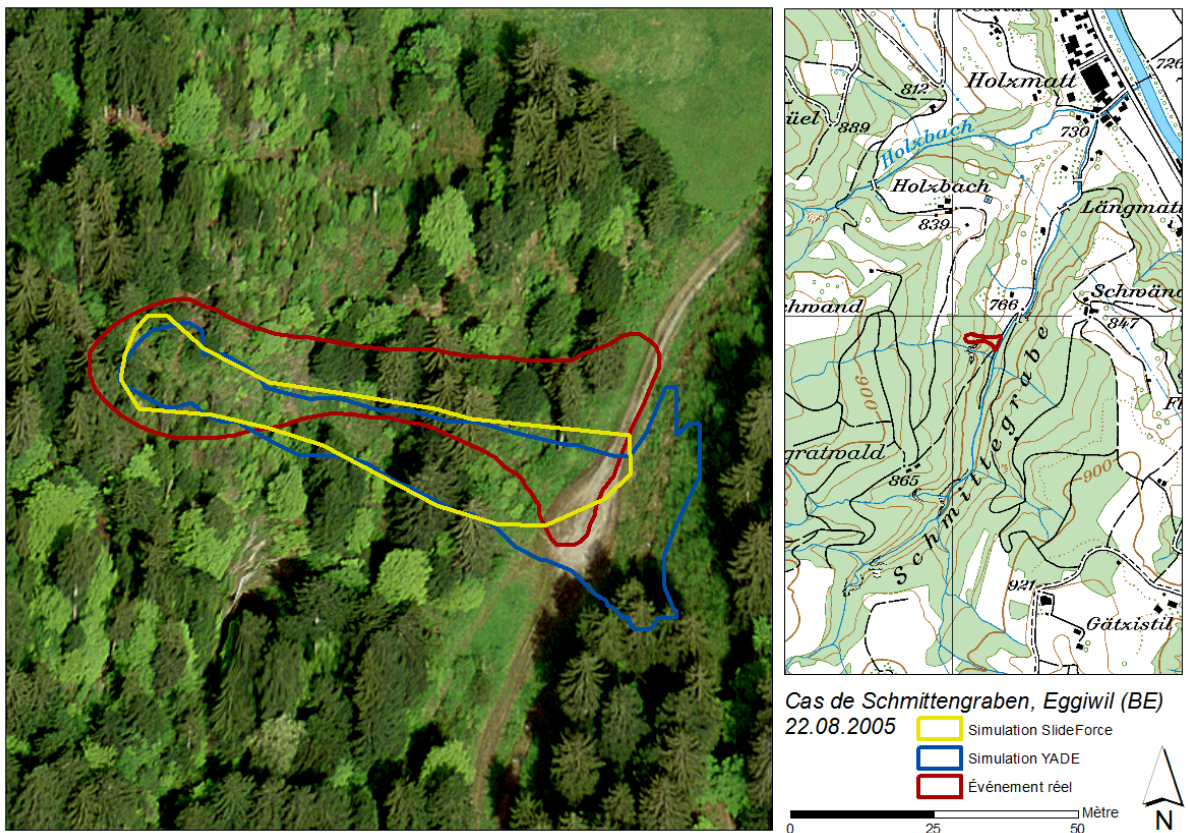


Figure C.4. – Résultats de simulation des modèles YADE et SlideForce ainsi que le périmètre correspondant de l'événement historique (réel) pour le cas de Schmittengraben in Eggwil (BE).

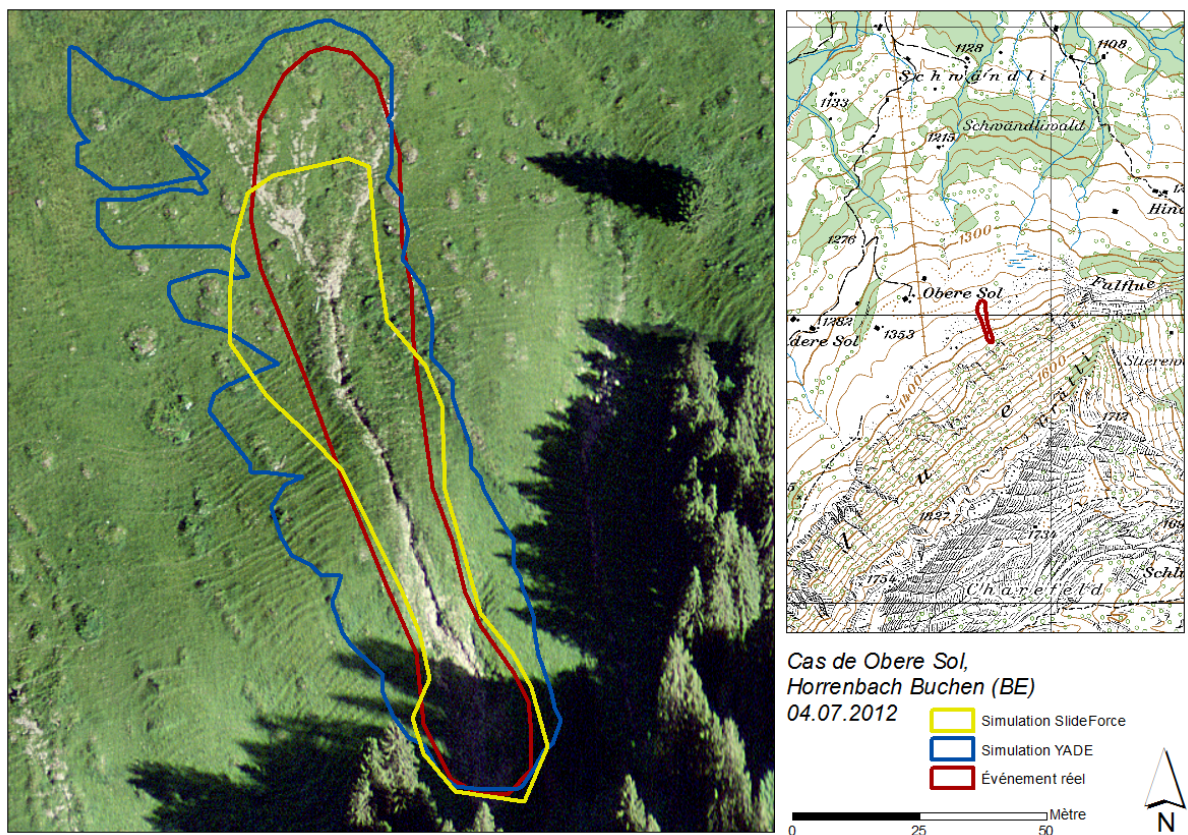


Figure C.5. – Résultats de simulation des modèles YADE et SlideForce ainsi que le périmètre correspondant de l'événement historique (réel) pour le cas d'Obere Sol à Horrenbach Buchen (BE).

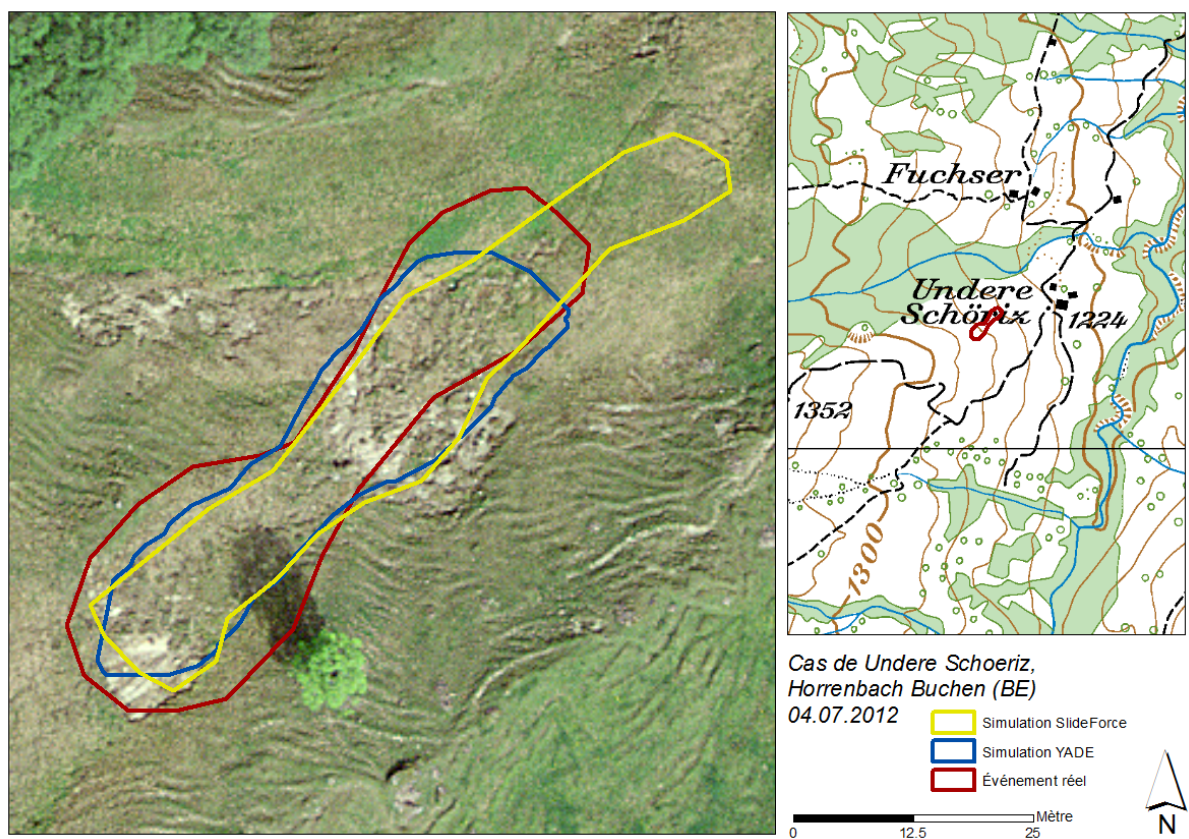


Figure C.6. – Résultats de simulation des modèles YADE et SlideForce ainsi que le périmètre correspondant de l'événement historique (réel) pour le cas d'Undere Schoeriz à Horrenbach Buchen (BE).

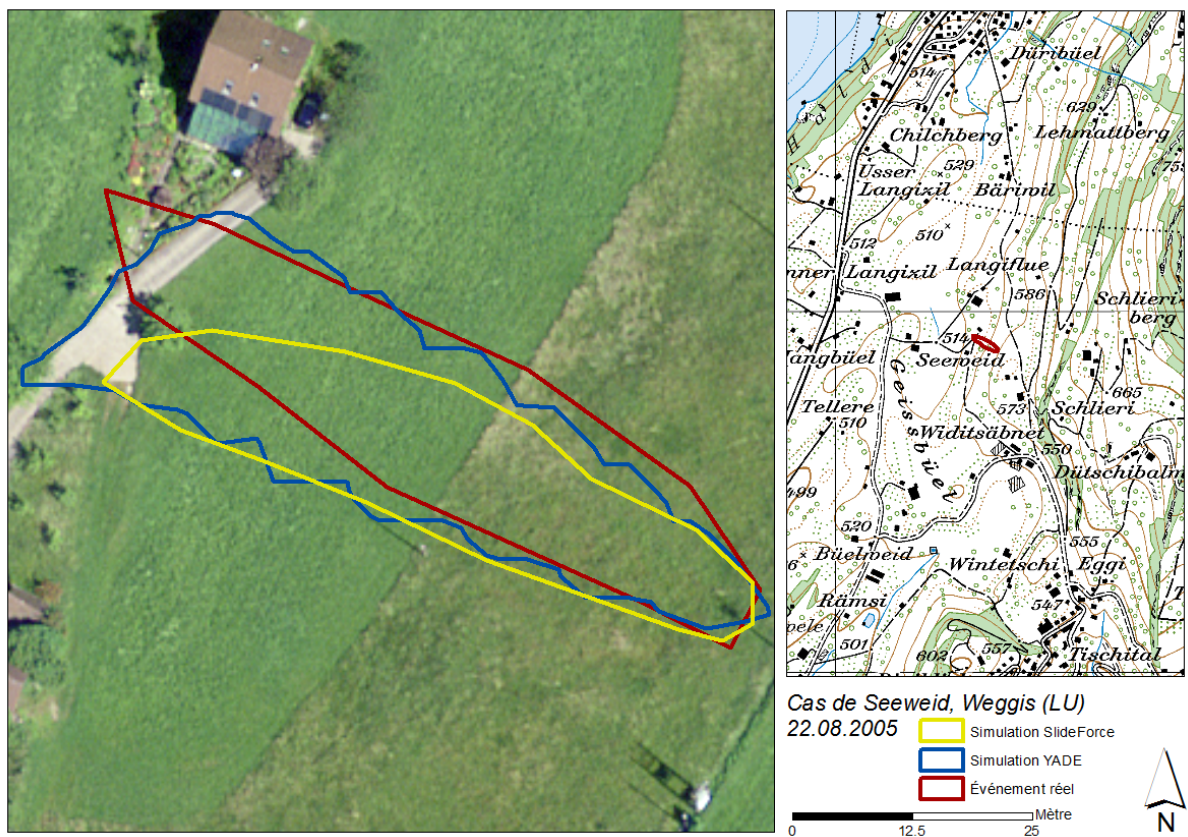


Figure C.7. – Résultats de simulation des modèles YADE et SlideForce ainsi que le périmètre correspondant de l'événement historique (réel) pour le cas de Seeweid à Weggis (LU).

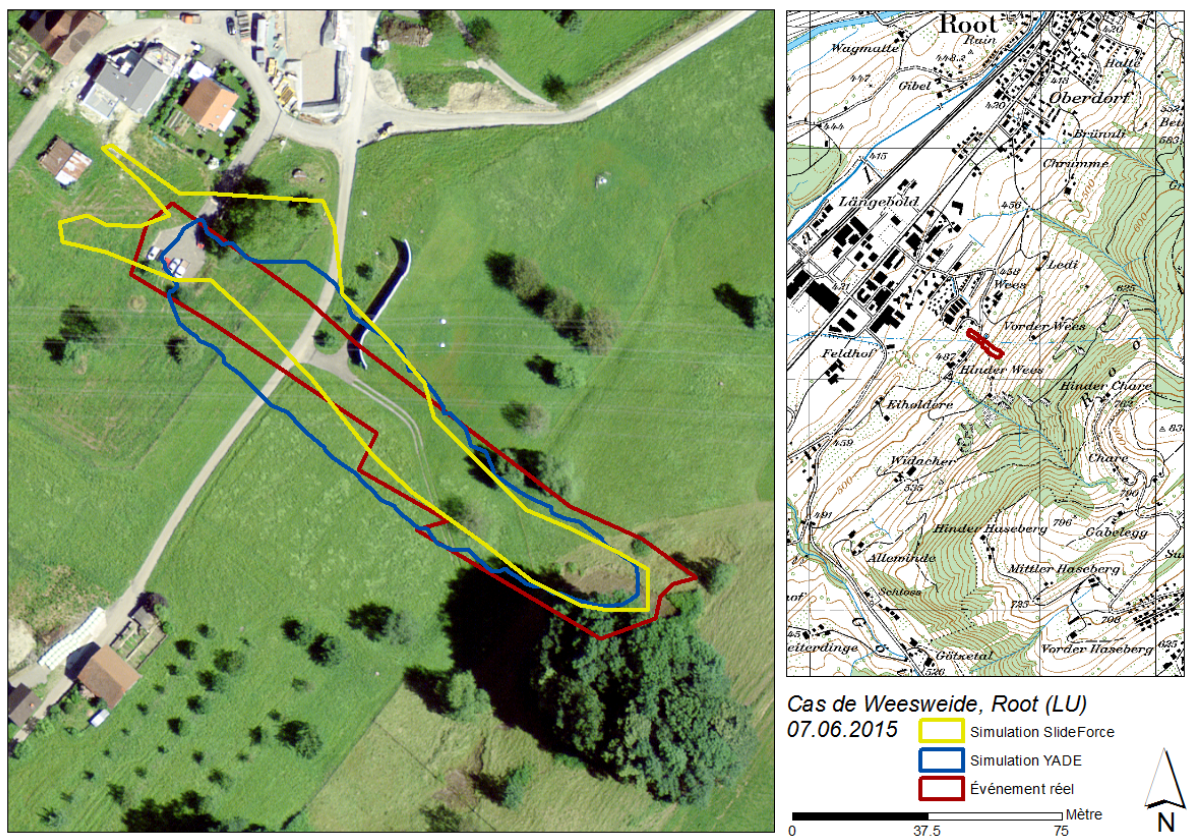


Figure C.8. – Résultats de simulation des modèles YADE et SlideForce ainsi que le périmètre correspondant de l'événement historique (réel) pour le cas de Weesweide à Root (LU).

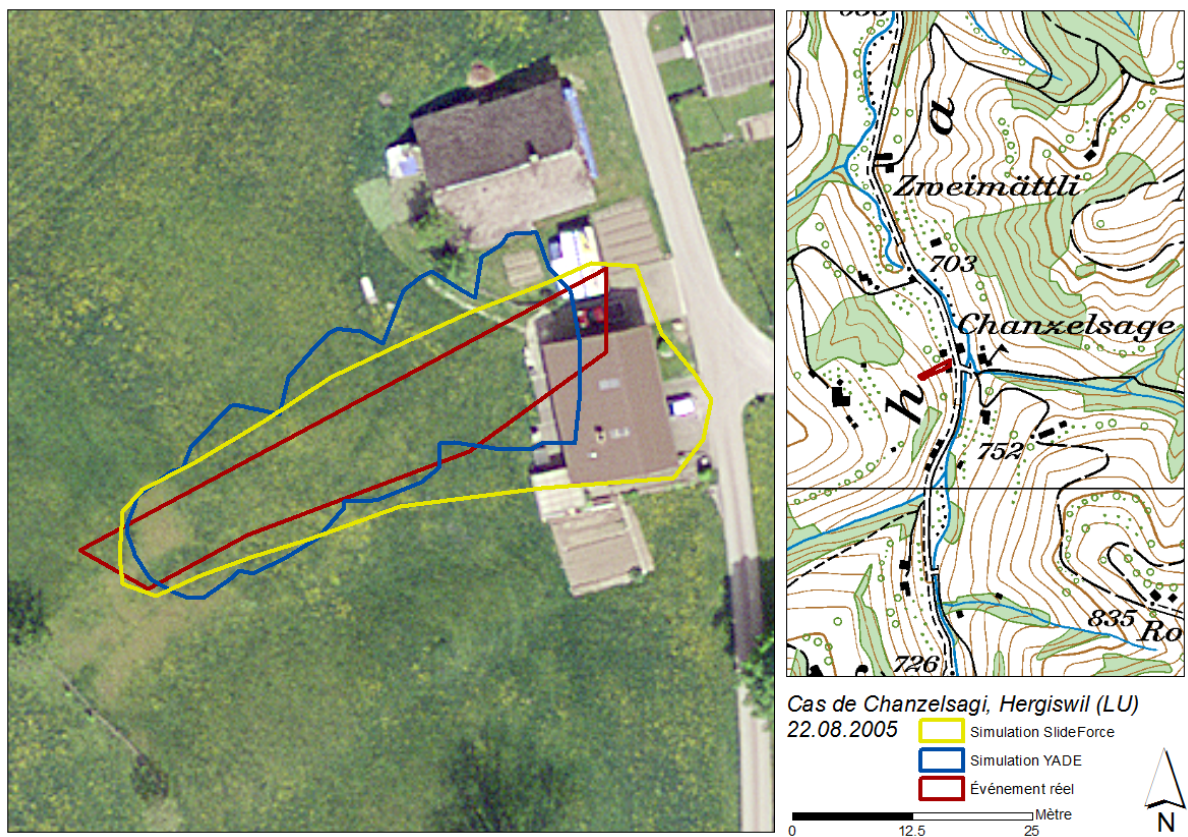


Figure C.9. – Résultats de simulation des modèles YADE et SlideForce ainsi que le périmètre correspondant de l'événement historique (réel) pour le cas de Chanzelsage à Hergiswil (LU).

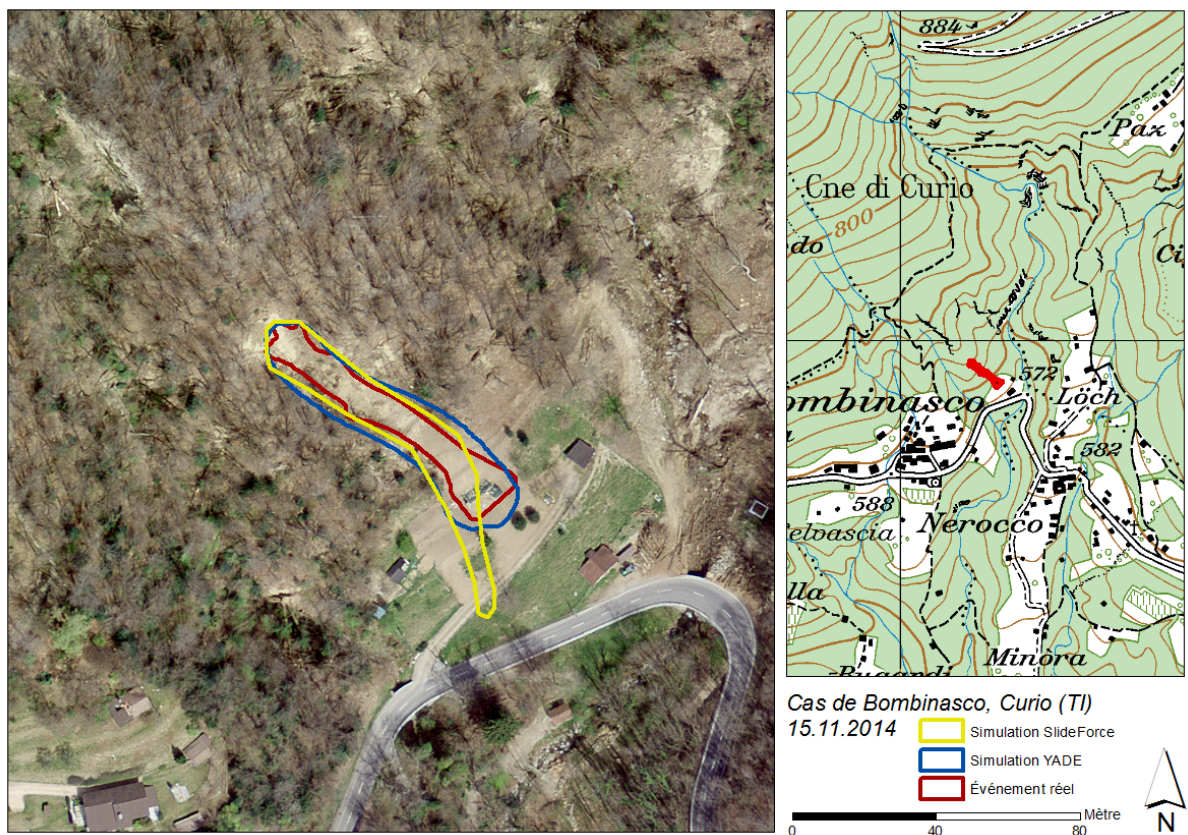


Figure C.10. – Résultats de simulation des modèles YADE et SlideForce ainsi que le périmètre correspondant de l'événement historique (réel) pour le cas de Bombinasco à Curio (TI).

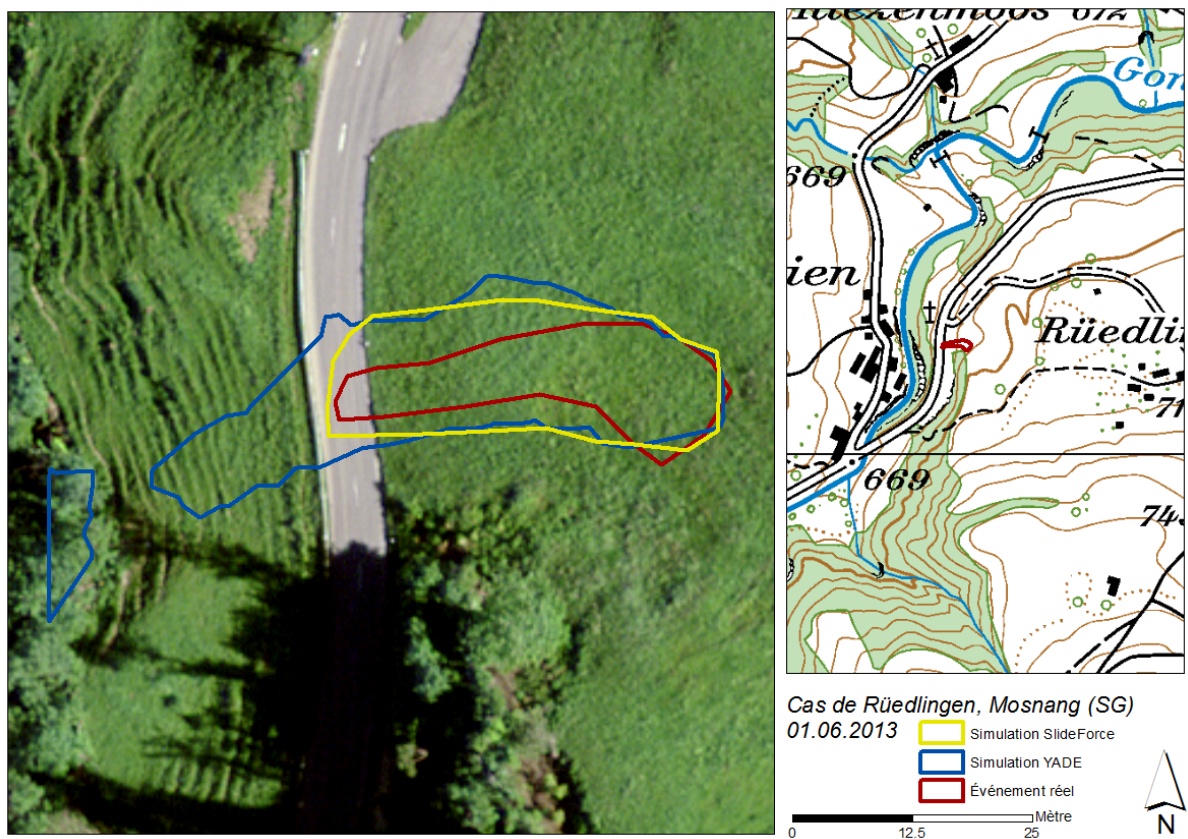


Figure C.11. – Résultats de simulation des modèles YADE et SlideForce ainsi que le périmètre correspondant de l'événement historique (réel) pour le cas de Ruedlingen à Mosnang (SG).

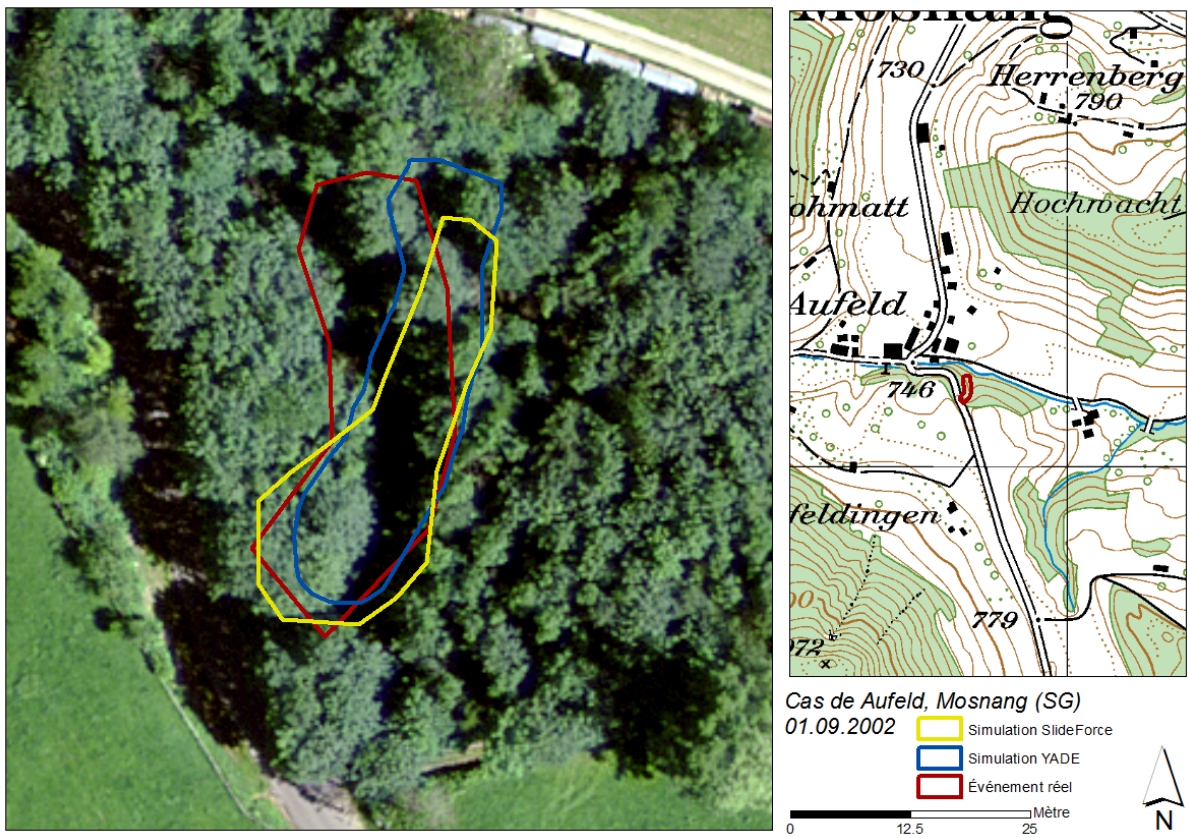


Figure C.12. – Résultats de simulation des modèles YADE et SlideForce ainsi que le périmètre correspondant de l'événement historique (réel) pour le cas d'Auffeld à Mosnang (SG).

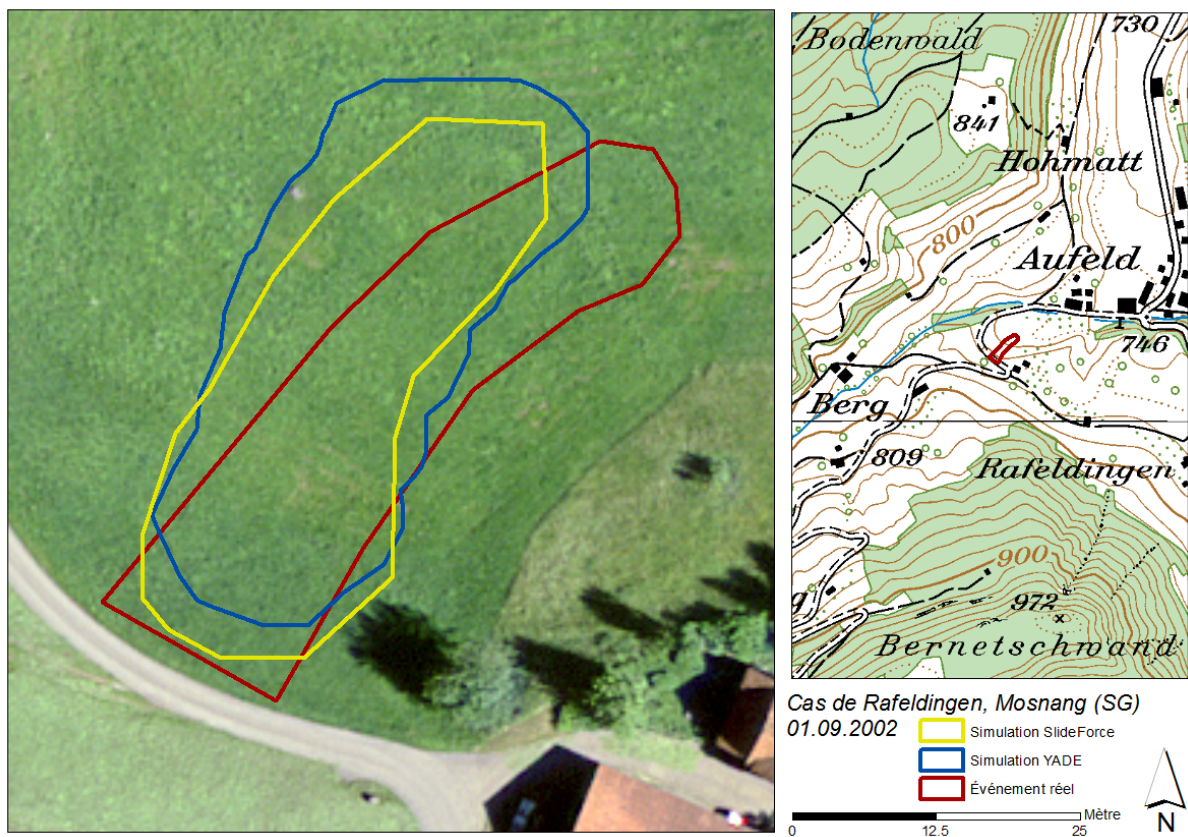


Figure C.13. – Résultats de simulation des modèles YADE et SlideForce ainsi que le périmètre correspondant de l'événement historique (réel) pour le cas de Rafeldingen à Mosnang (SG).

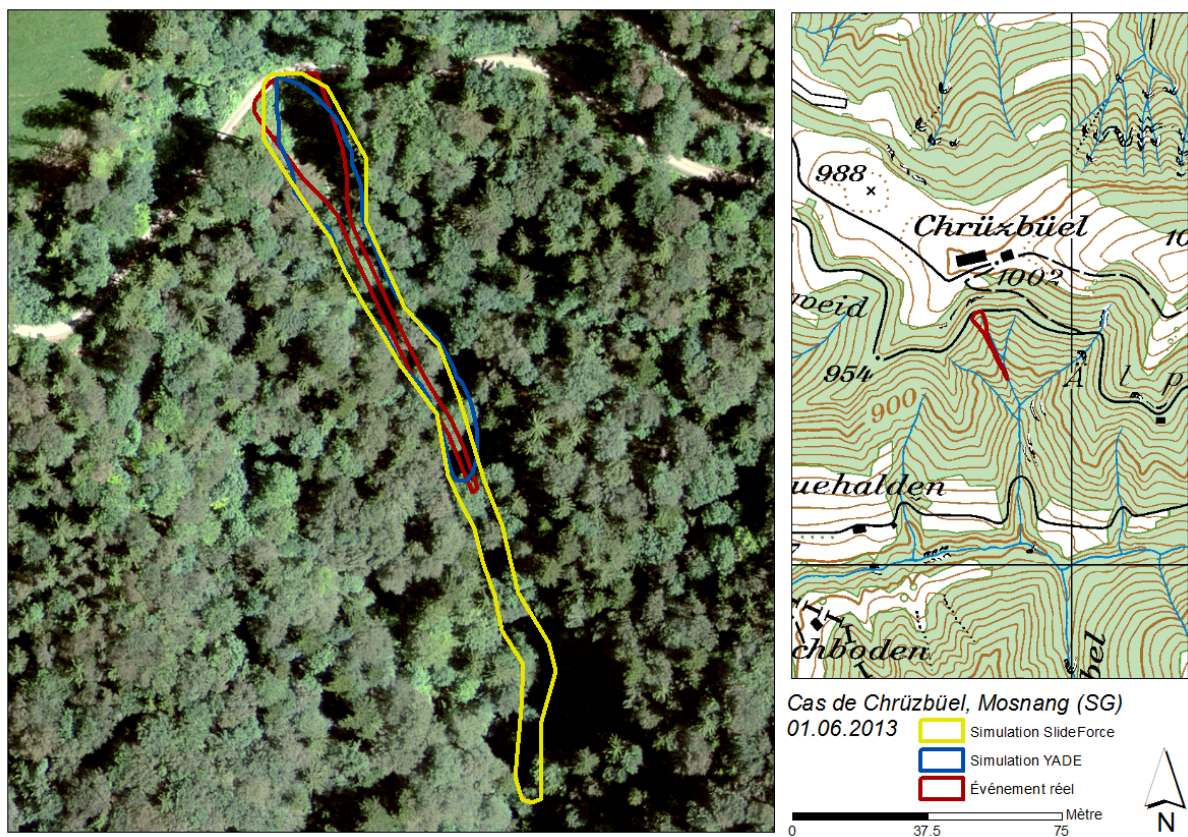


Figure C.14. – Résultats de simulation des modèles YADE et SlideForce ainsi que le périmètre correspondant de l'événement historique (réel) pour le cas de Chrüzbüel à Mosnang (SG).

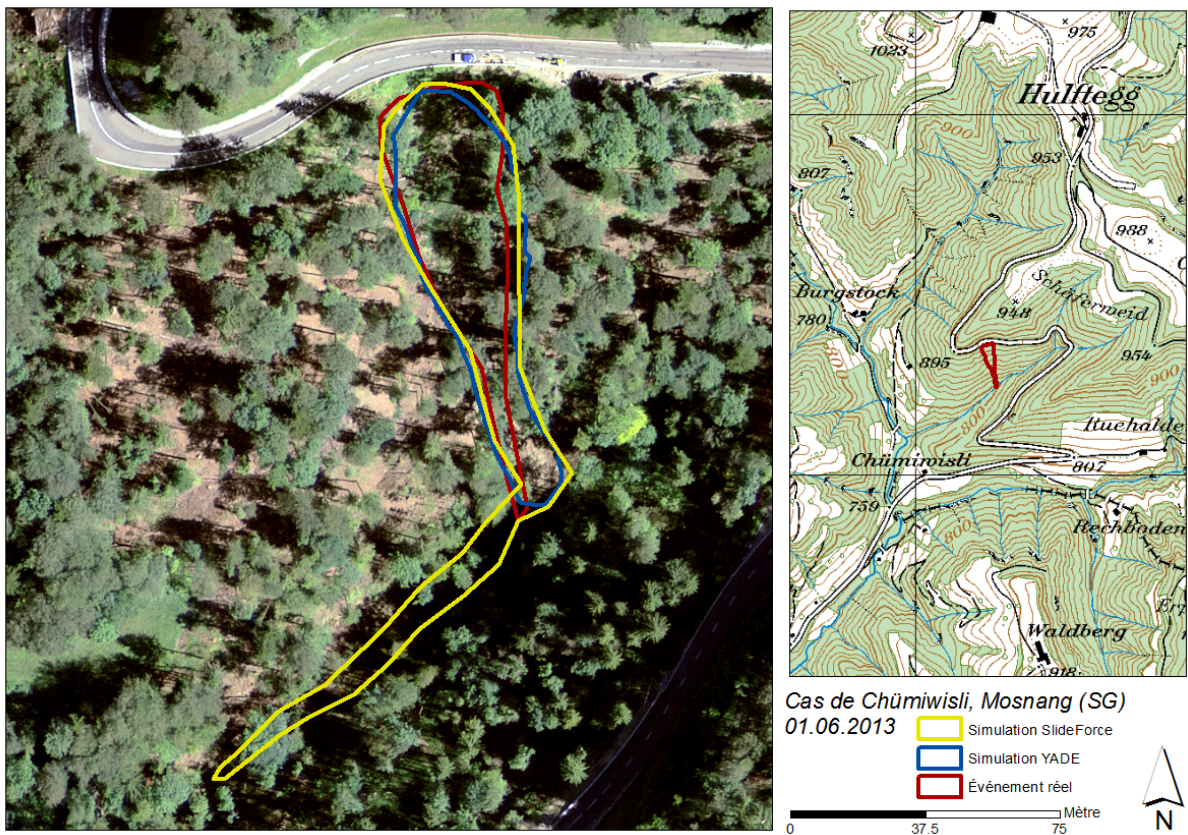


Figure C.15. – Résultats de simulation des modèles YADE et SlideForce ainsi que le périmètre correspondant de l'événement historique (réel) pour le cas de Chümiwisli à Mosnang (SG).

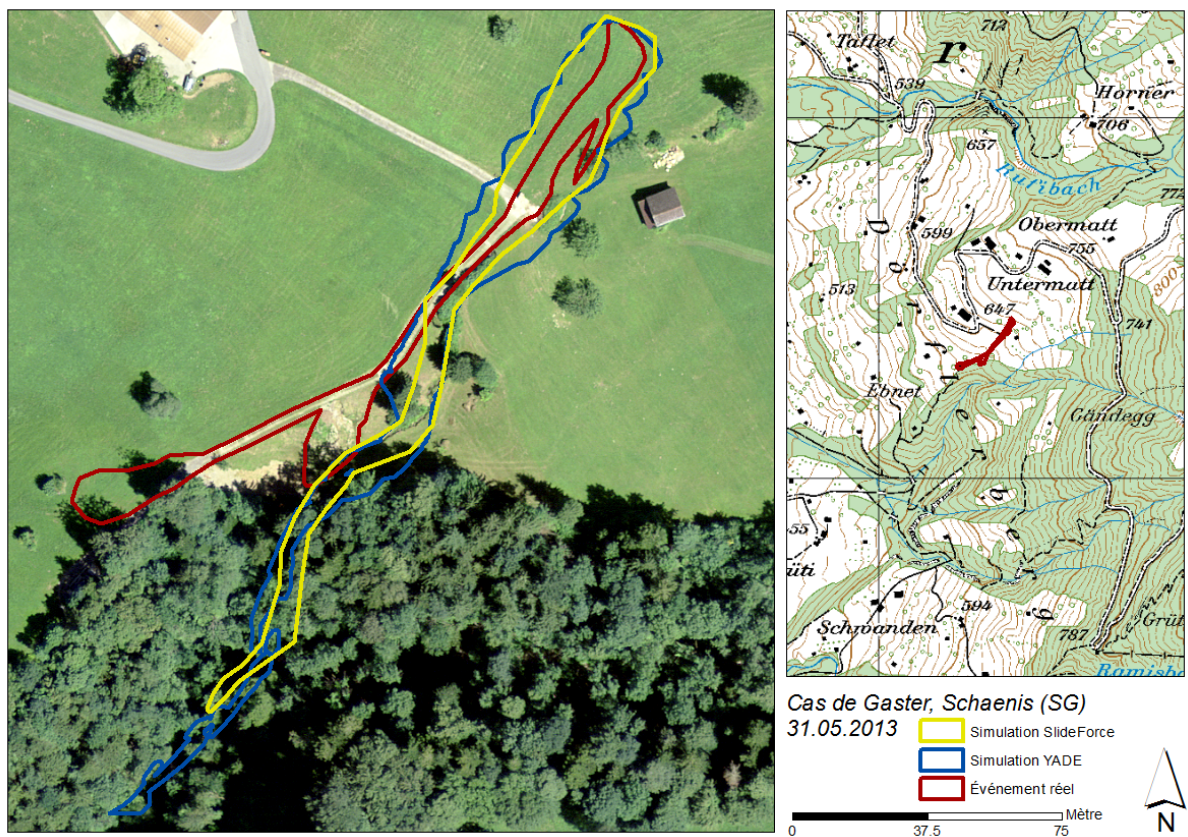


Figure C.16. – Résultats de simulation des modèles YADE et SlideForce ainsi que le périmètre correspondant de l'événement historique (réel) pour le cas de Gaster à Mosnang (SG).

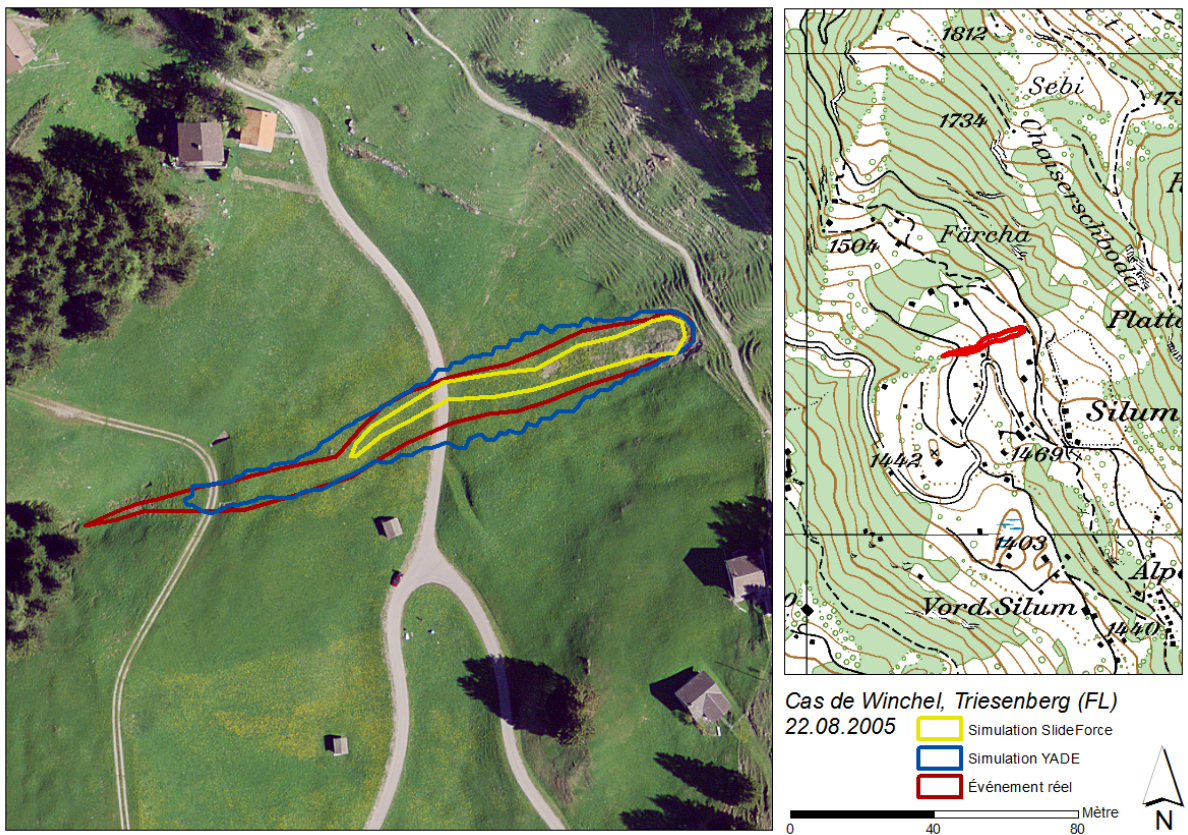


Figure C.17. – Résultats de simulation des modèles YADE et SlideForce ainsi que le périmètre correspondant de l'événement historique (réel) pour le cas de Winchel à Triesenberg (FL).

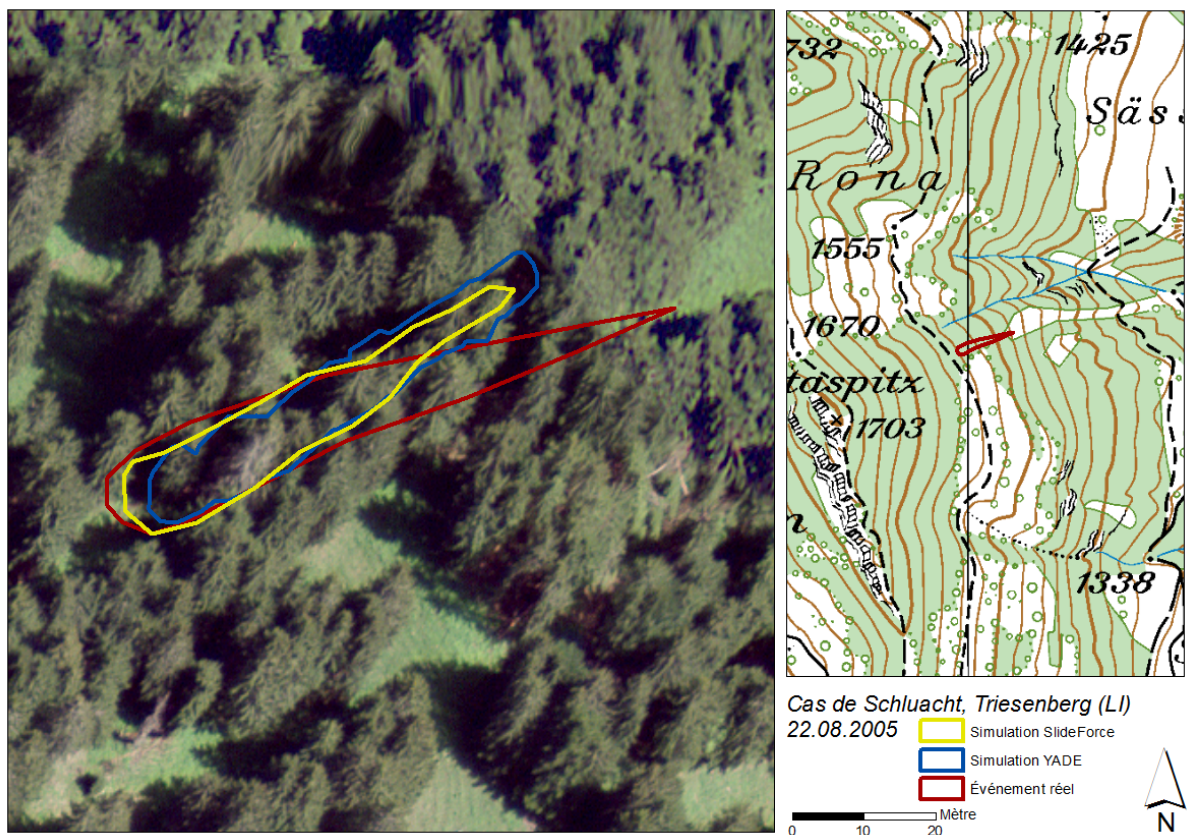


Figure C.18. – Résultats de simulation des modèles YADE et SlideForce ainsi que le périmètre correspondant de l'événement historique (réel) pour le cas de Schlucht à Triesenberg (FL).

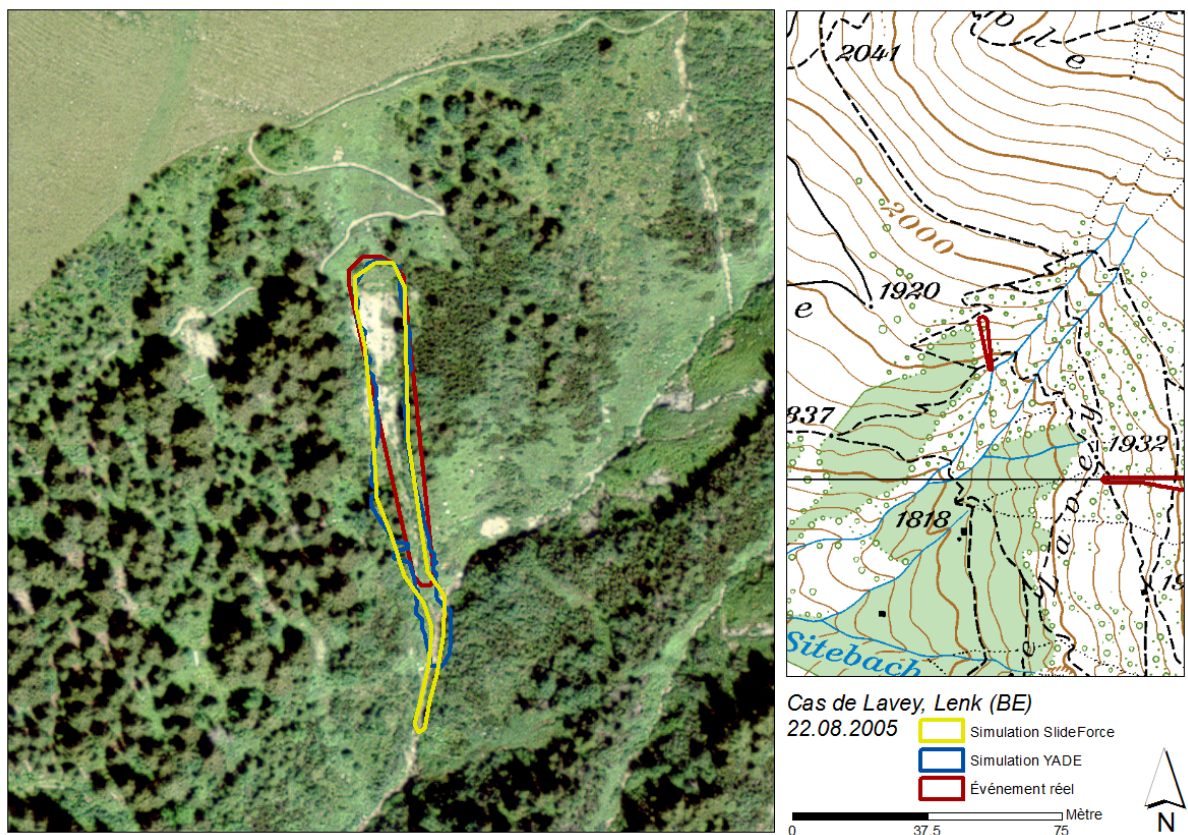


Figure C.19. – Résultats de simulation des modèles YADE et SlideForce ainsi que le périmètre correspondant de l'événement historique (réel) pour le cas de Lavey à Lenk (BE).

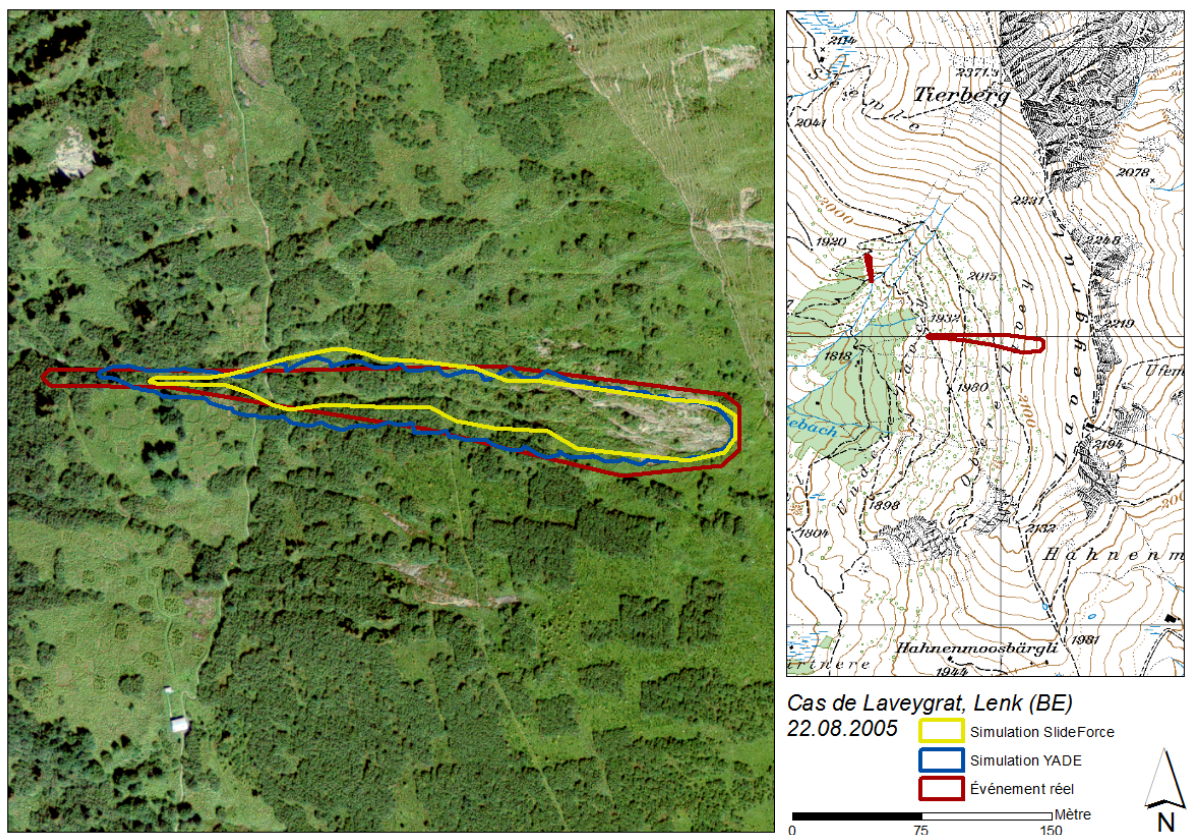


Figure C.20. – Résultats de simulation des modèles YADE et SlideForce ainsi que le périmètre correspondant de l'événement historique (réel) pour le cas de Laveygrat à Lenk (BE).

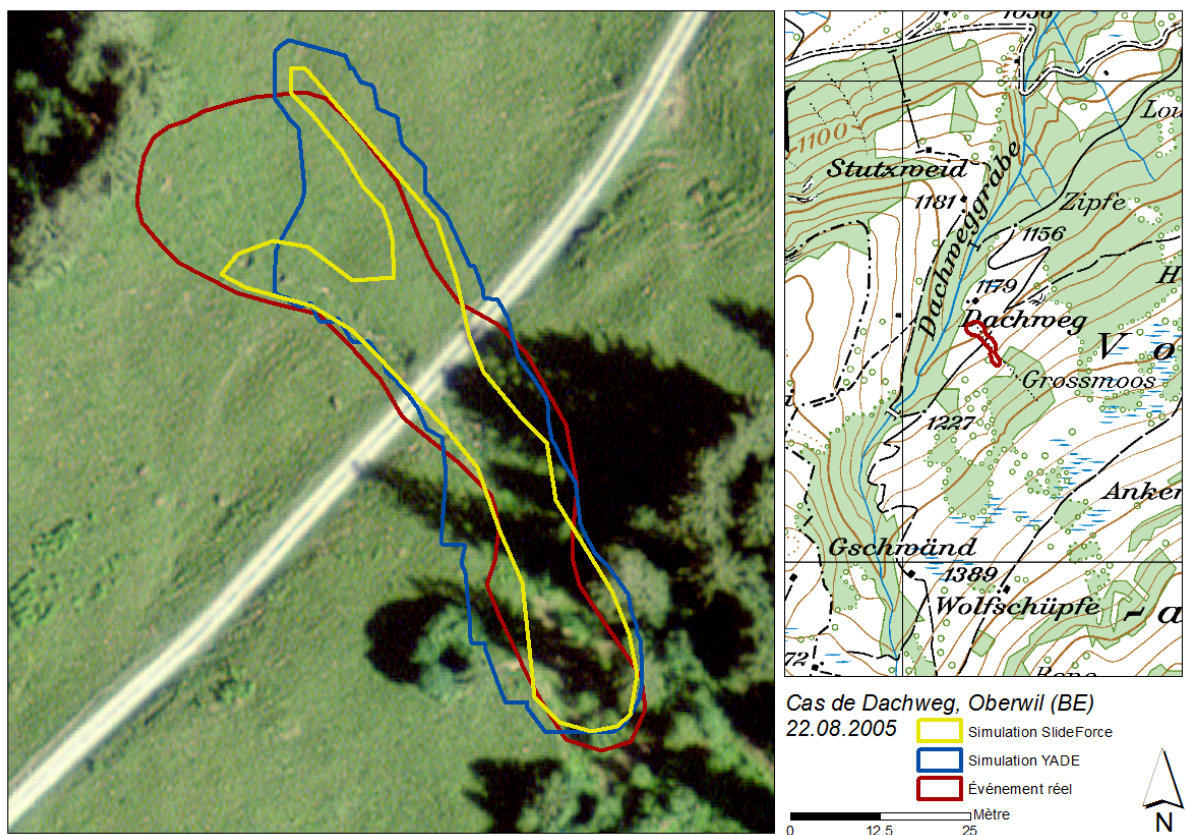


Figure C.21. – Résultats de simulation des modèles YADE et SlideForce ainsi que le périmètre correspondant de l'événement historique (réel) pour le cas de Dachweg à Oberwil (BE).

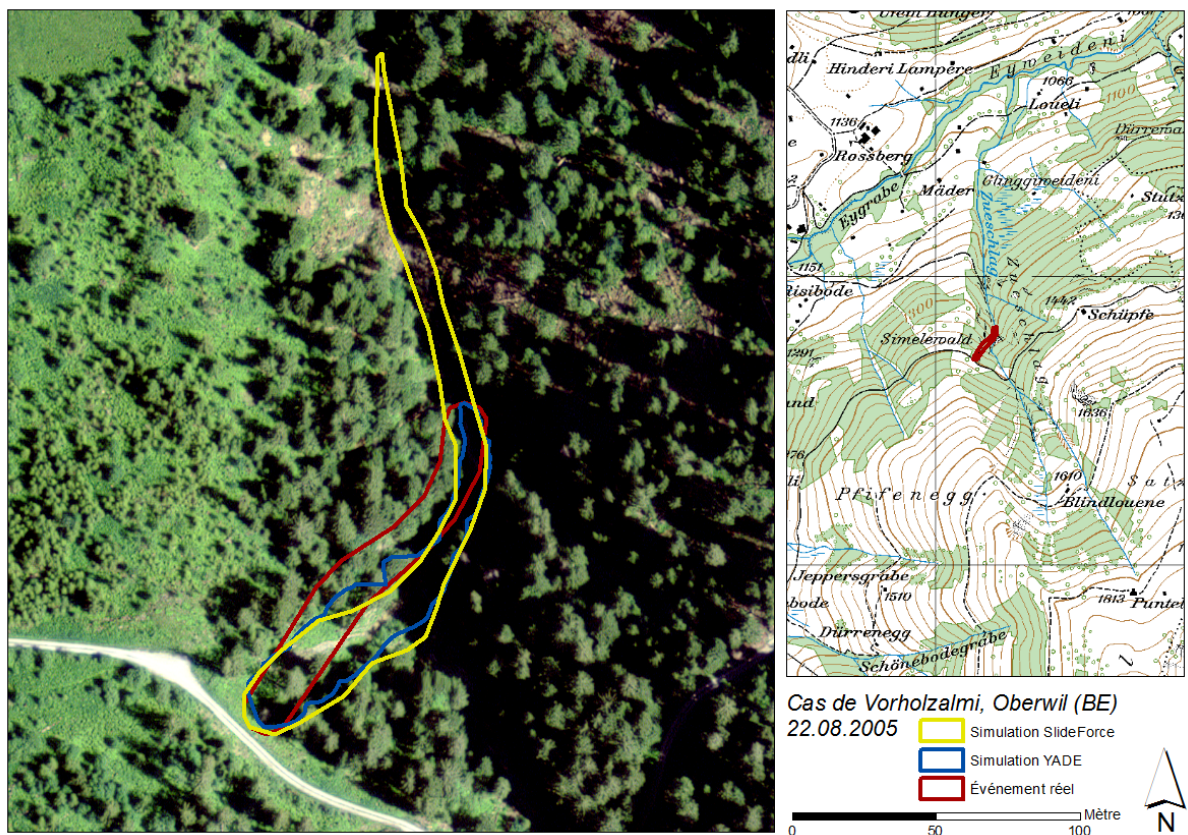


Figure C.22. – Résultats de simulation des modèles YADE et SlideForce ainsi que le périmètre correspondant de l'événement historique (réel) pour le cas de Vorholzalmi à Oberwil (BE).

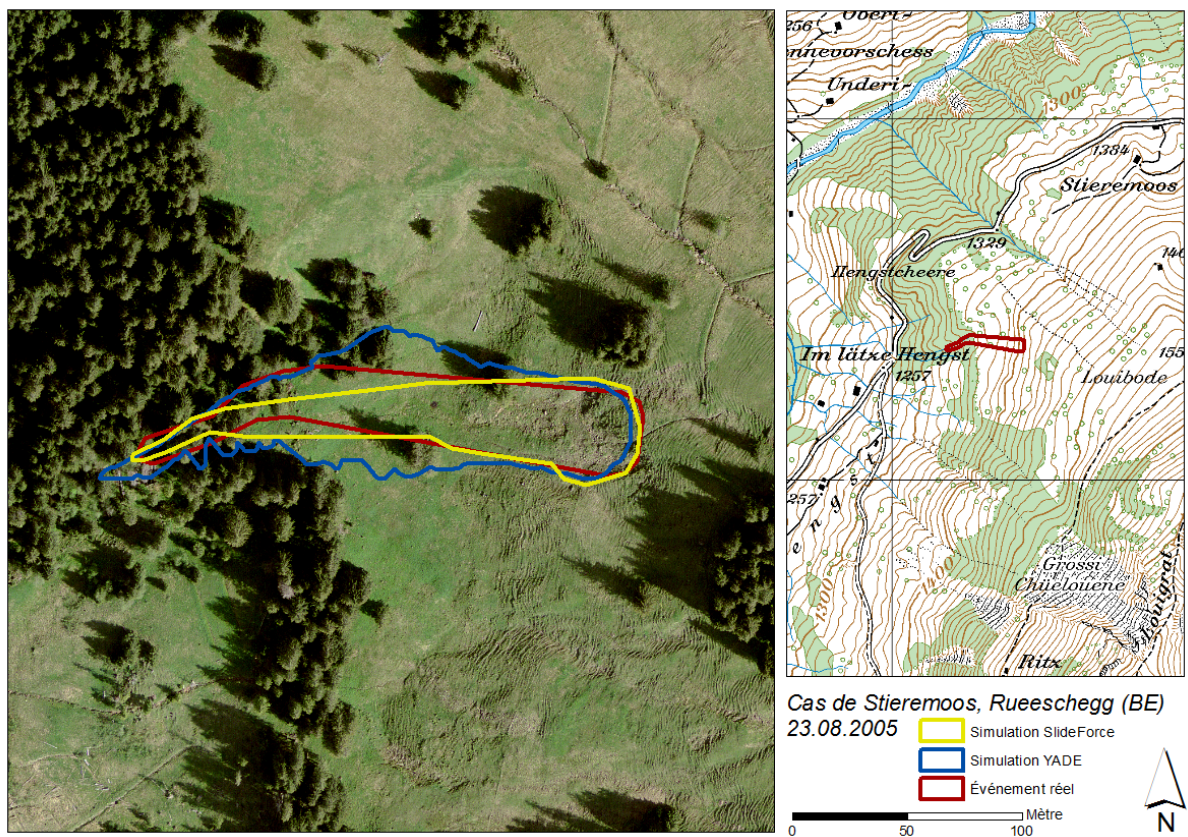


Figure C.23. – Résultats de simulation des modèles YADE et SlideForce ainsi que le périmètre correspondant de l'événement historique (réel) pour le cas de Stieremoos à Rueschegg (BE).

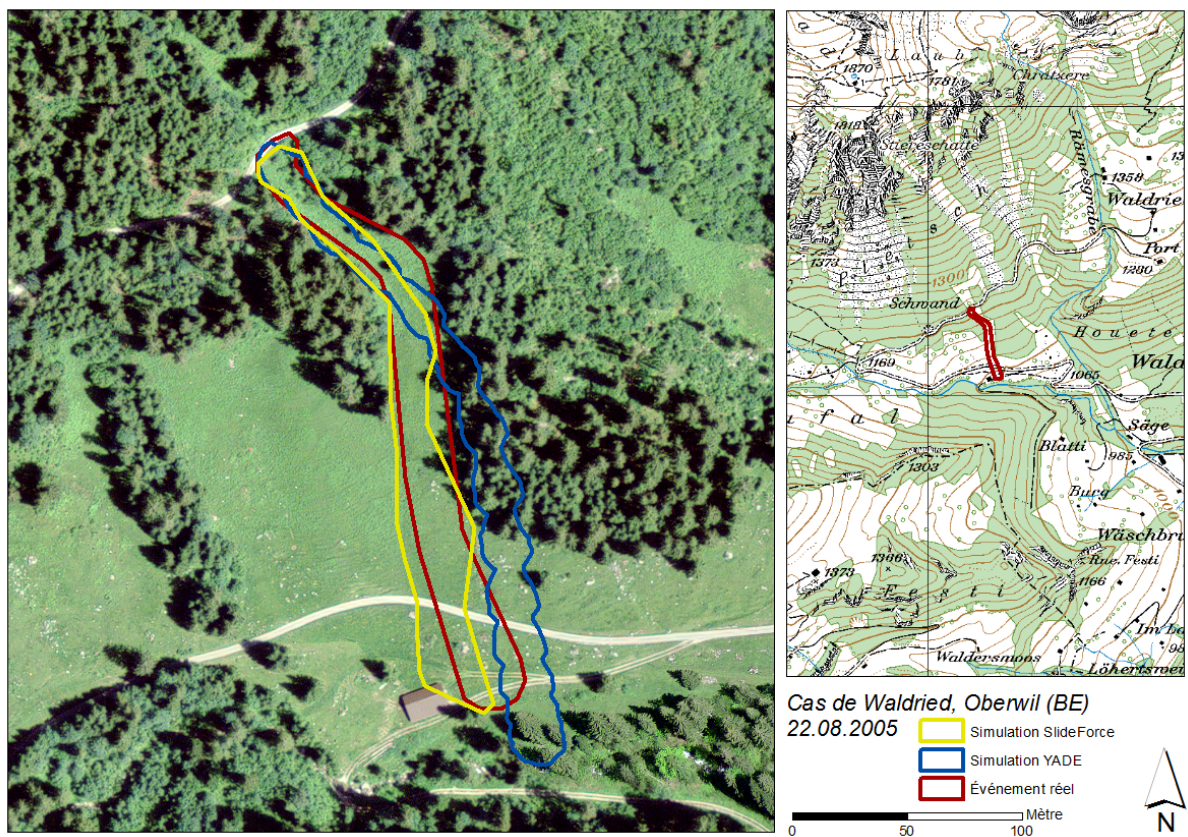


Figure C.24. – Résultats de simulation des modèles YADE et SlideForce ainsi que le périmètre correspondant de l'événement historique (réel) pour le cas de Waldried à Oberwil (BE).

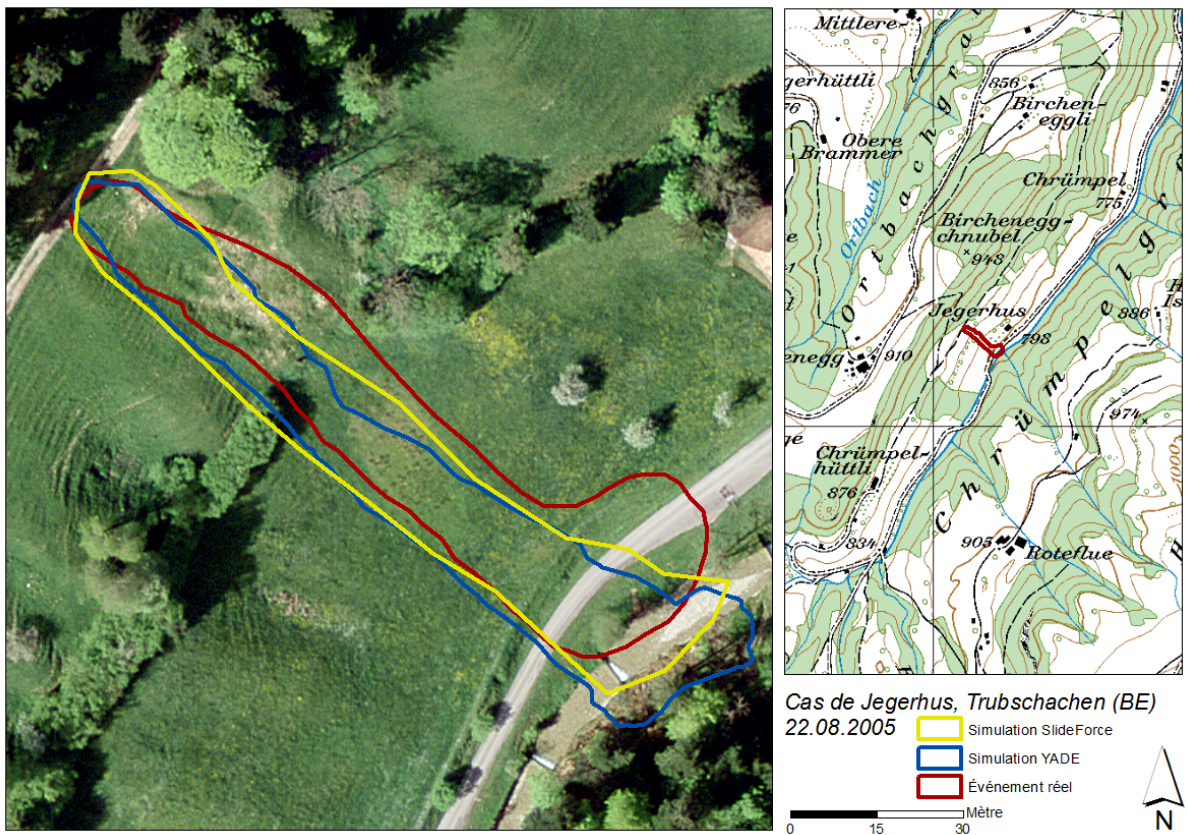


Figure C.25. – Résultats de simulation des modèles YADE et SlideForce ainsi que le périmètre correspondant de l'événement historique (réel) pour le cas de Jegerhus à Trubschachen (BE).

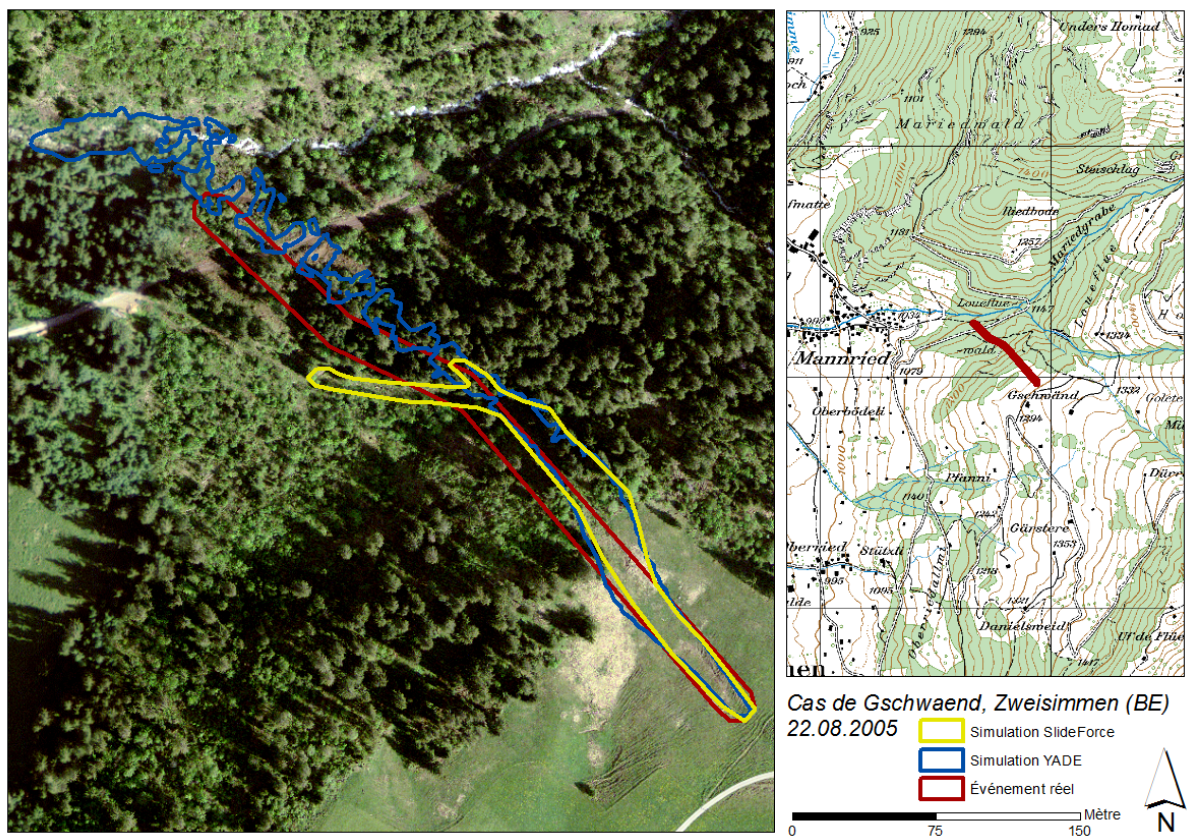


Figure C.26. – Résultats de simulation des modèles YADE et SlideForce ainsi que le périmètre correspondant de l'événement historique (réel) pour le cas de Gschwaend à Zweisimmen (BE).

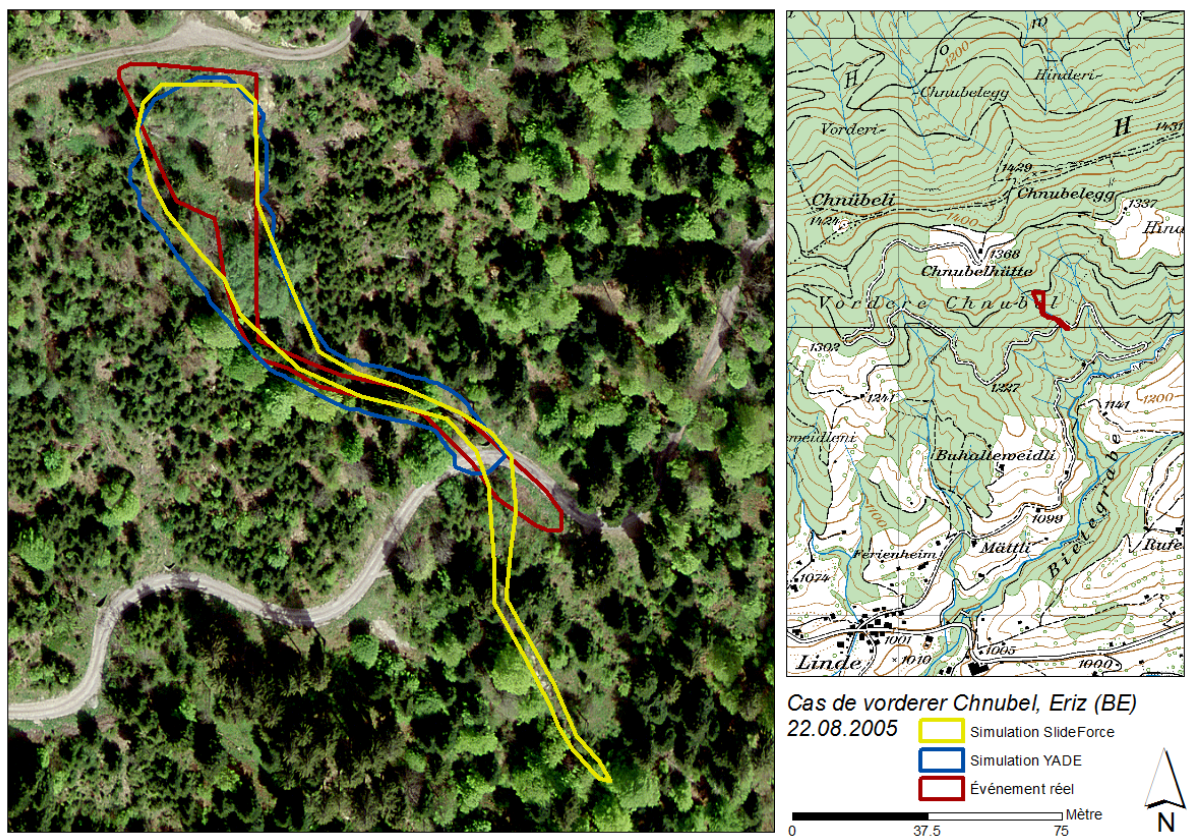


Figure C.27. – Résultats de simulation des modèles YADE et SlideForce ainsi que le périmètre correspondant de l'événement historique (réel) pour le cas de vorderer Chnubel à Eriz (BE).

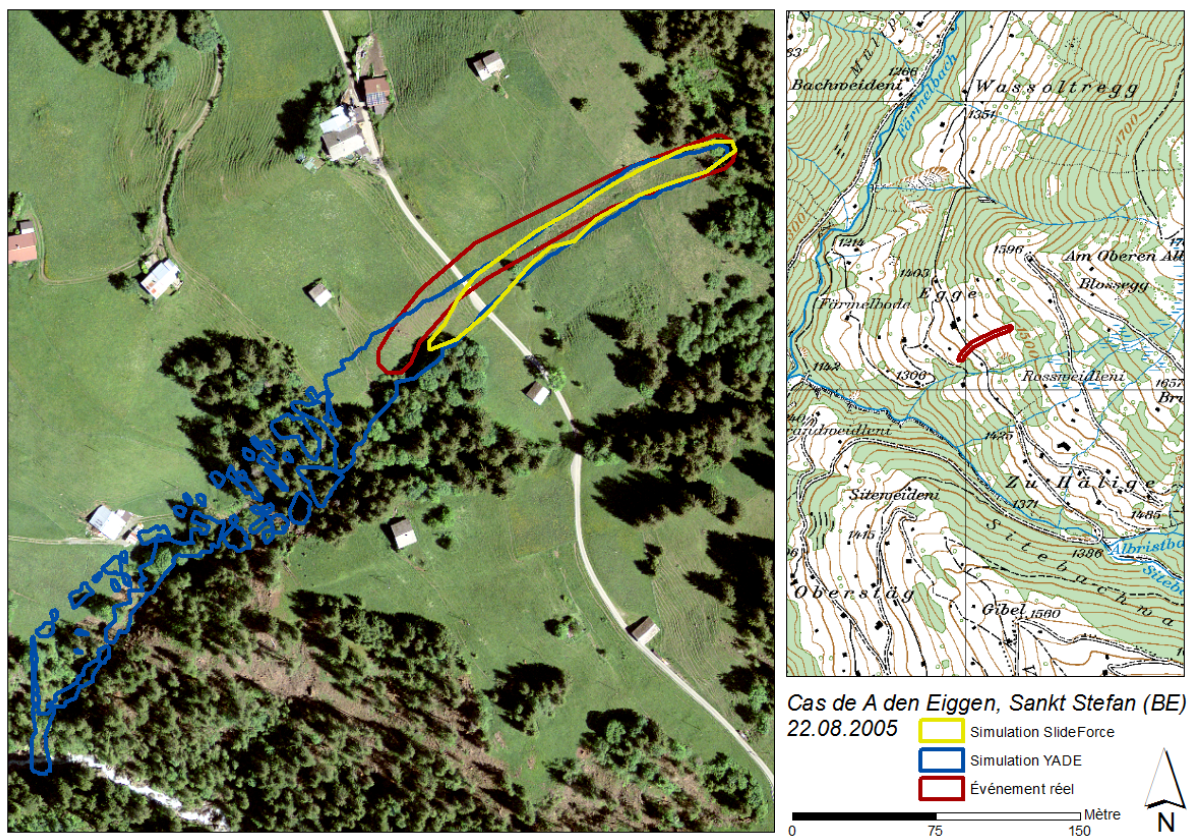


Figure C.28. – Résultats de simulation des modèles YADE et SlideForce ainsi que le périmètre correspondant de l'événement historique (réel) pour le cas d'A den Eighen à Sankt Stefan (BE).

D. Annexe - Simulations de propagation avec SlideForce

Les comparaisons entre les 28 événements réels et les simulations de SlideForce pour les 4 Types de Coulée (TC) sont présentées dans cette annexe. L'événement simulé est défini par le seuil de 50% de probabilité d'atteinte (100% - 50% = zone de propagation réaliste; inférieur à 50% = zone de propagation non-réaliste). Les cartes rasterisées ci-dessous montrent le chevauchement (modélisation = 1 & réalité = 1), de la sur-modélisation (modélisation = 1 & réalité = 0) et de la sous-modélisation (modélisation = 0 & réalité = 1). L'événement réel correspond ainsi à la combinaison de la zone de chevauchement et de sous-modélisation, tandis que l'événement modélisé correspond à la combinaison de la zone de chevauchement et de sur-modélisation.

Numéro d'événement : 1

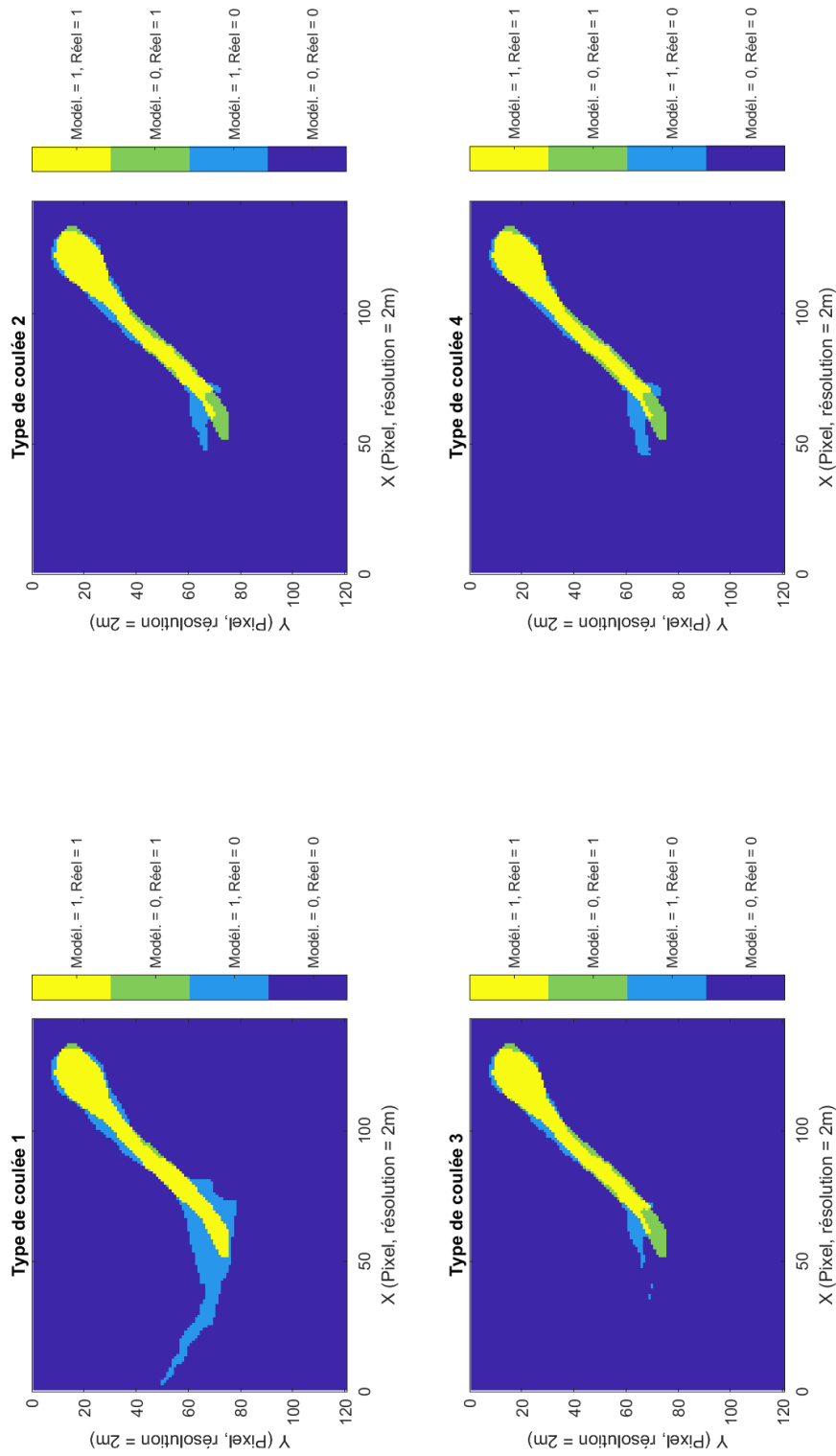


Figure D.1. – Résultats des simulations de SlideForce de l'événement n°1 pour les 4 types de coulées (TC) et comparaison avec l'événement historique.

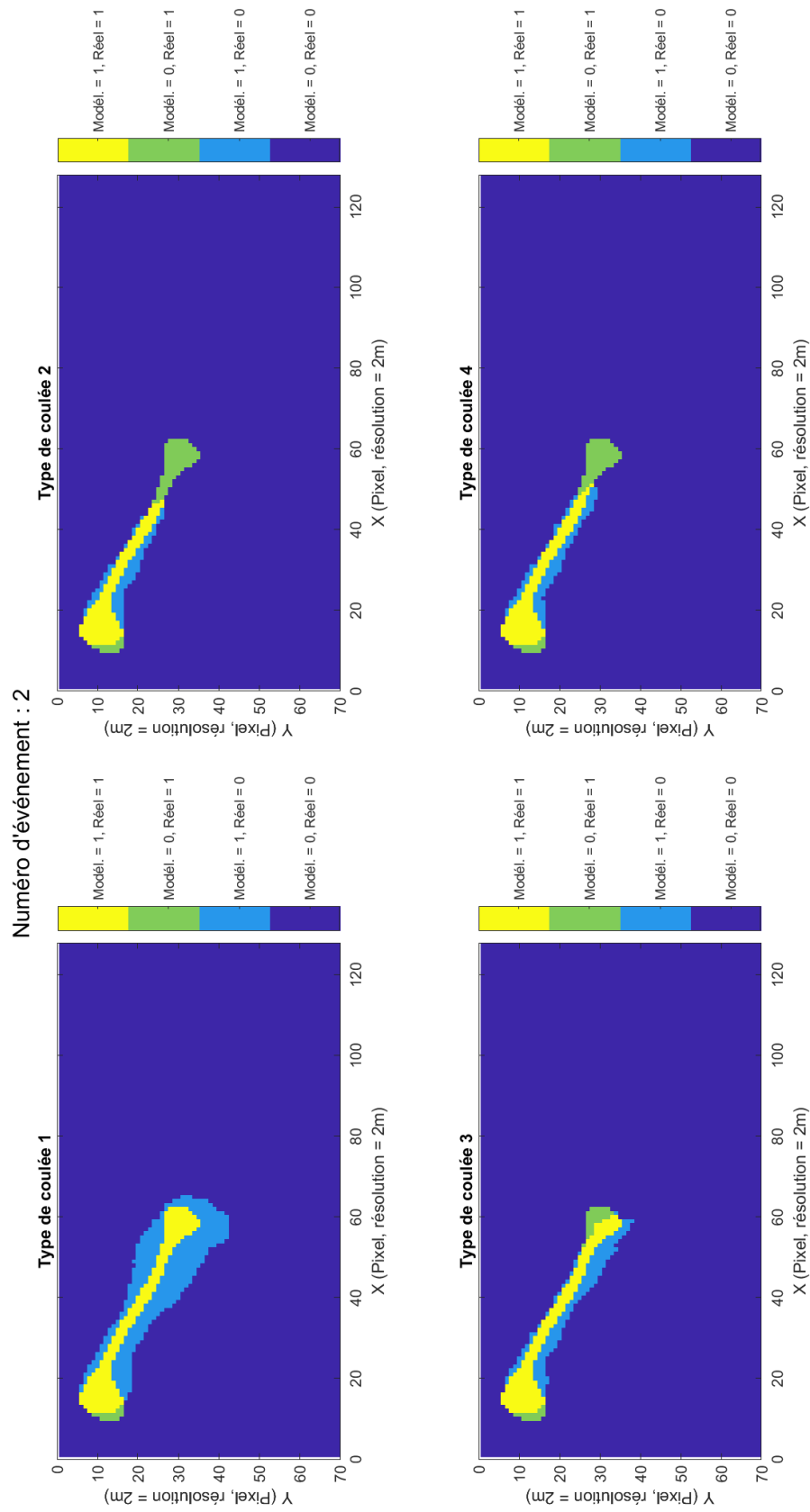


Figure D.2. – Résultats des simulations de SlideForce de l'évènement n°2 pour les 4 types de coulées (TC) et comparaison avec l'évènement historique.

Numéro d'événement : 3

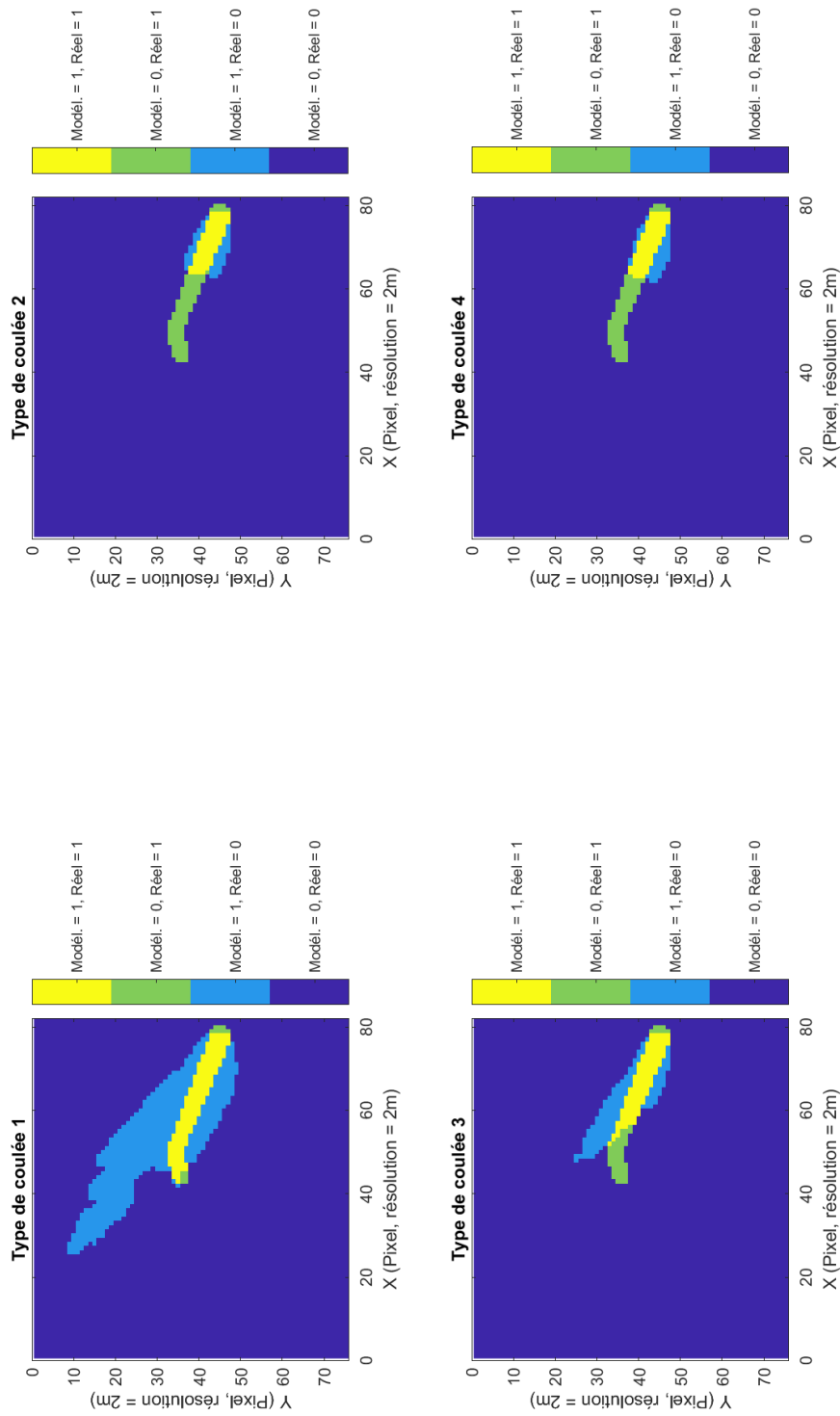


Figure D.3. – Résultats des simulations de SlideForce de l'événement n°3 pour les 4 types de coulées (TC) et comparaison avec l'événement historique.

Numéro d'événement : 4

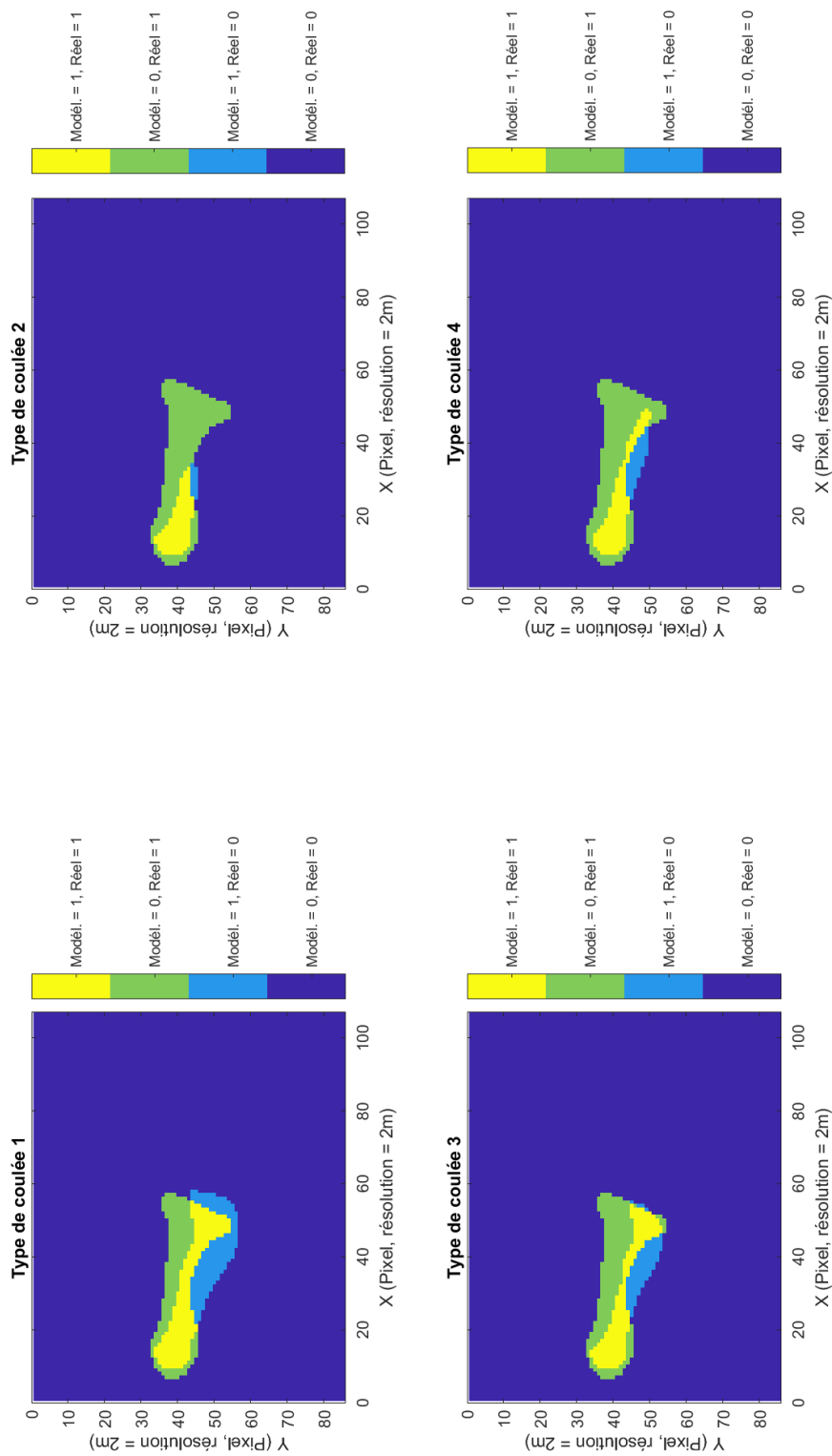


Figure D.4. – Résultats des simulations de SlideForce de l'événement n°4 pour les 4 types de coulées (TC) et comparaison avec l'événement historique.

Numéro d'événement : 5

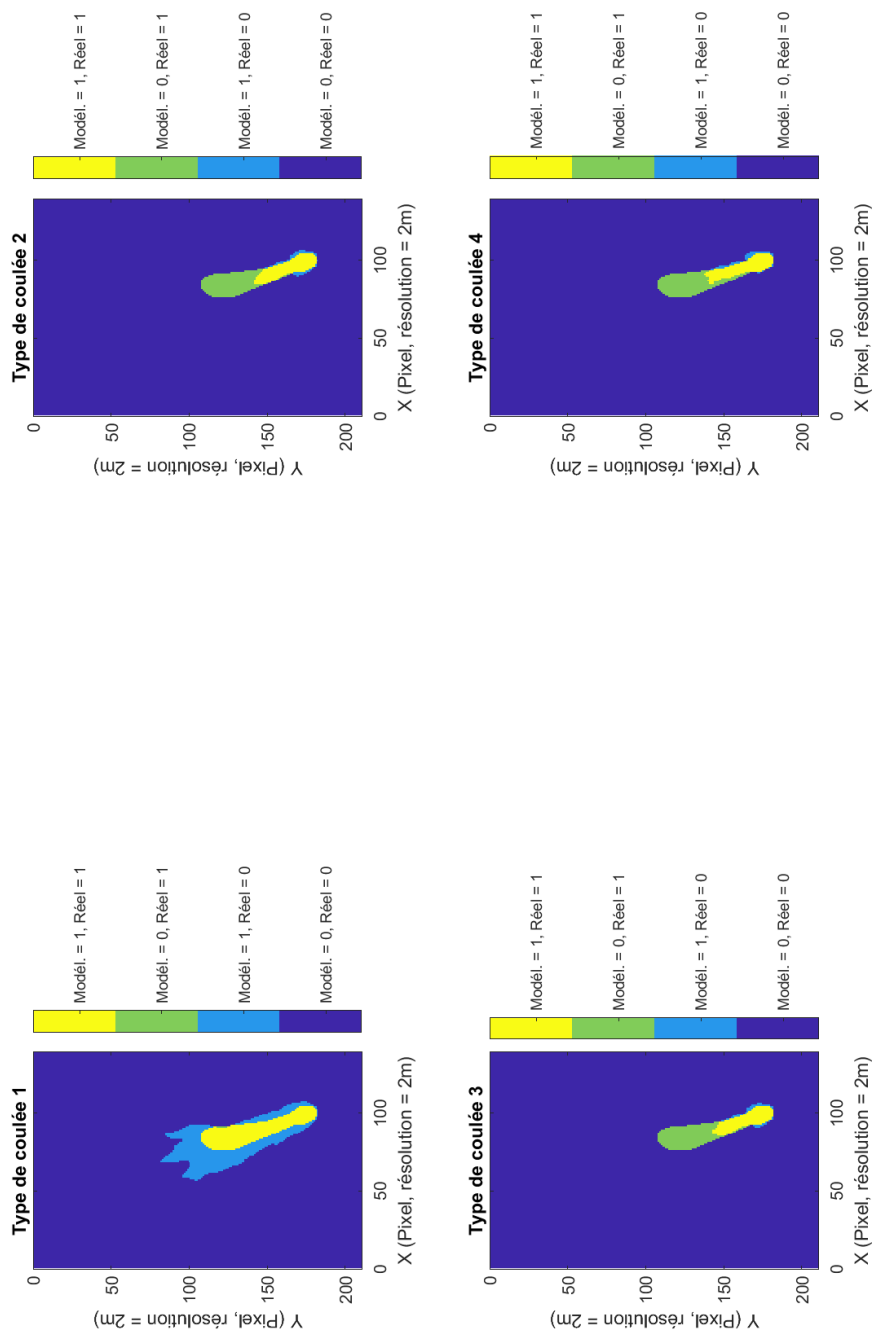


Figure D.5. – Résultats des simulations de SlideForce de l'événement n°5 pour les 4 types de coulées (TC) et comparaison avec l'événement historique.

Numéro d'événement : 6

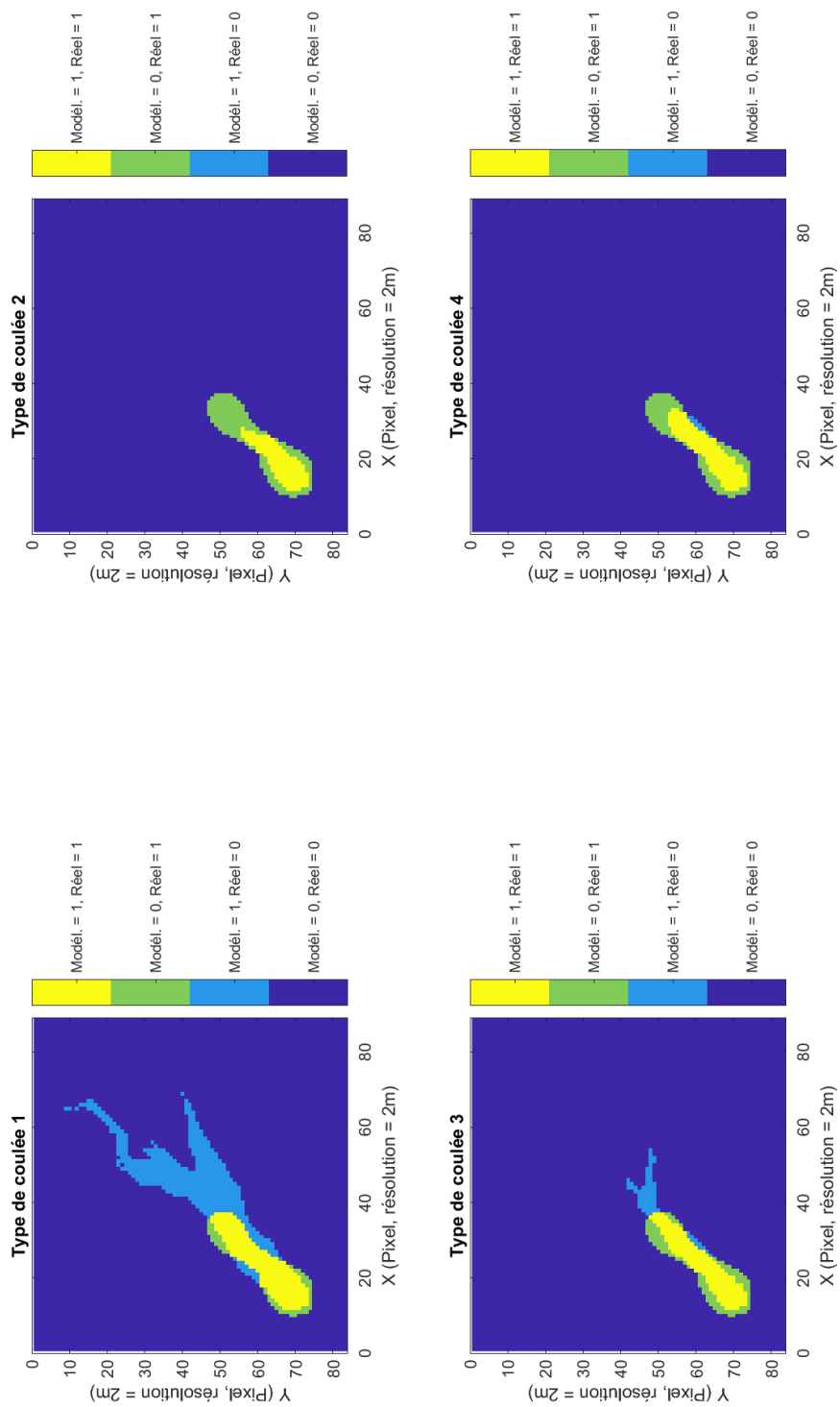


Figure D.6. – Résultats des simulations de SlideForce de l'événement n°6 pour les 4 types de coulées (TC) et comparaison avec l'événement historique.

Numéro d'événement : 7

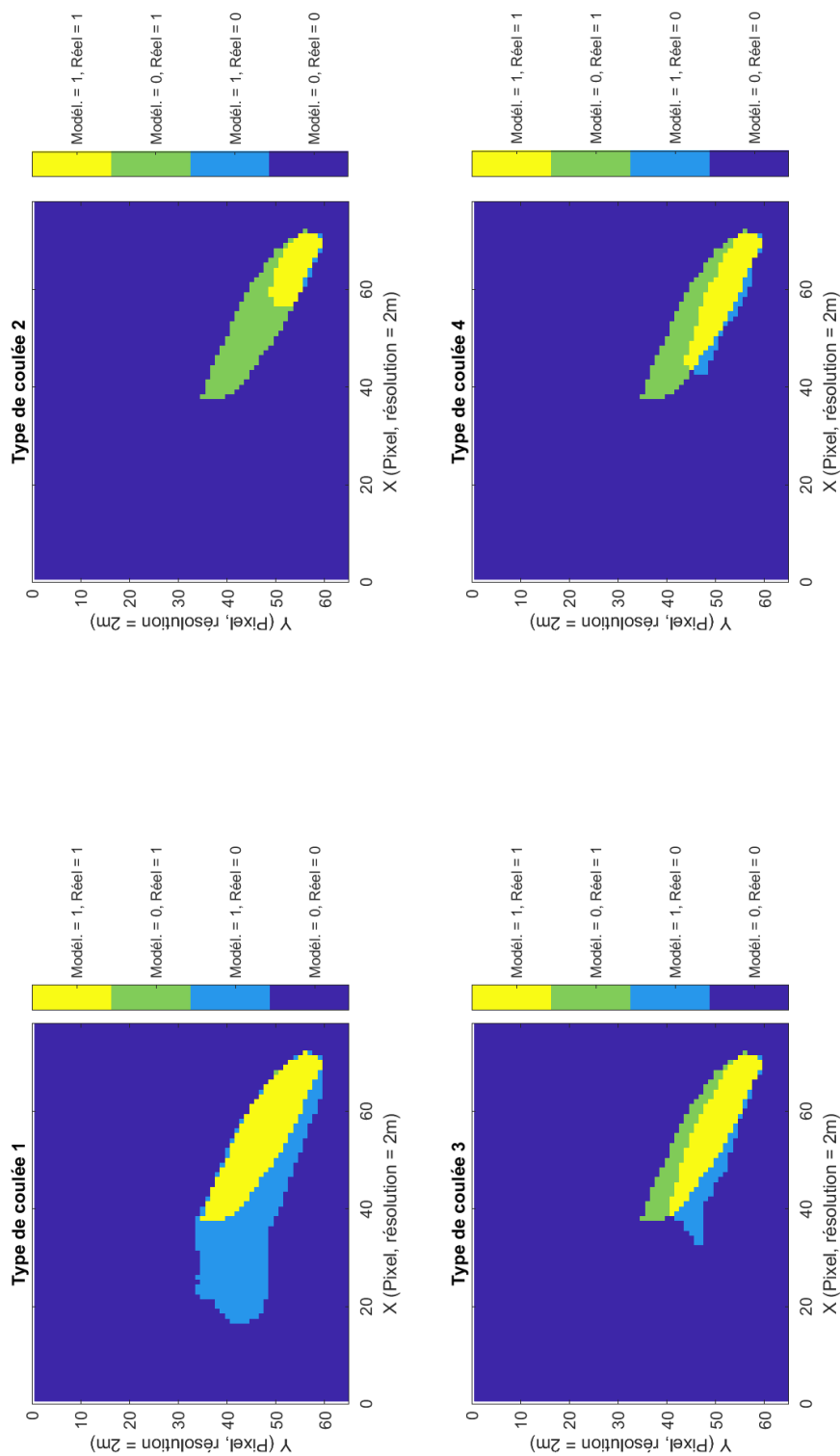


Figure D.7. – Résultats des simulations de SlideForce de l'événement n°7 pour les 4 types de coulées (TC) et comparaison avec l'événement historique.

Numéro d'événement : 8

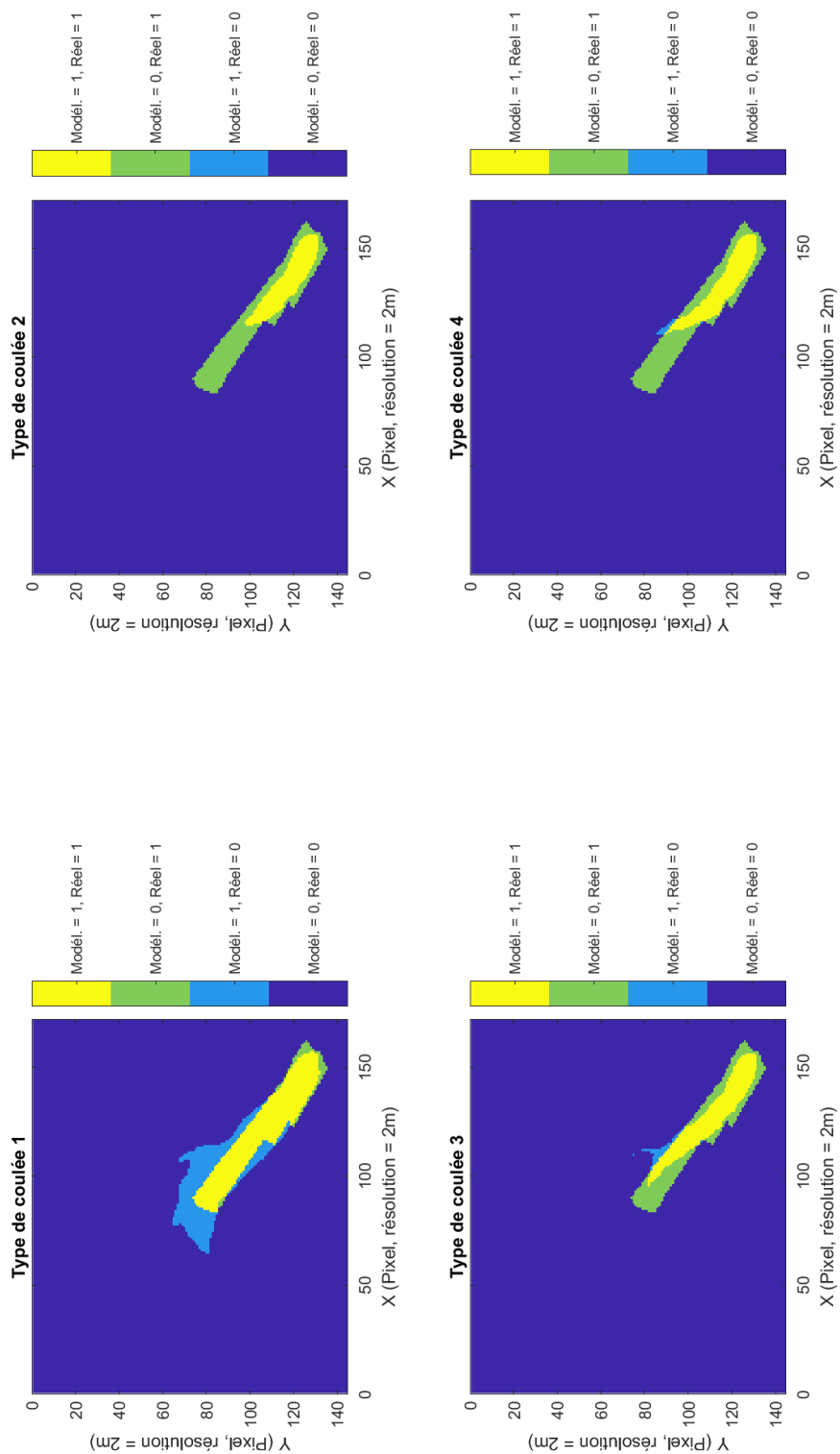


Figure D.8. – Résultats des simulations de SlideForce de l'événement n°8 pour les 4 types de coulées (TC) et comparaison avec l'événement historique.

Numéro d'événement : 9

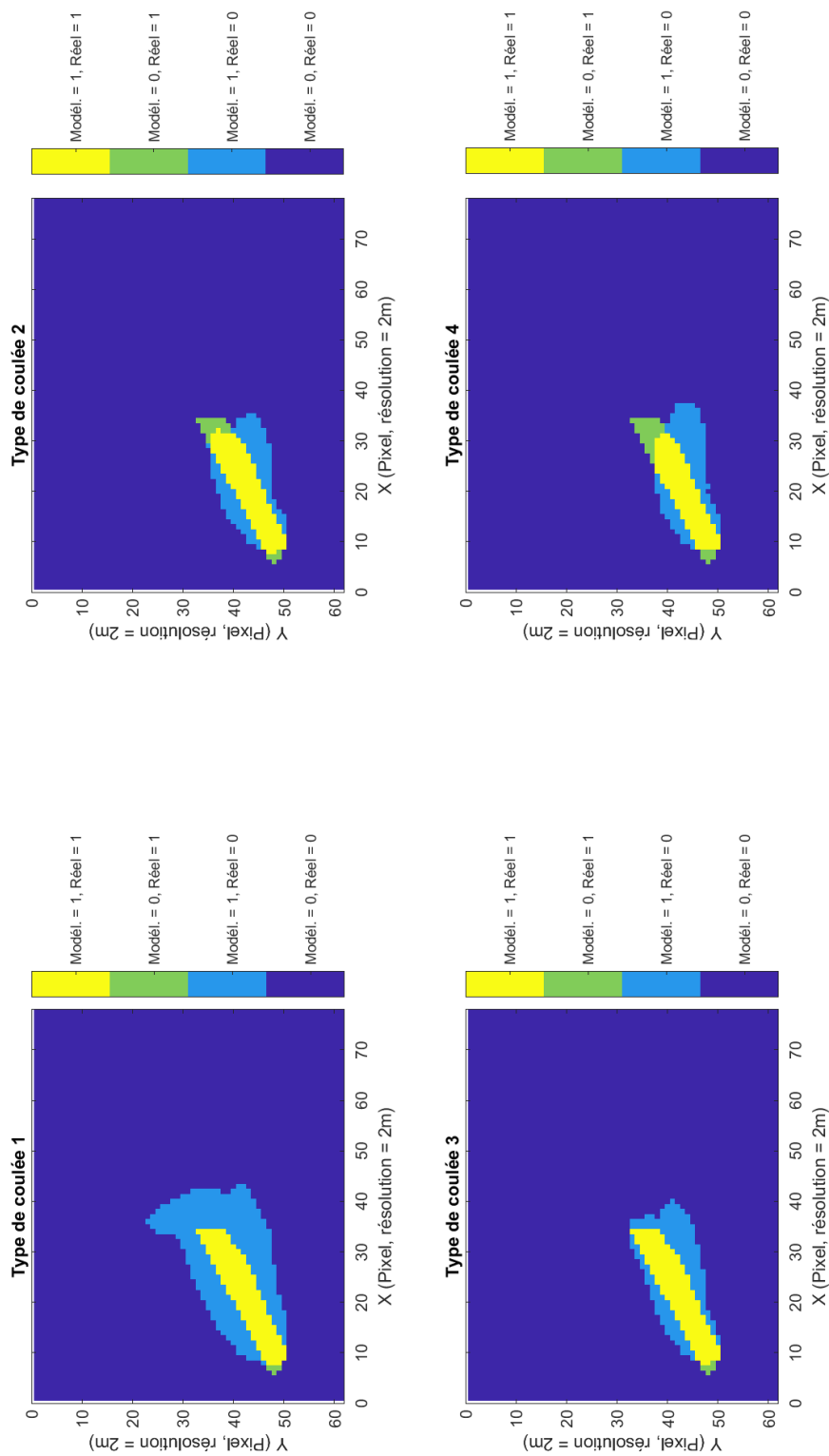


Figure D.9. – Résultats des simulations de SlideForce de l'événement n°9 pour les 4 types de coulées (TC) et comparaison avec l'événement historique.

Numéro d'événement : 10

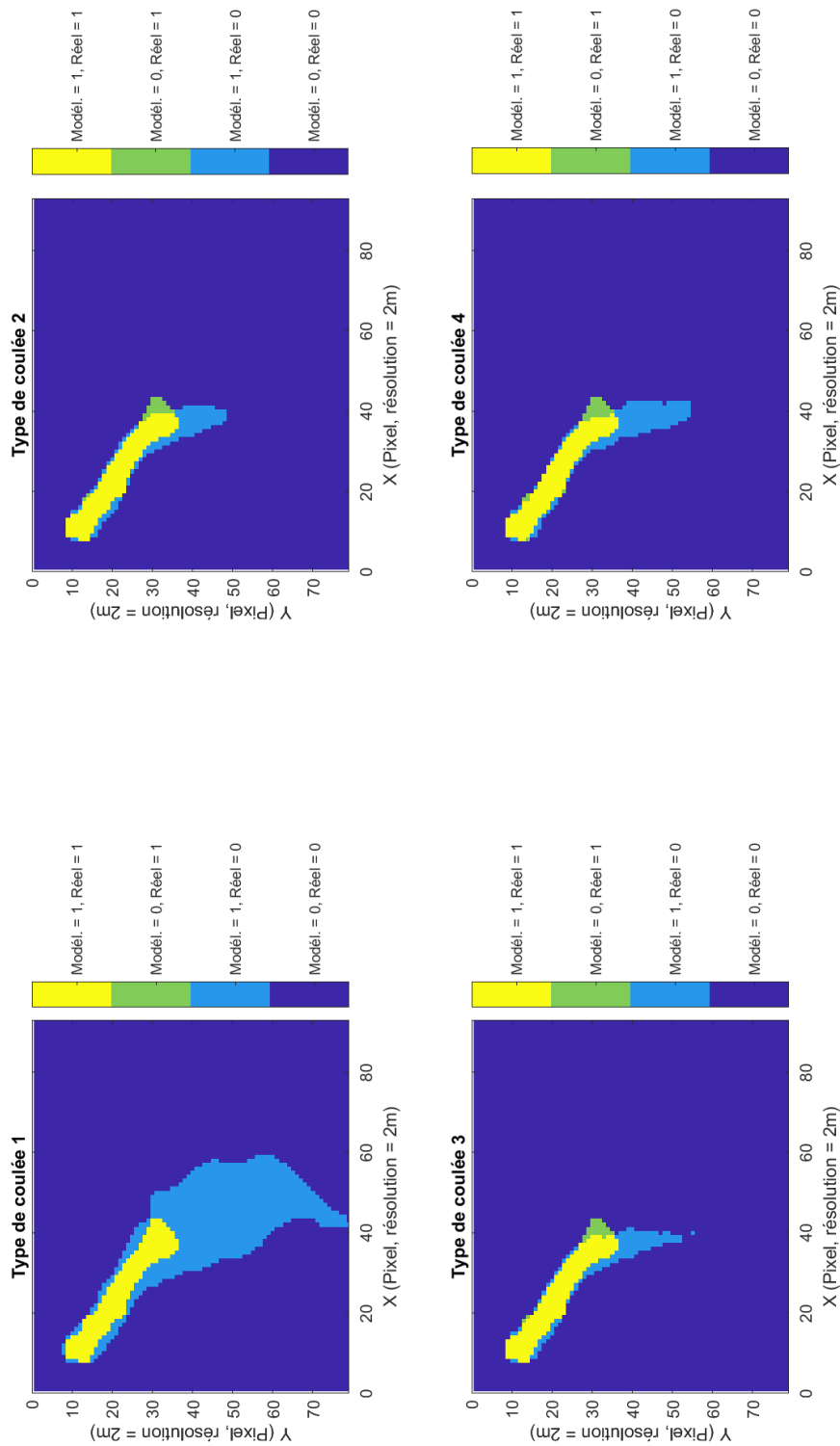


Figure D.10. – Résultats des simulations de SlideForce de l'événement n°10 pour les 4 types de coulées (TC) et comparaison avec l'événement historique.

Numéro d'événement : 11

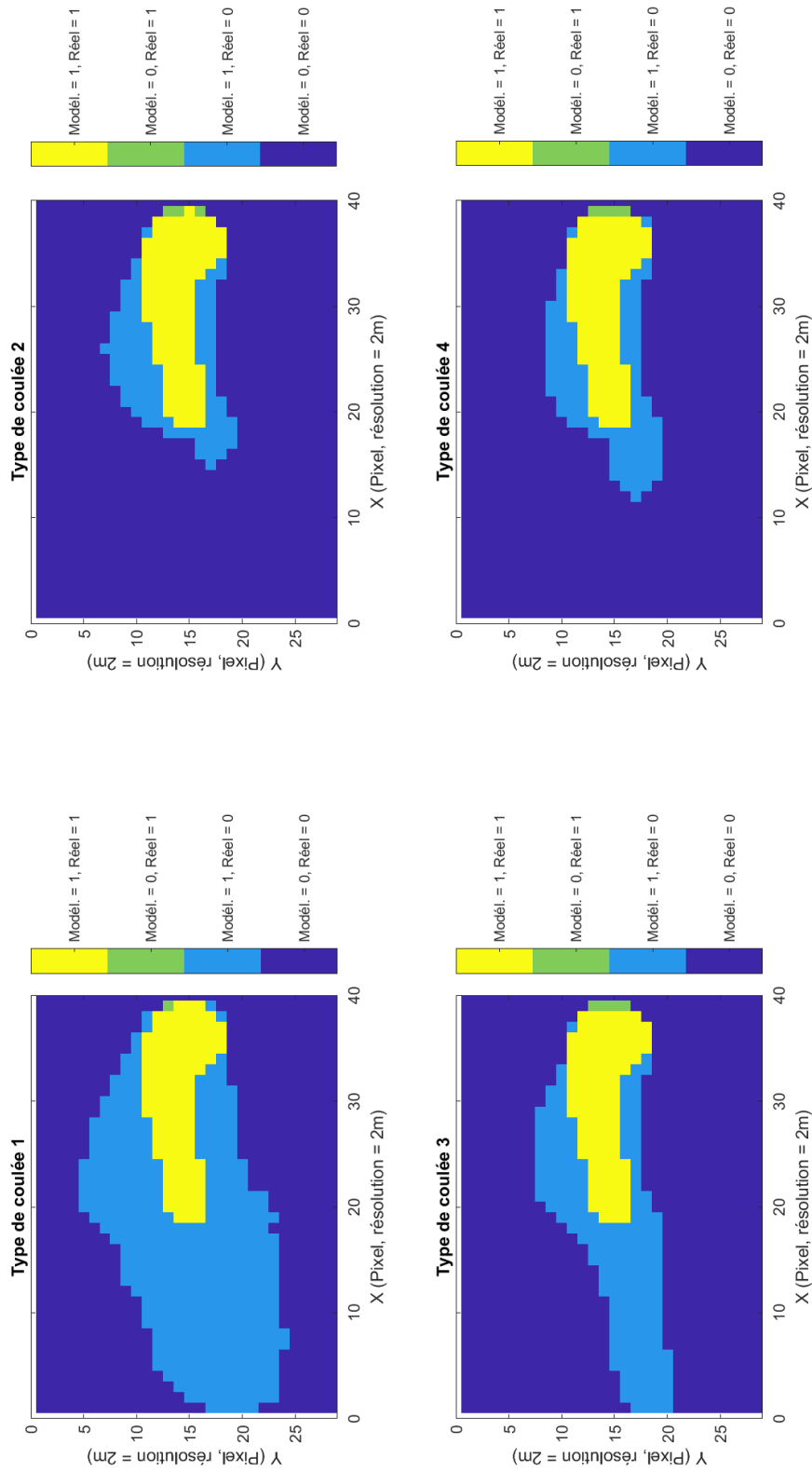


Figure D.11. – Résultats des simulations de SlideForce de l'événement n°11 pour les 4 types de coulées (TC) et comparaison avec l'événement historique.

Numéro d'événement : 12

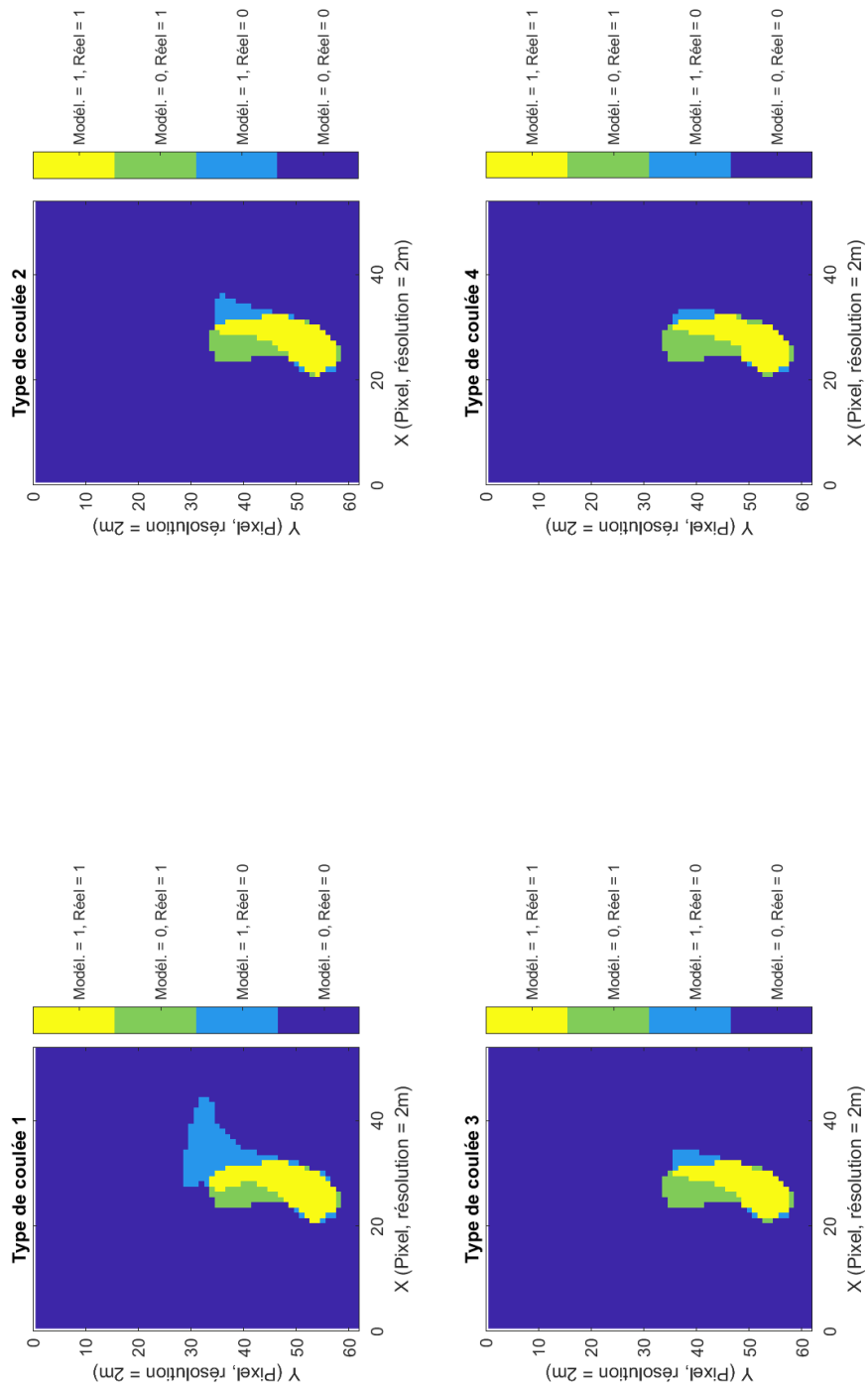


Figure D.12. – Résultats des simulations de SlideForce de l'événement n°12 pour les 4 types de coulées (TC) et comparaison avec l'événement historique.

Numéro d'événement : 13

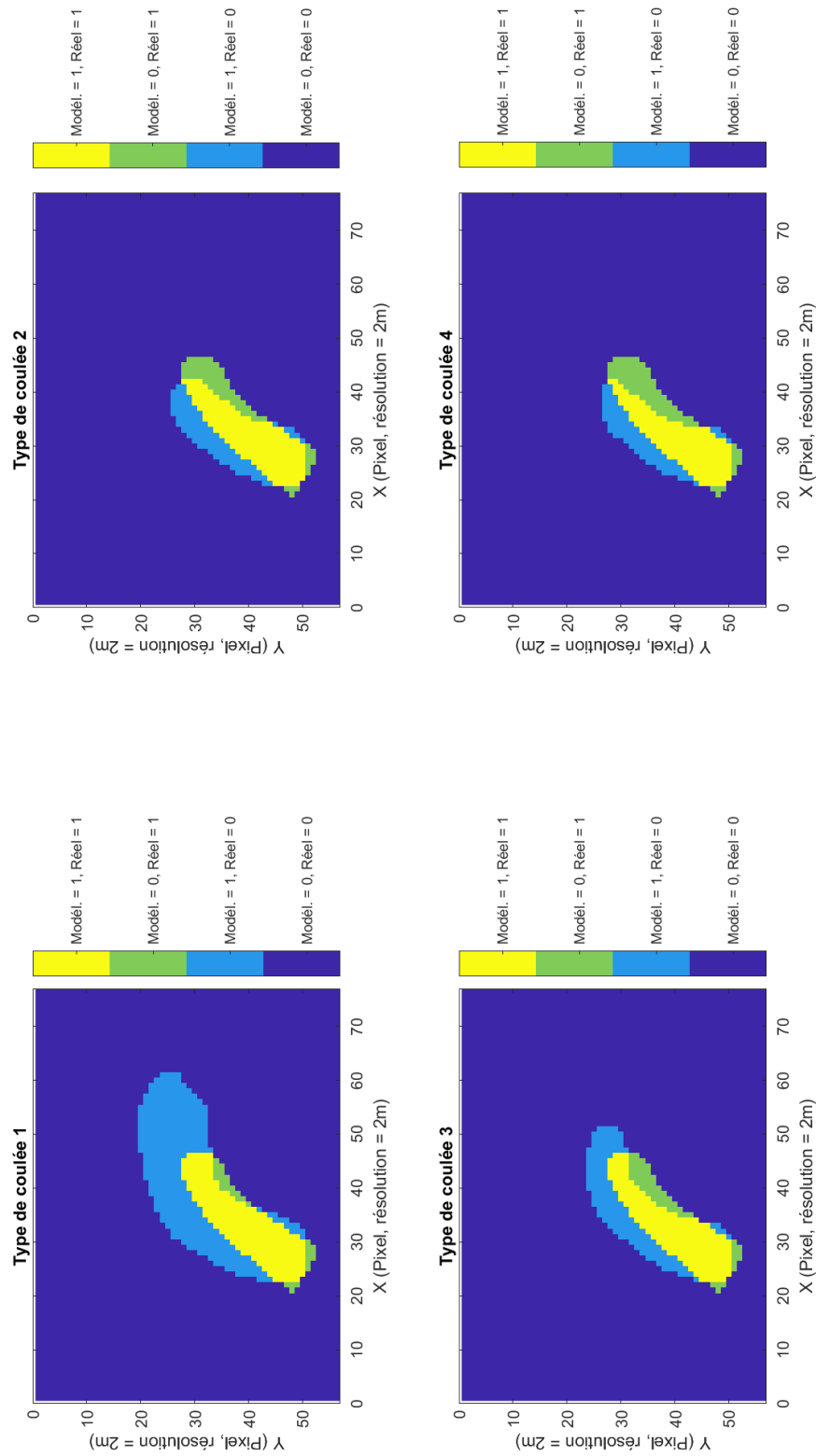


Figure D.13. – Résultats des simulations de SlideForce de l'événement n°13 pour les 4 types de coulées (TC) et comparaison avec l'événement historique.

Numéro d'événement : 14

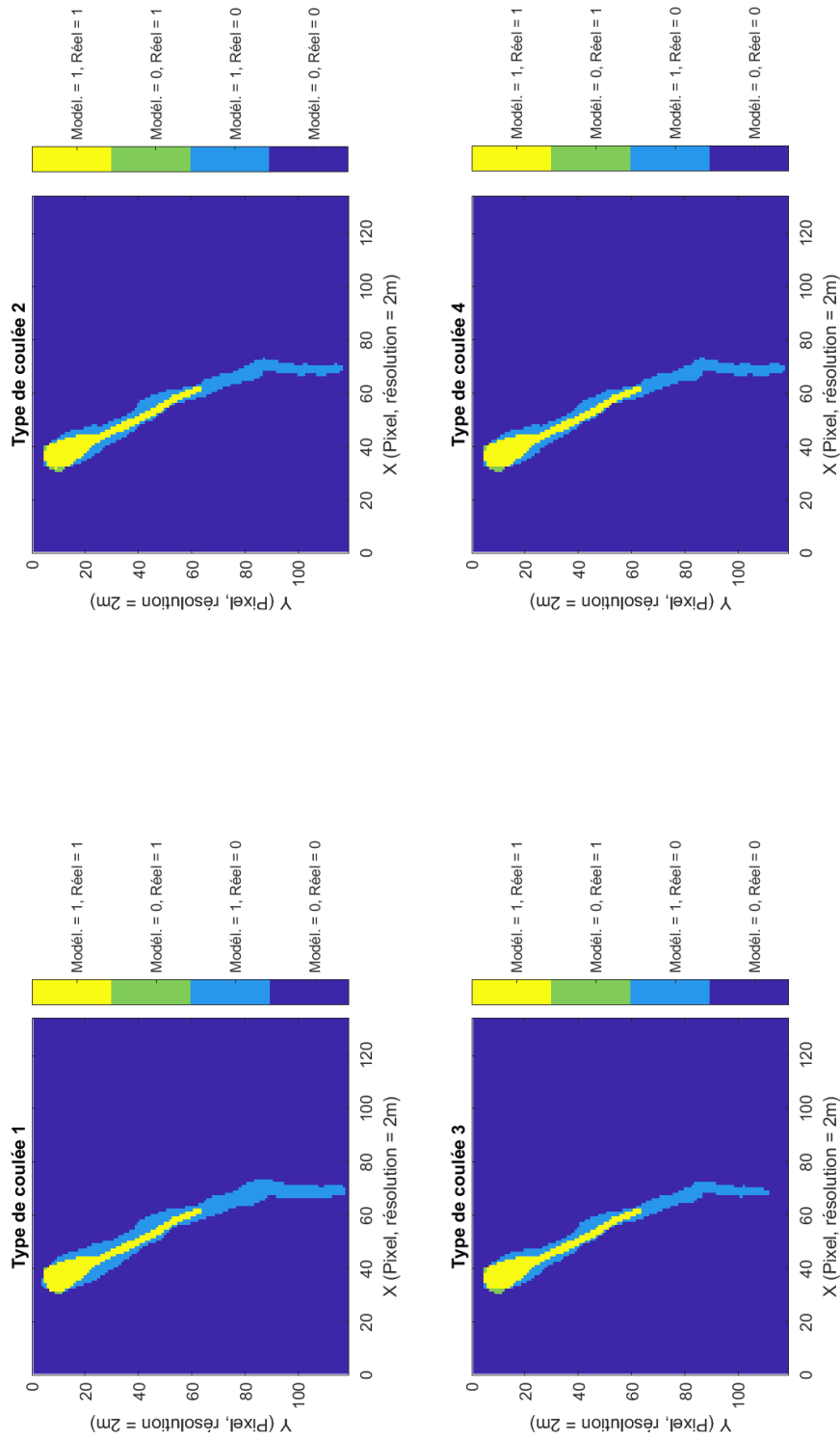


Figure D.14. – Résultats des simulations de SlideForce de l'événement n°14 pour les 4 types de coulées (TC) et comparaison avec l'événement historique.

Numéro d'événement : 15

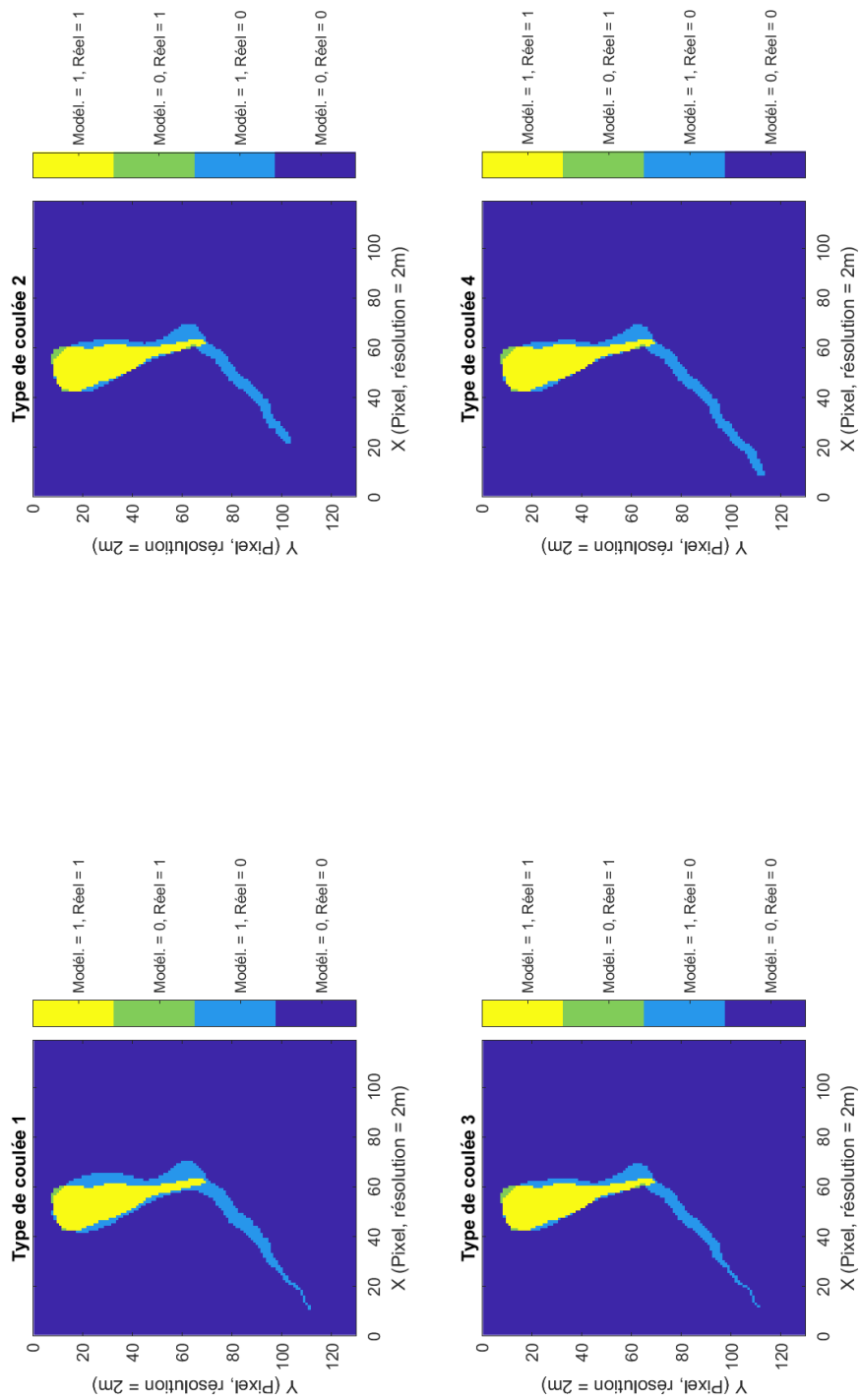


Figure D.15. – Résultats des simulations de SlideForce de l'événement n°15 pour les 4 types de coulées (TC) et comparaison avec l'événement historique.

Numéro d'événement : 16

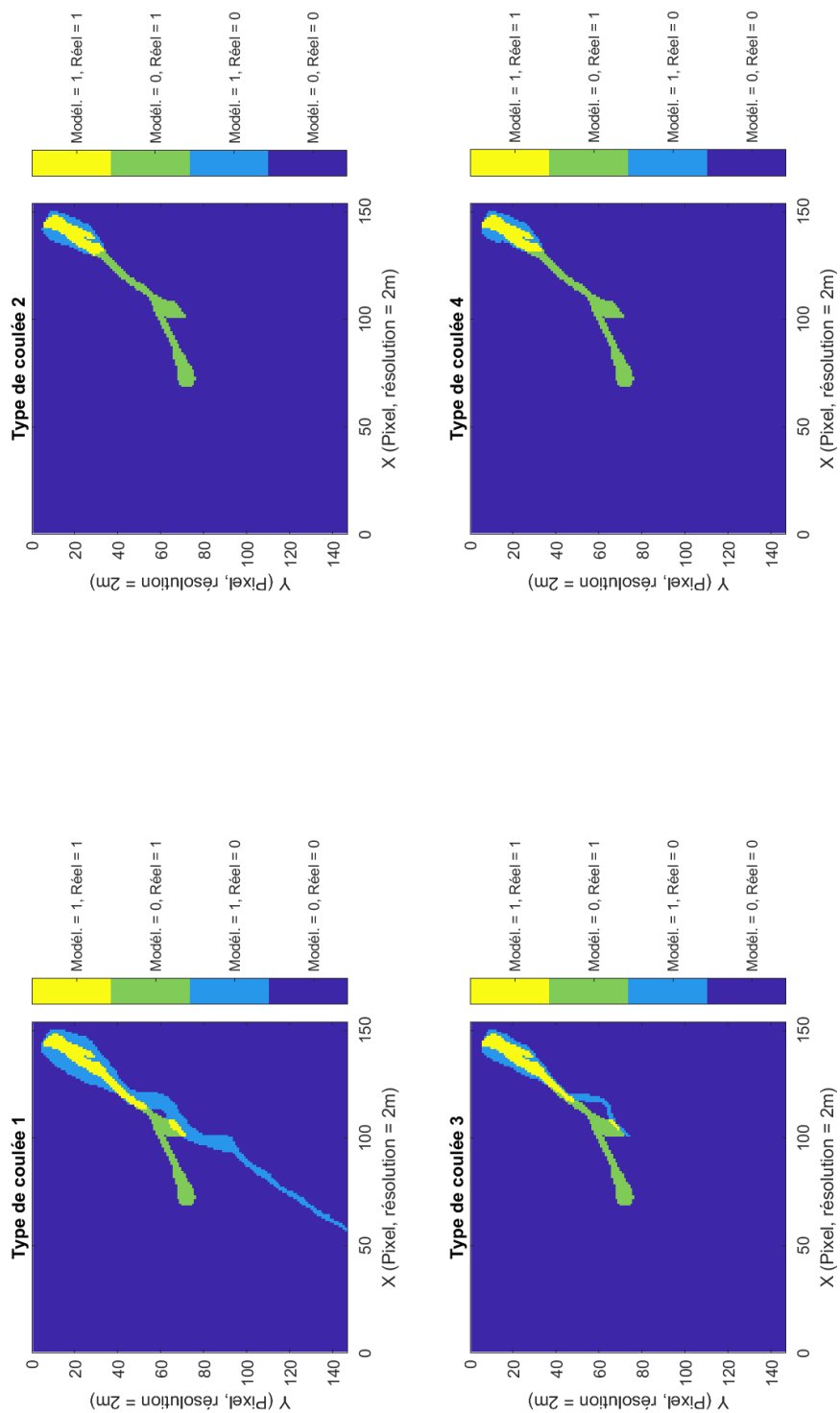


Figure D.16. – Résultats des simulations de SlideForce de l'événement n°16 pour les 4 types de coulées (TC) et comparaison avec l'événement historique.

Numéro d'événement : 17

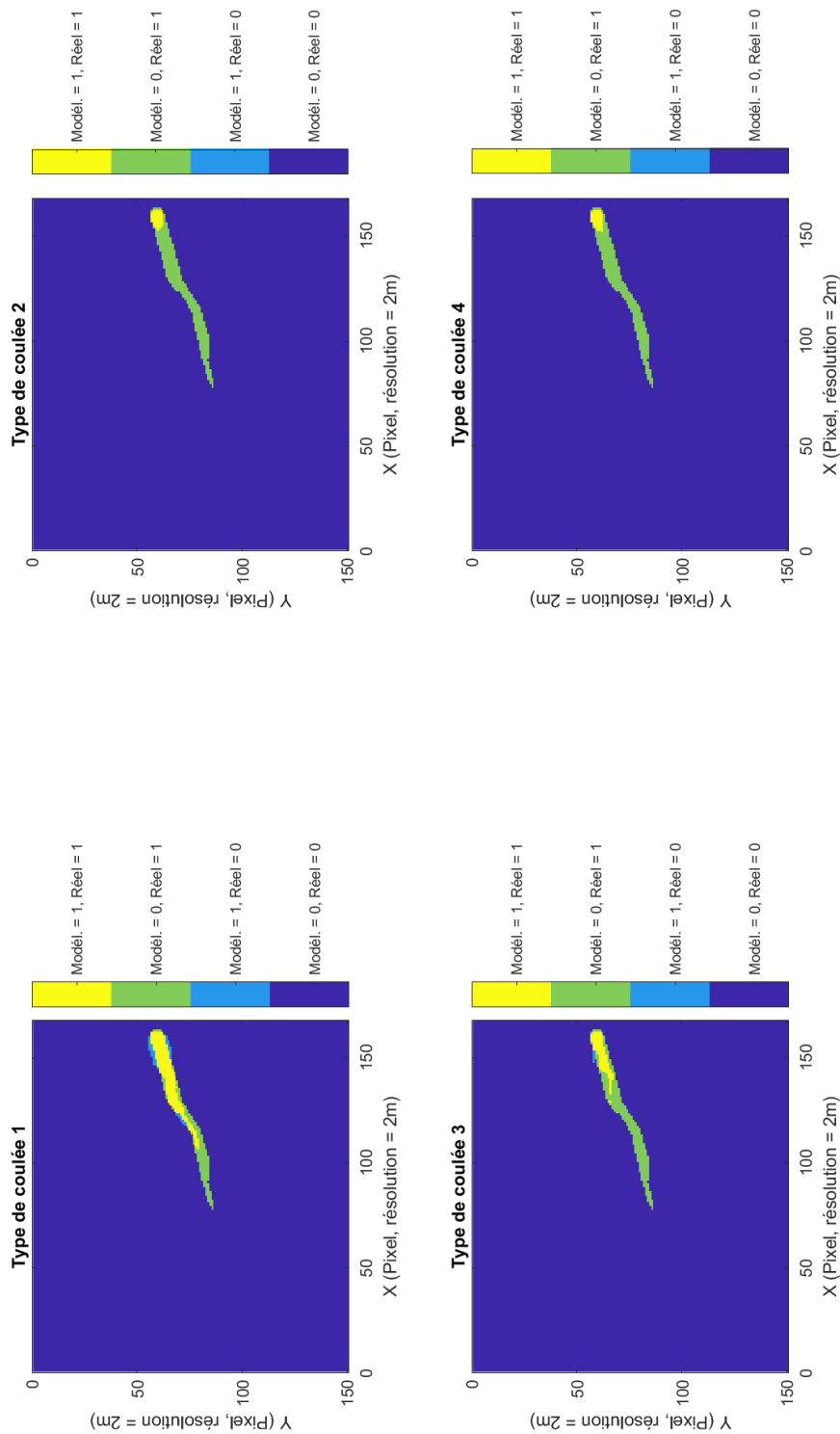


Figure D.17. – Résultats des simulations de SlideForce de l'événement n°17 pour les 4 types de coulées (TC) et comparaison avec l'événement historique.

Numéro d'événement : 18

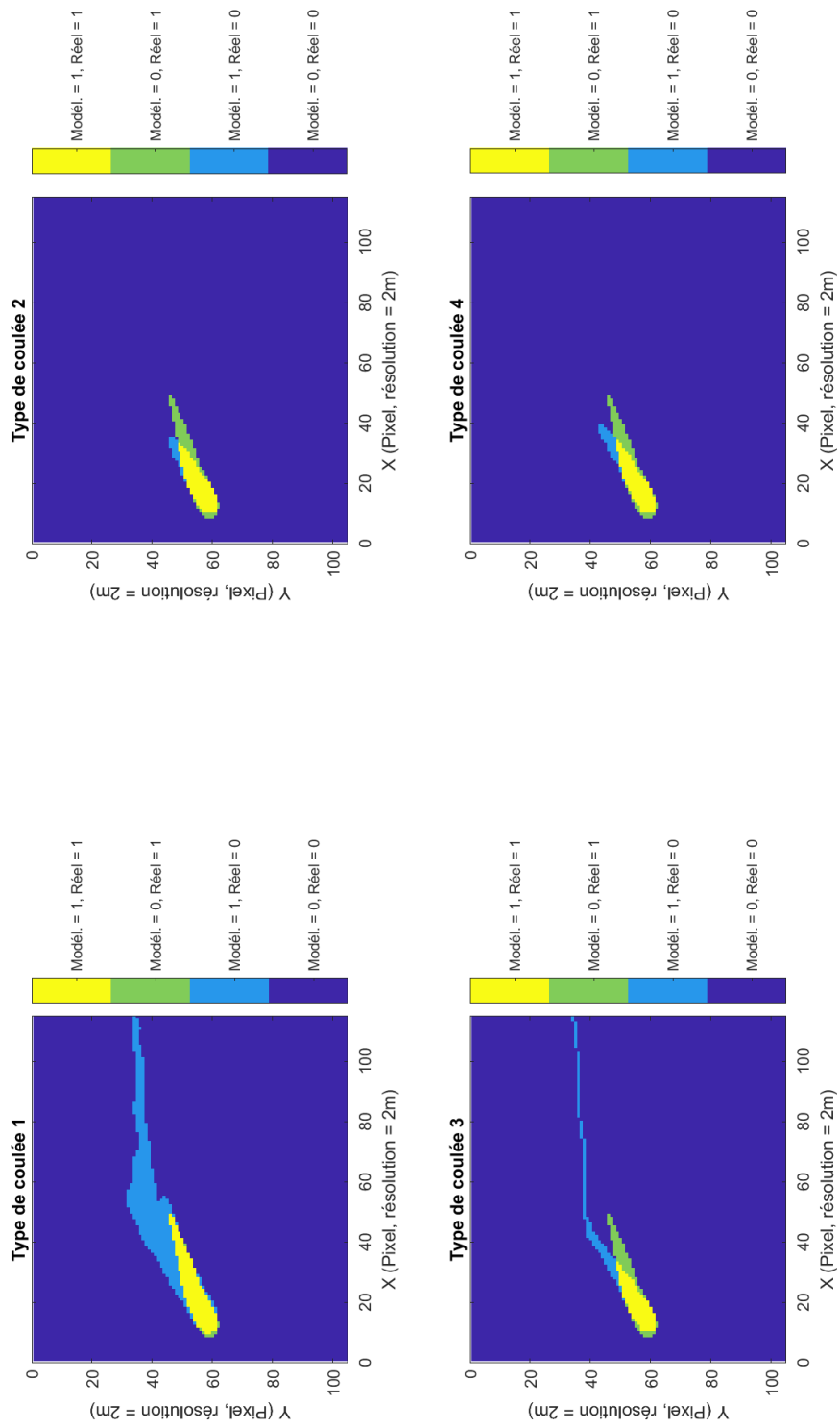


Figure D.18. – Résultats des simulations de SlideForce de l'événement n°18 pour les 4 types de coulées (TC) et comparaison avec l'événement historique.

Numéro d'événement : 19

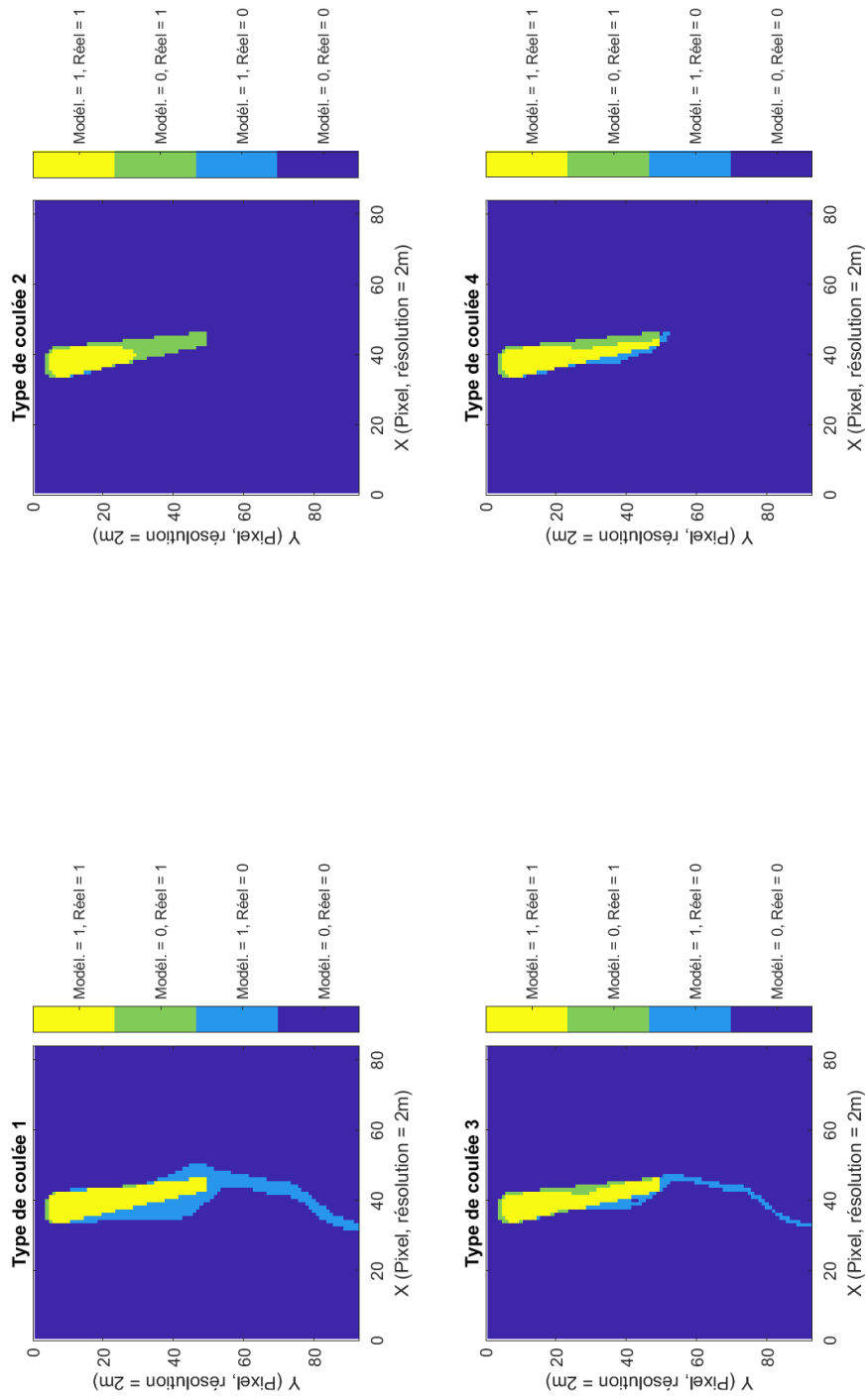


Figure D.19. – Résultats des simulations de SlideForce de l'événement n°19 pour les 4 types de coulées (TC) et comparaison avec l'événement historique.

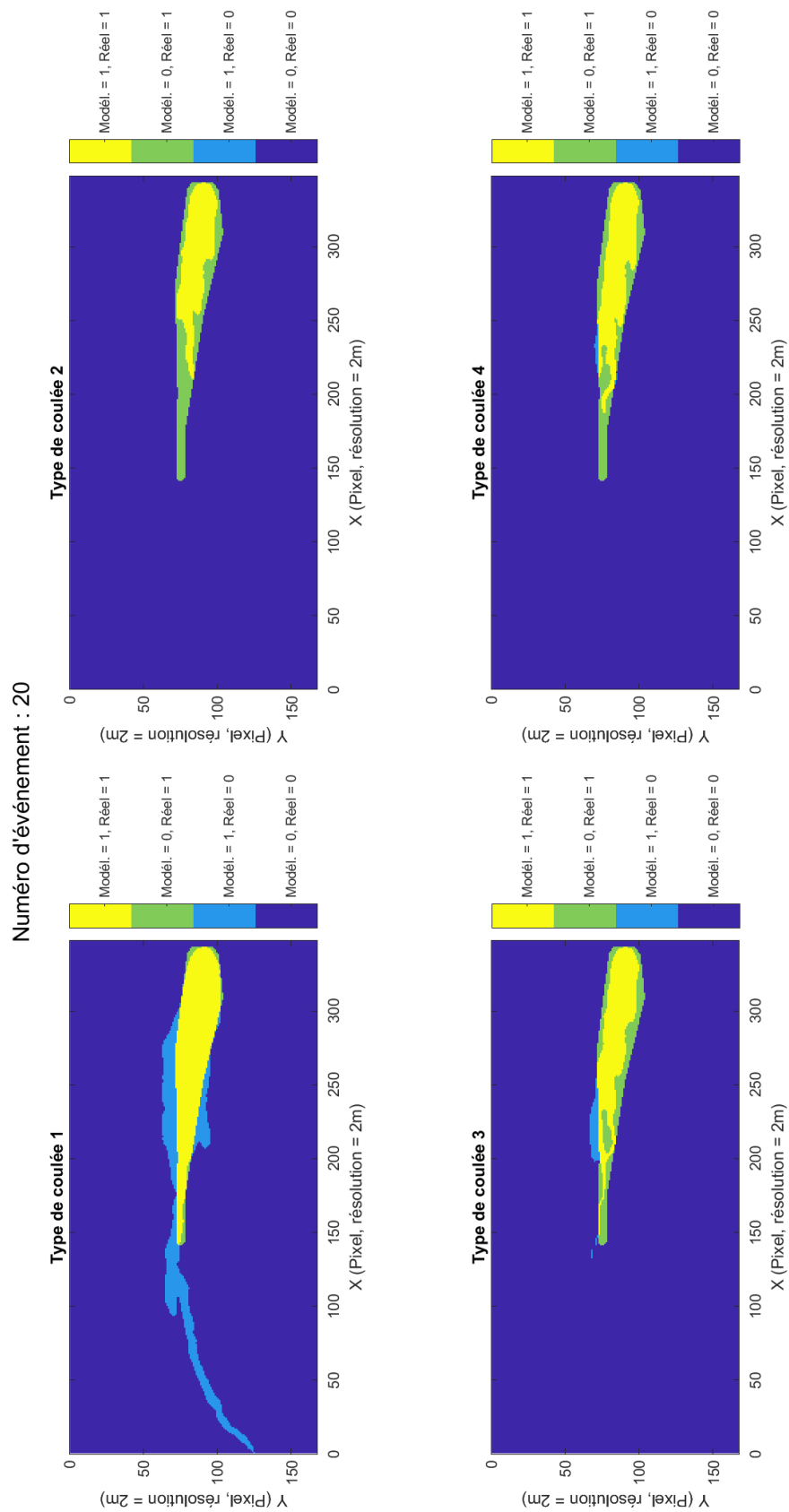


Figure D.20. – Résultats des simulations de SlideForce de l'événement n°20 pour les 4 types de coulées (TC) et comparaison avec l'événement historique.

Numéro d'événement : 21

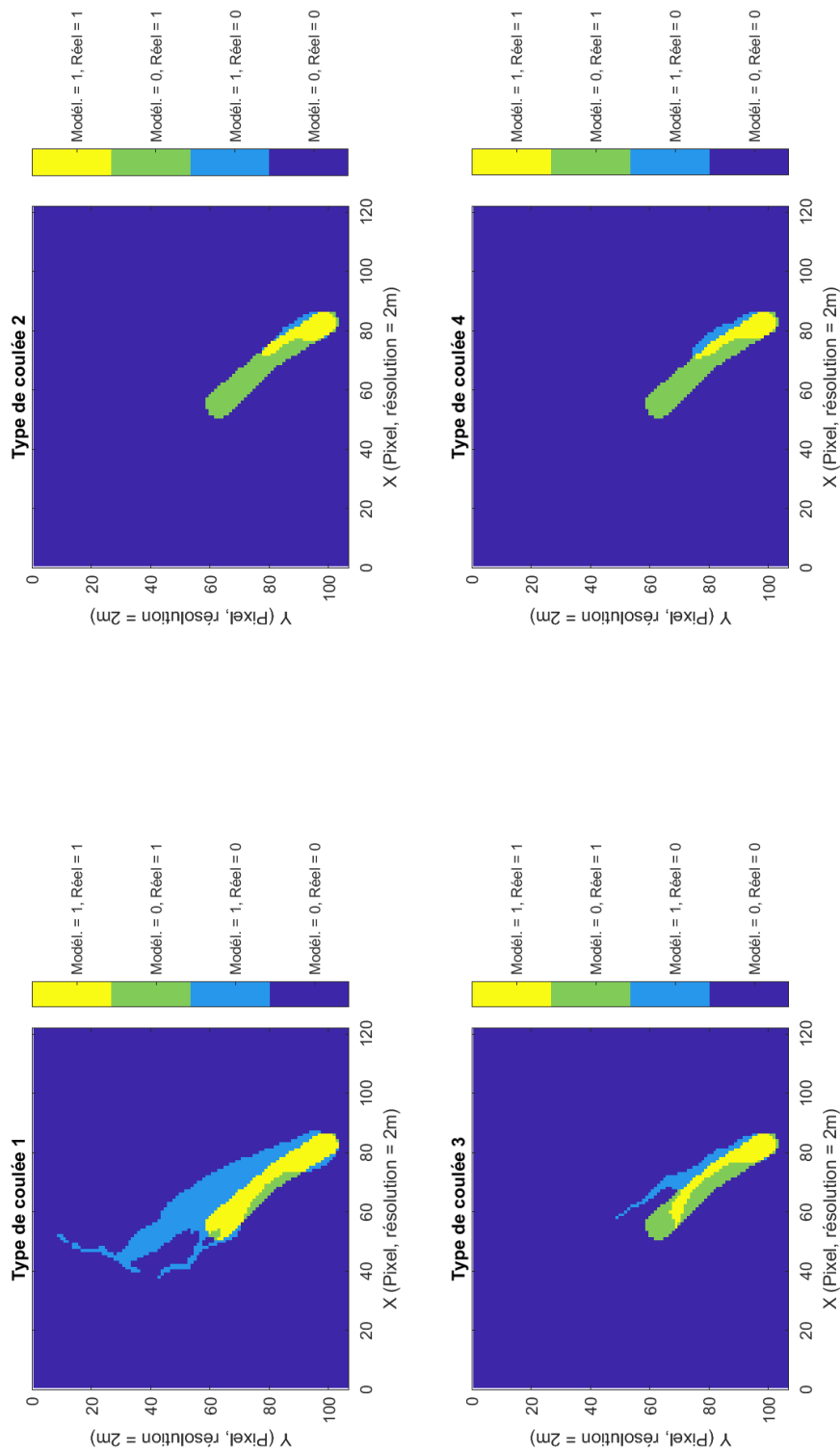


Figure D.21. – Résultats des simulations de SlideForce de l'événement n°21 pour les 4 types de coulées (TC) et comparaison avec l'événement historique.

Numéro d'événement : 22

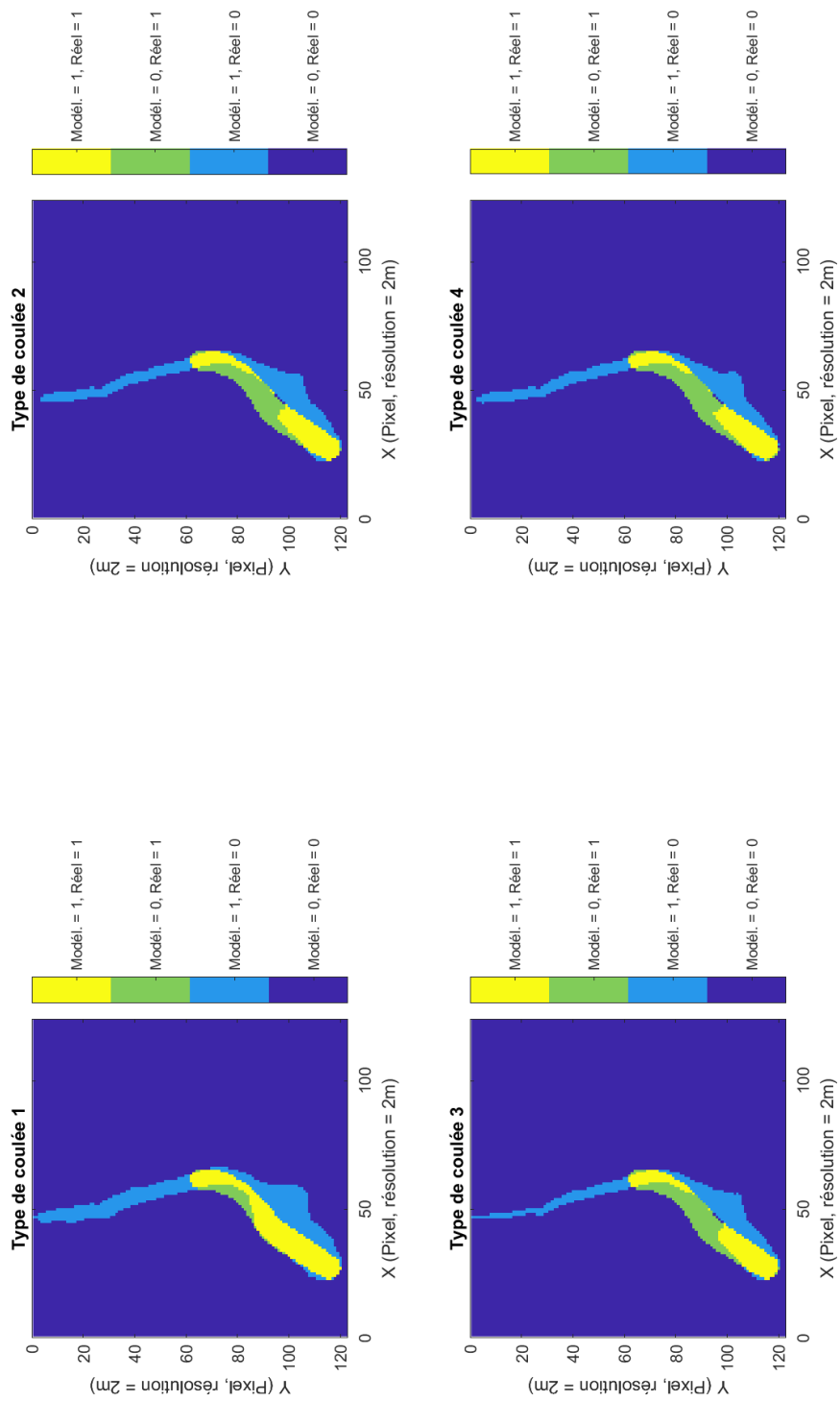


Figure D.22. – Résultats des simulations de SlideForce de l'événement n°22 pour les 4 types de coulées (TC) et comparaison avec l'événement historique.

Numéro d'événement : 23

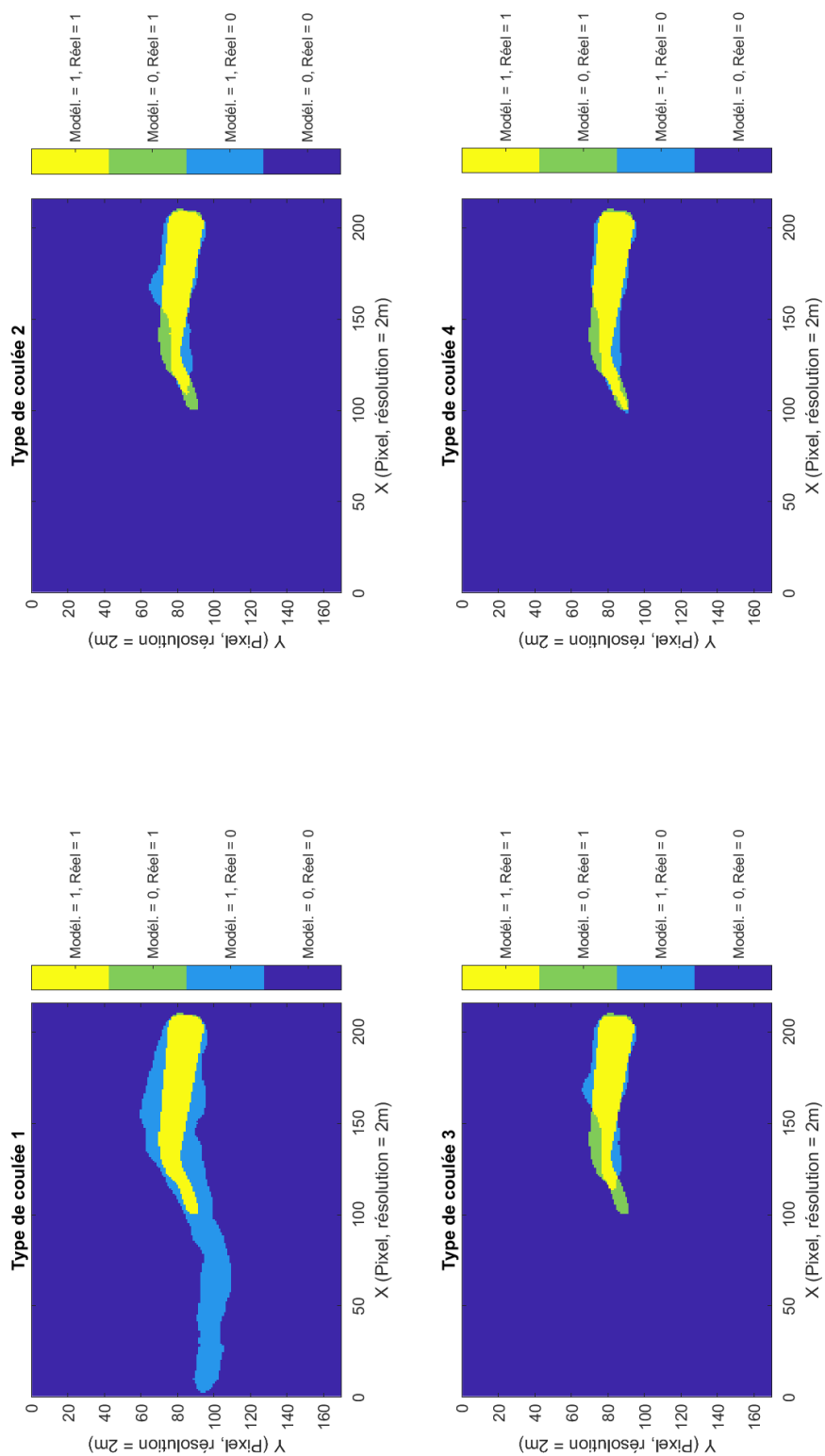


Figure D.23. – Résultats des simulations de SlideForce de l'événement n°23 pour les 4 types de coulées (TC) et comparaison avec l'événement historique.

Numéro d'événement : 24

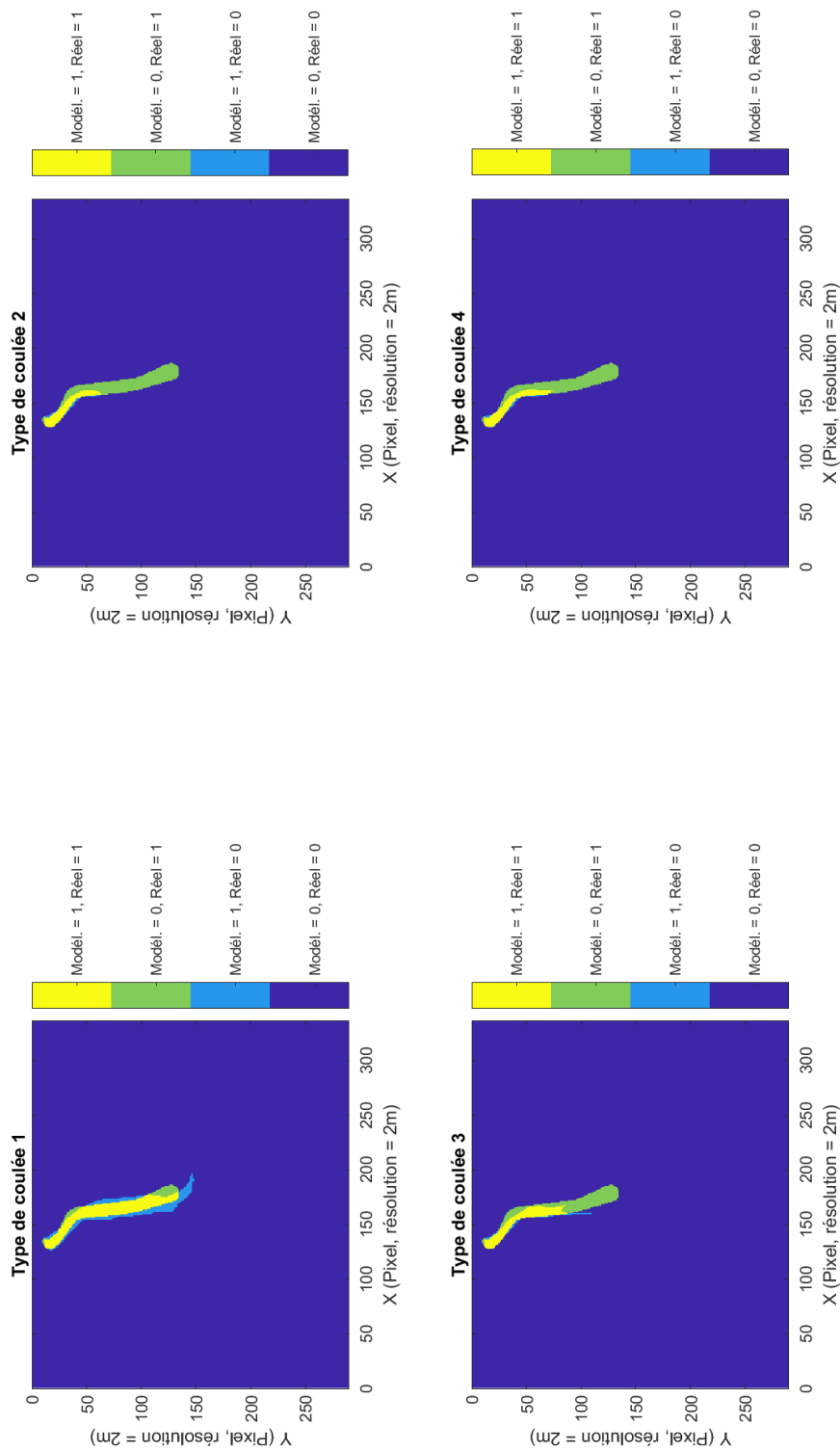


Figure D.24. – Résultats des simulations de SlideForce de l'événement n°24 pour les 4 types de coulées (TC) et comparaison avec l'événement historique.

Numéro d'événement : 25

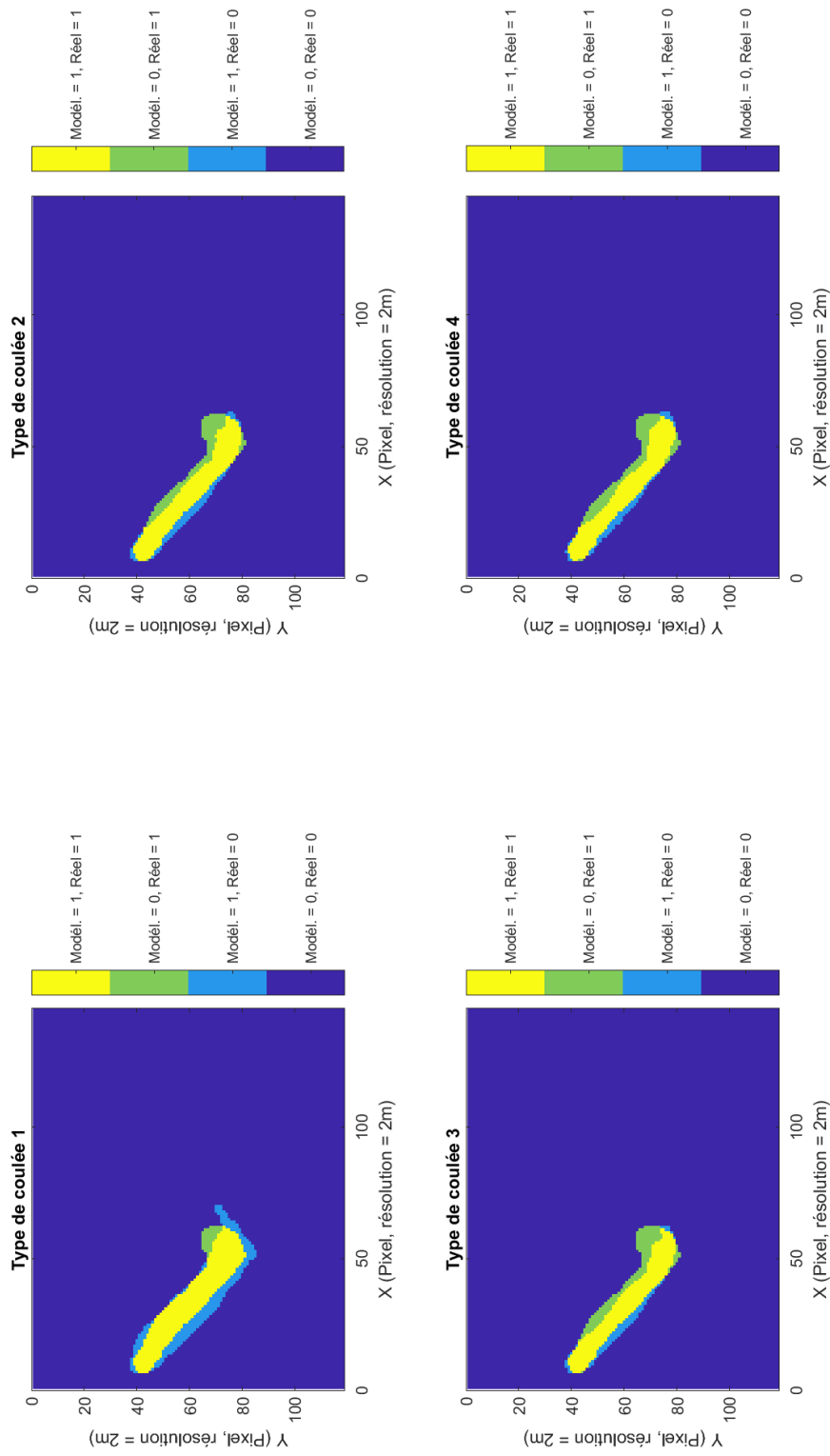


Figure D.25. – Résultats des simulations de SlideForce de l'événement n°25 pour les 4 types de coulées (TC) et comparaison avec l'événement historique.

Numéro d'événement : 26

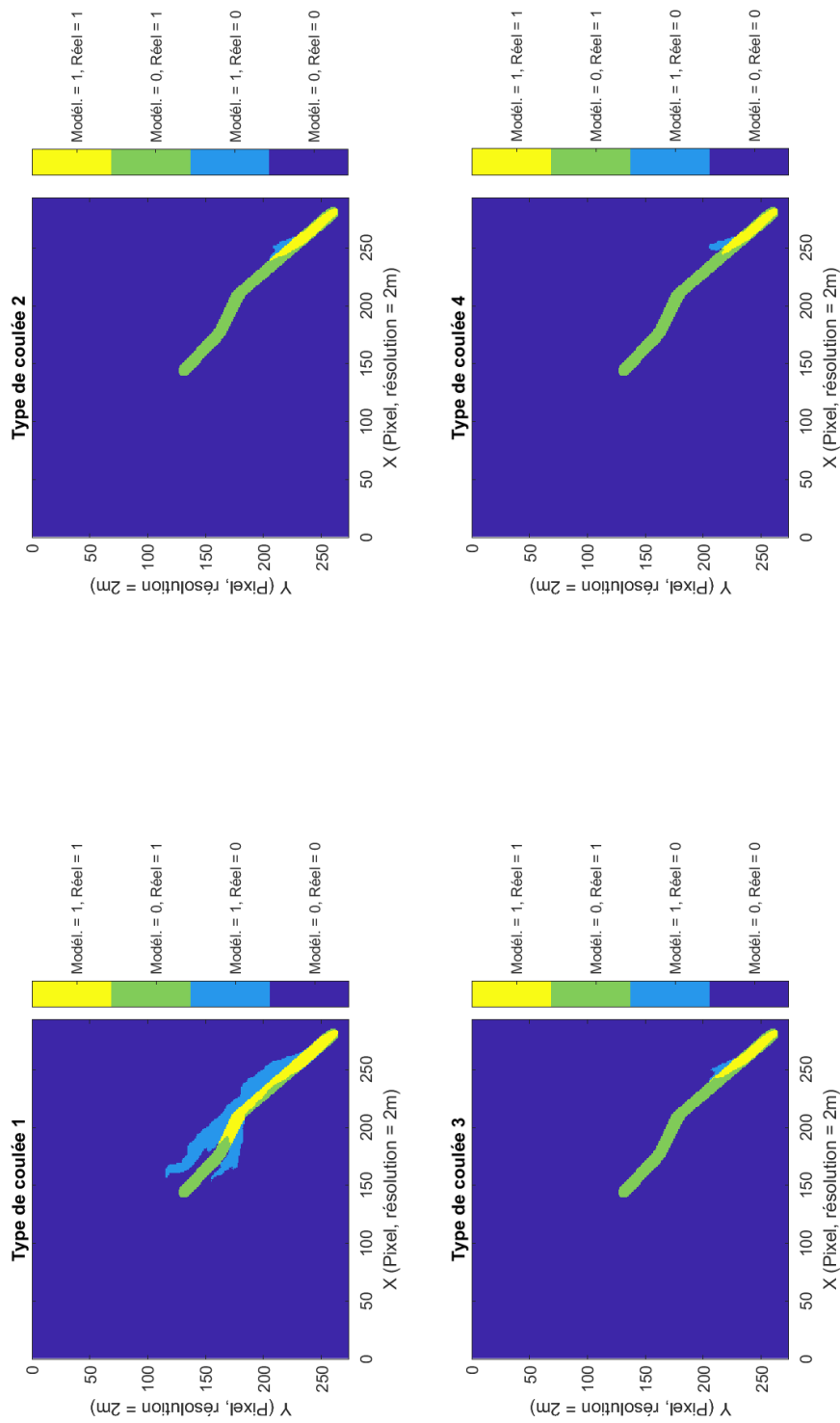


Figure D.26. – Résultats des simulations de SlideForce de l'événement n°26 pour les 4 types de coulées (TC) et comparaison avec l'événement historique.

Numéro d'événement : 27

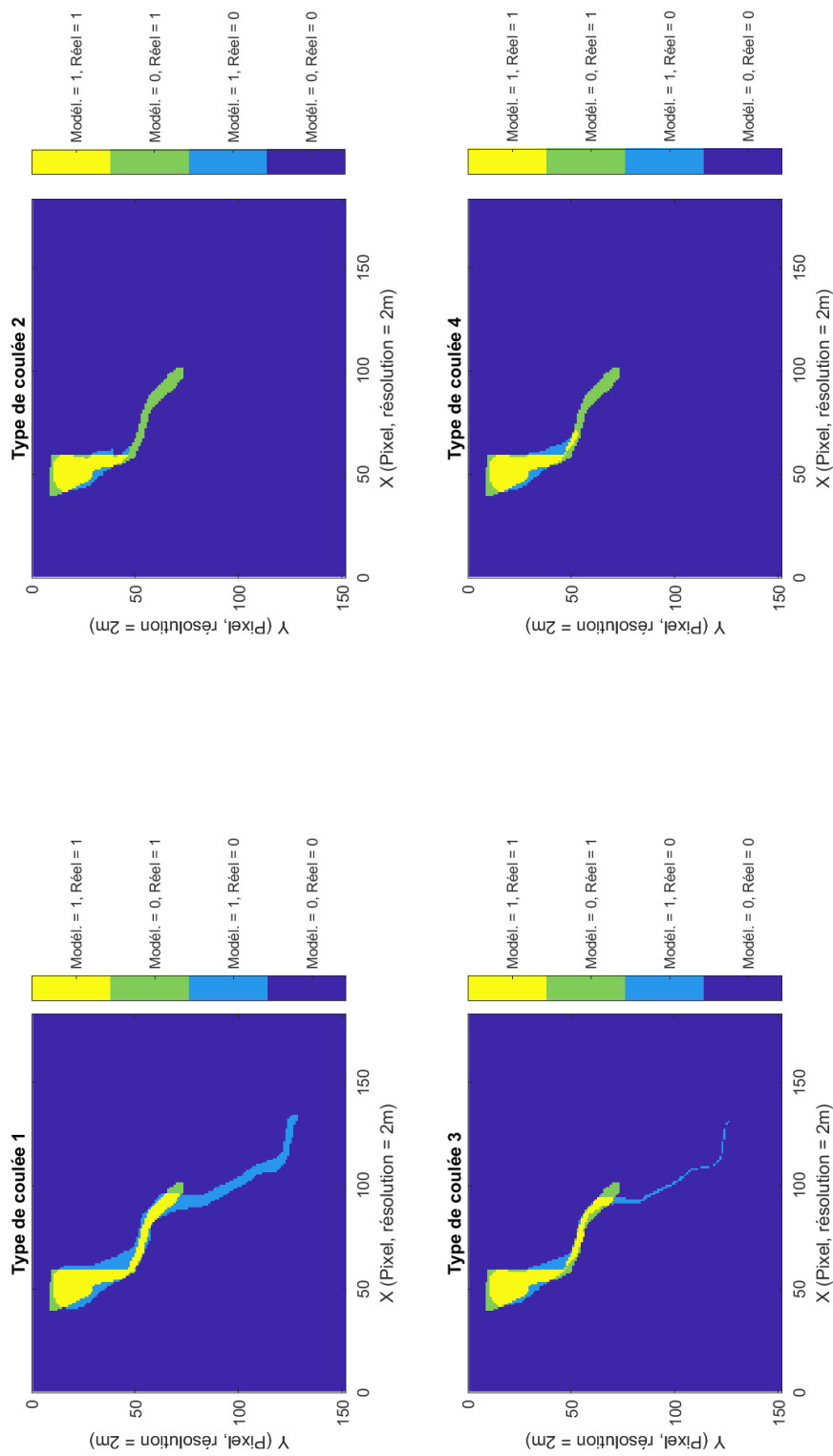


Figure D.27. – Résultats des simulations de SlideForce de l'événement n°27 pour les 4 types de coulées (TC) et comparaison avec l'événement historique.

Numéro d'événement : 28

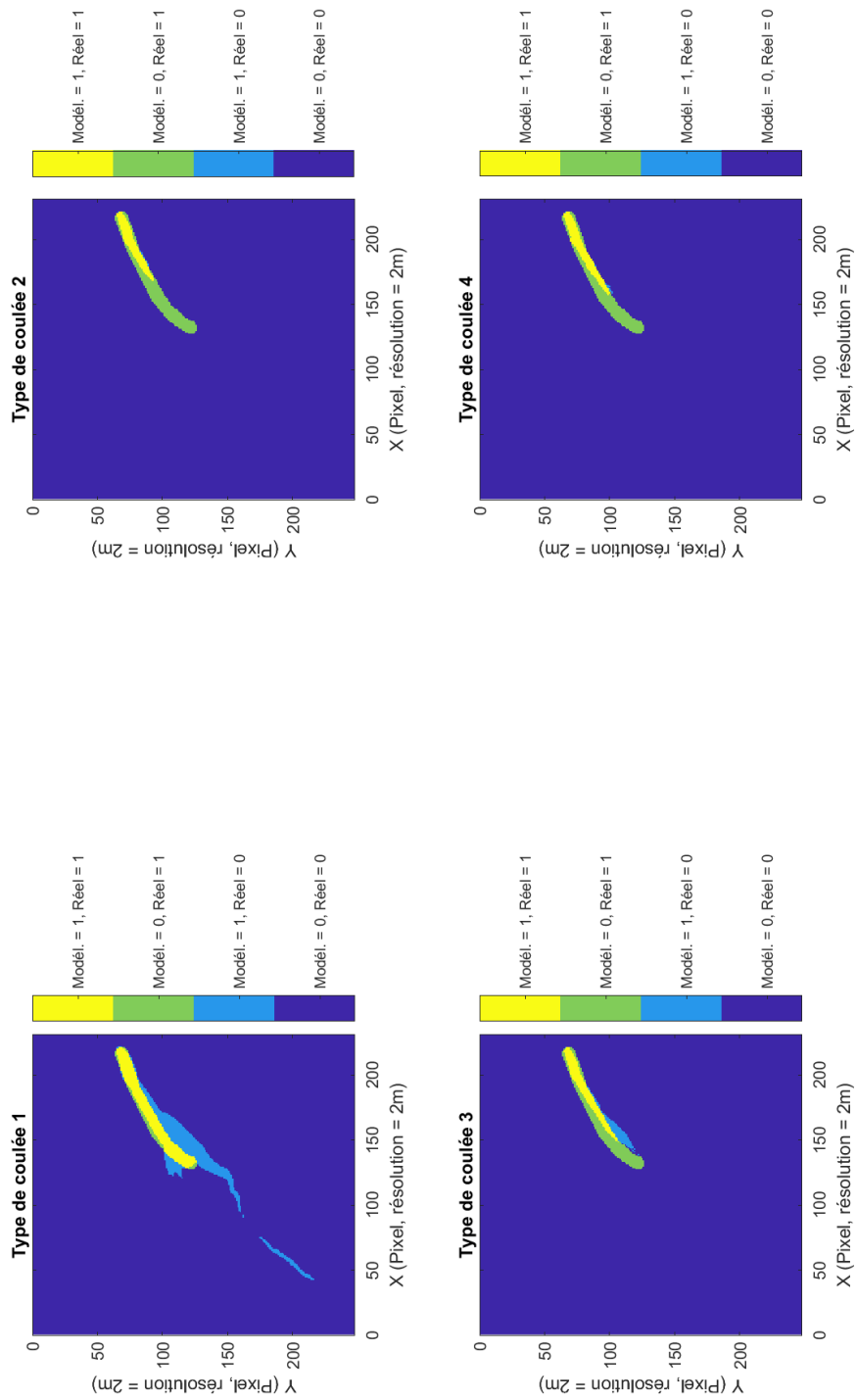


Figure D.28. – Résultats des simulations de SlideForce de l'événement n°28 pour les 4 types de coulées (TC) et comparaison avec l'événement historique.