



Ingénieurs-conseils

Étude des risques hydrologiques
Risque d'avalanches et onde de rupture
Projet d'aménagement du lac de Vernant
(Station de Flaine, communes de Magland et Arâches,
Haute-Savoie)

1^{re} version : octobre 2012

2^e version : février 2021

3^e version : août 2024

mise à jour : mars 2025

complément d'étude : janvier 2026

Table des matières

1	Discussion	4
1.1	Points techniques	4
1.2	Hypothèses de la modélisation	6
1.3	Résultats des modélisations	7
2	Synthèse	9
A	Résultats supplémentaires	10

Objet de l'étude

LE Syndicat Intercommunal de Flaine veut connaître le risque hydraulique encouru par le projet d'extension de la retenue de Vernant. L'aménagement est notamment soumis à un risque d'avalanche (emprises CLPA n^{os} 22 et 23). Les avalanches peuvent entrer dans la retenue et causer la formation d'une vague d'impulsion, qui peut submerger la digue.

Une séance s'est tenue en visioconférence le jeudi 15 janvier 2026 en présence de MM. Patrice Bonnard (représentant le maître d'ouvrage), Alexandre Liotard et Nicolas Romieux (maître d'œuvre ABEST), et Nicolas Bai (service instructeur, DREAL) sur les conséquences hydrauliques d'une vague d'impulsion dans la retenue de Vernant. Cette séance visait à éclaircir certains aspects techniques de l'étude conduite en 2024 et 2025. La question centrale pour le service instructeur est de comprendre la portée et les limites des calculs effectués pour estimer les caractéristiques des vagues d'impulsion dues à des avalanches.

À la suite de cette séance, le maître d'ouvrage a demandé à Toraval un complément d'études pour mieux cerner les incertitudes dans le calcul du volume d'eau surversé en cas d'avalanche tricentennale.

La présente étude reprend les éléments techniques discutés lors de la séance du 15 janvier 2026 et fournit le résultat des calculs complémentaires.

Discussion

1.1 Points techniques

Les points suivants ont été abordés durant la séance du 15 janvier 2026 :

- Pour les las d’accumulation, on distingue deux types de vague :
 - Une vague d’impulsion est un mouvement d’eau affectant toute la hauteur d’eau d’une retenue, avec un fort transport de masse et d’énergie.
 - Elle se distingue de la houle qui est constituée de vagues de surface dues au vent avec un transport d’énergie mais sans grand transport de masse.

Dans le cas de la vague d’impulsion, c’est l’écoulement entrant dans l’eau qui communique une partie de sa quantité de mouvement à l’eau un peu comme un piston poussant de l’eau. Dans le cas de la houle, c’est le frottement de l’air à la surface de l’eau qui crée des intumescences dont l’amplitude peut croître si la distance (appelée *fetch*) le long de laquelle s’exerce le vent (sans rencontrer d’obstacle) est suffisamment grande.

- En ingénierie, les deux types de vague ont été étudiés par des méthodes différentes (même si leur principe demeure proche):
 - Les caractéristiques de la houle ont été principalement étudiées en corrélant la hauteur des vagues et la vitesse du vent. Les mesures ont été obtenues le long de côtes de grandes étendues maritimes (principalement, Atlantique nord et mer du Nord).
 - Les caractéristiques des vagues d’impulsion ont principalement été étudiées en corrélant des données de laboratoire. Des essais à échelle réduite ont été réalisés en laissant glisser une masse rigide ou granulaire le long d’un plan incliné ; cette masse pénètre une étendue d’eau et crée une vague d’impulsion. Les caractéristiques des vagues sont corrélées à la vitesse de la masse, sa masse volumique, l’angle du plan incliné, la hauteur d’eau, etc.

Pour les deux types de vague, il existe des guides techniques à l’usage des ingénieurs pour calculer les caractéristiques des vagues. Dans le cas des retenue de montagne, les recommandations tirées des études de la houle ne sont pas utilisables, car elles sont valables pour des fetchs de plusieurs kilomètres. Pour les vagues d’impulsion dues à des avalanches, le guide technique du VAW¹ a largement été utilisé, mais il conduit à sur-

1. La première édition date de 2009: Heller, V., W.H. Hager, and H.-E. Minor, *Landslide generated impulse*

estimer considérablement la hauteur des vagues². De plus, le nombre de paramètres et leur plage de variation sont tellement grands que l'incertitude sur les hauteurs de vague – initialement estimée à $\pm 30\%$ – s'est révélée bien plus grande que prévue³. Il existe des alternatives aux méthodes empiriques qui font appel aux simulations numériques. La lourdeur des calculs et le coût des études ont longtemps limité l'utilisation des modèles numériques aux grands barrages. Les progrès informatiques ont permis d'étendre l'utilisation de ces outils à des ouvrages hydrauliques plus communs.

- Pour étudier les vagues d'impulsion sur le lac de Vernant, nous avons employé la méthode du VAW pour les études de 2012 à 2021. Pour la mise à jour de 2024, nous avons proposé au maître d'œuvre de procéder à un calcul numérique plus précis et plus transparent dans ses hypothèses que les méthodes empiriques par corrélation. Le code numérique comporte deux parties :
 - le code AVAC, qui est un code de simulation des avalanches fondé sur les équations de Saint-Venant⁴. Le comportement mécanique est décrit par une loi de frottement empirique de type Voellmy ;
 - le code de Masha Berger et Randall LeVeque⁵ fondé sur les équations de Serre–Green–Naghdi permet de calculer toutes sortes de vague dans le domaine linéaire ou non linéaire.
- Aussi sophistiqués soient les modèles numériques et aussi réalistes soient leurs résultats, ces modèles numériques reposent sur des hypothèses fortes. Une difficulté supplémentaire est que les paramètres du problème sont nombreux, et les incertitudes sur la valeur de ces paramètres ou sur les hypothèses de calcul sont également grandes. Les modèles numériques sont plus précis que les méthodes empiriques et sont plus fiables, mais ne permettent pas de lever toutes les indéterminations. Deux attitudes sont possibles :
 - on cherche à calculer la borne supérieure des phénomènes et, dans ce cas-ci, on prend la valeur la plus défavorable des paramètres ;
 - on cherche à calculer le phénomène moyen le plus vraisemblable et, dans ce cas-là, on prend la valeur la plus vraisemblable de chaque paramètre.

Pour donner un exemple en hydrologie avec l'estimation du débit décennal, les méthodes par enveloppe constituent un exemple de la première approche, et la méthode Crupédix un exemple de la seconde approche. Aucune approche n'est meilleure que l'autre. Il s'agit surtout de la sensibilité et de la philosophie d'approche de chaque service instructeur qui tend à fixer l'usage.

- Pour l'étude de 2024–25, c'est la première approche qui avait été mise en œuvre. Le service instructeur serait intéressé à voir ce que donne la seconde approche.

waves in reservoirs – Basics and computation, coord. par R. Boes, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, Bern, 2009. Une deuxième édition revue et corrigée a été publiée en 2019 : Evers, F.M., V. Heller, H. Fuchs, W.H. Hager, and R.M. Boes, *Landslide-generated Impulse Waves in Reservoirs – Basics and Computation*, VAW-Mitteilungen 254, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (ETHZ/VAW), Bern, 2019.

2. Zitti, G., C. Ancey, M. Postacchini, and M. Brocchini, Impulse waves generated by snow avalanches: Momentum and energy transfer to the water body, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, **121**, 2399–2423, 2016.

3. Heller, V., and G. Ruffini, A critical review about generic subaerial landslide-tsunami experiments and options for a needed step change, *Earth-Science Reviews*, **242**, 104459, 2023.

4. Ancey, C., Modélisation des avalanches denses, approches théorique et numérique, *La Houille Blanche*, **5–6**, 25–39, 1994.

5. Berger, M.J., and R.J. LeVeque, Implicit adaptive mesh refinement for dispersive tsunami propagation, *SIAM Journal on Scientific Computing*, **46**, B554–B578, 2024.

1.2 Hypothèses de la modélisation

Les hypothèses fortes de la modélisation avaient été les suivantes dans les rapports de 2024 et 2025 :

1. Frottement de la neige : les paramètres de la loi de Voellmy sont

$$\mu = 0,20 \text{ et } \xi = 1400 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2},$$

ce qui correspond à une avalanche de neige sèche se déplaçant à grande vitesse. Nous n'avons pas considéré une avalanche de neige entrant lentement dans la retenue, car la vitesse de l'avalanche serait faible et donc la vague d'impulsion serait de petites dimensions. Une telle avalanche serait capable de vider une grande partie du lac, mais avec une cinétique lente. Quoique le site se situe dans le domaine de moyenne montagne et donc soumis à une modification importante de l'enneigement du fait du changement climatique, nous considérons qu'il existera toujours des conditions très critiques avec le passage de perturbations atlantiques actives (comme en février 1999) avec de fortes chutes de neige et des conditions propices aux avalanches de neige sèche. C'est ce qui est observé dans les massifs montagnes dans des régions plus chaudes comme en Turquie.

2. Le lac de Vernant peut être atteint par des avalanches issues de différents panneaux. Dans la plupart des cas, seuls quelques panneaux se déclenchent, mais en situations de forte instabilité du manteau neigeux, un déclenchement simultané ou quasi-simultané de plusieurs panneaux est vraisemblable. Dans les rapports de 2024–2025, nous avons considéré deux gros systèmes :

- (1) crête des Grands Vans, et
- (2) pointe des Grands Vans.

Les calculs ont été effectués pour deux scénarios de départ, chacun caractérisé par une zone de départ distincte. L'angle d'incidence des avalanches par rapport à axe est-ouest est différent, ce qui explique que la direction des vagues soit différente. Le scénario n° 2 s'est révélé le plus défavorable, car il crée des vagues en direction de la digue.

3. Niveau d'eau : la cote d'eau est fixée à

$$z_{max} = 1840,0 \text{ m.}$$

La surface du lac est supposée déglacée. La concomitance d'un scénario « fortes chutes de neige et neige froide » et d'un scénario « lac plein et déglacé » est peu probable, mais en l'absence d'indications permettant d'orienter les calculs, on garde cette hypothèse.

4. Le transfert de masse et de quantité de mouvement est le problème central de la modélisation, et c'est celui qui est le plus entaché d'incertitudes. Lorsque l'avalanche entre dans le lac, elle transmet sa quantité de mouvement à l'eau. Une partie de la neige fond, mais sur des temps courts et compte tenu de l'arrivée massive de neige, la fusion est relativement faible. Prise individuellement, une particule qui entre dans de l'eau transmet sa quantité de mouvement, mais une partie de celle-ci est aussitôt dissipée par frottement. Dans le cas d'un flux continu de particules, on ne sait pas comment se passe la dissipation d'énergie. On a supposé qu'il n'y avait pas de dissipation à l'entrée de la neige dans l'eau. Les principes fondamentaux de la mécanique énoncent qu'il y a conservation du flux de masse à la frontière avalanche/lac :

$$\rho h v = \rho_a h_a v_a,$$

et du flux quantité de mouvement

$$\rho h v^2 = \rho_a h_a v_a^2,$$

avec ρ : masse volumique de l'eau, v vitesse de l'eau (moyenne sur la hauteur) et h hauteur d'eau. Les symboles avec l'indice a correspondent aux variables de l'avalanche. Le transfert de quantité de mouvement et de masse est donc contrôlé par le paramètre ρ_a/ρ (c'est-à-dire la densité de la neige). Dans les rapports de 2024–2025, nous avons pris une densité :

$$\frac{\rho_a}{\rho} = 0,4.$$

C'est la borne supérieure de la densité pour des avalanches coulantes. On peut pointer la faible vraisemblance d'une telle densité avec l'hypothèse retenue d'une avalanche de neige sèche rapide, *a fortiori* si l'on ignore toute dissipation d'énergie à l'impact dans le lac.

1.3 Résultats des modélisations

Nous avons réalisé une série de simulations en faisant varier la densité entre 0,10 (borne inférieure) et 0,4 (borne supérieure). Pour les calculs d'impact de neige sèche, on fait souvent l'hypothèse⁶ $\rho = 300 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ pour le calcul à l'impact (contre un obstacle), mais il est probable que dans le cas présent, la masse volumique de la neige se situe à une valeur bien inférieure ; en effet, dans la méthode Salm, l'obstacle est rigide, et il y a donc une forte compression de la neige à l'impact alors que dans le cas de l'entrée de l'avalanche dans un lac, la surface de l'eau se déforme et la compaction de la neige se produit en même temps que la neige pénètre dans l'eau. Une valeur $\rho = 200 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ semble réaliste.

La figure 1.1 montre une synthèse des résultats ; voir également l'annexe A. Cette figure confirme :

- la forte dépendance des résultats par rapport à la masse volumique de l'avalanche ;
- la surverse quelle que soit la masse volumique de l'avalanche ;
- un rapport de transfert d'énergie η (rapport entre l'énergie totale de la vague et l'énergie de l'avalanche) supérieur à 0,2.

En résumé, si l'on prend une masse volumique à l'impact de $\rho = 200 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, on observe :

- une surverse d'environ 500 m^3 ,
- un débit maximal de $100 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, et
- un rapport d'énergies $\eta \sim 0,3$.

Ce rapport reste relativement fort par rapport aux données de laboratoire ($\eta \sim 0,15$) et aux rares vagues d'impulsion d'avalanche documentées, et il est inférieur d'un facteur 2 au rapport η pour des vagues d'impulsion dues à des glissements de terrain documentés.

6. Salm, B., A. Burkard, and H. Gubler, *Berechnung von Fliesslawinen, eine Anleitung für Praktiker mit Beispielen*, Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung (Davos), 1990. Voir traduction française sur le site <https://www.toraval.ch/publications/avalanches/>

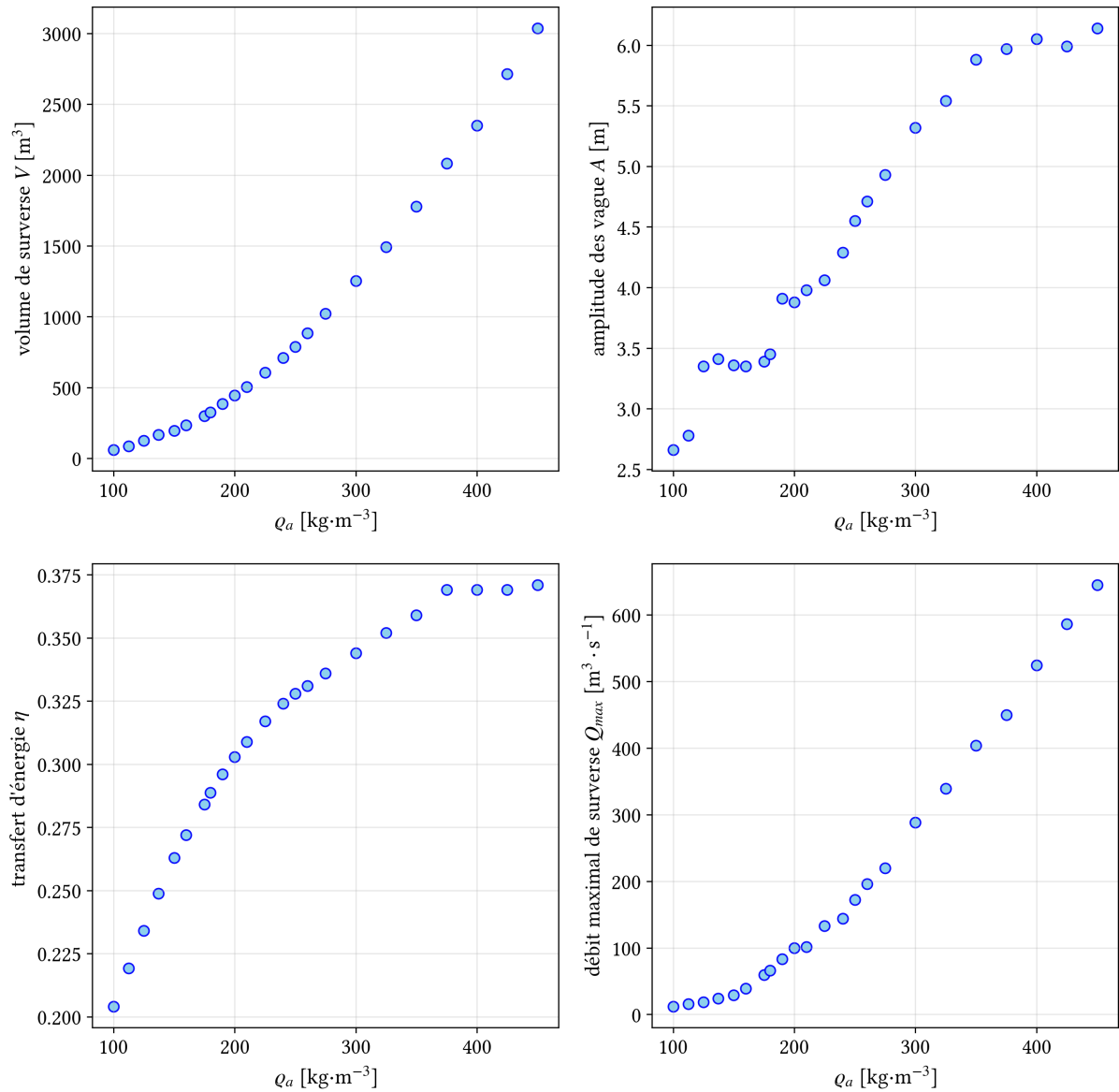


Figure 1.1 – (a) Variation du volume V surversé par-dessus la digue en fonction de la masse volumique de l'avalanche ρ_a . (b) Amplitude maximale de la vague (différence de cotes entre la crête de la vague et le niveau de référence) en fonction de la masse volumique de l'avalanche ρ_a . (c) Rapport de transfert d'énergie η (rapport entre l'énergie totale de la vague et l'énergie de l'avalanche) en fonction de la masse volumique de l'avalanche ρ_a . (d) Débit maximal de la surverse Q_{max} par-dessus la digue en fonction de la masse volumique de l'avalanche ρ_a .

Synthèse

Le service instructeur souhaitait avoir les caractéristiques d'une vague d'impulsion dans le cas d'un scénario vraisemblable, à savoir :

- période de retour des chutes de neige à l'origine de l'avalanche $T = 300$ ans ;
- avalanche de neige sèche en régime inertiel ;
- avalanche issue des panneaux B et C sous la pointe des Grands Vans ;
- masse volumique $\rho = 200 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$;
- lac à la cote maximale $z_{max} = 1840,0$ m et sans couche de glace.

Faute d'information, nous sommes restés avec l'hypothèse conservatrice d'une transmission d'énergie sans dissipation quand l'avalanche entre dans le lac. Nous savons que c'est une hypothèse peu réaliste, mais nous n'avons pas d'argument physique pour proposer un facteur de dissipation dans le cas d'une avalanche de neige sèche pénétrant dans un lac. Aussi convient-il de garder en tête cette incertitude.

Avec ces hypothèses, les calculs montrent qu'il existe toujours une surverse en cas de vague d'impulsion, avec un volume estimé à 500 m^3 (soit 0,2 % du volume du lac à la cote maximale) et un débit de pointe de $100 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$. L'eau se déverse en trois vagues, mais c'est la première vague qui occasionne la principale surverse (voir figure A.3).

Par rapport à l'étude de 2025, ce scénario « le plus vraisemblable » conduit à un volume et un débit de surverse qui sont plus petits d'un facteur 5.

Les conséquences de la surverse seraient la formation d'une avalanche de neige très humide dite « slush flow » résultant du mélange d'eau et de la neige poudreuse. Cette masse de neige détrempée ne provoquera aucun dommage à la structure, mais pourra s'écouler le long du talweg sur quelques mètres.

Résultats supplémentaires

Nous reportons ici quelques résultats supplémentaires, à savoir l'hydrogramme du flux déversant et l'évolution de la hauteur d'eau en quatre points (appelés jauges) de la retenue. La figure A.1(a) montre la position des jauges tandis que la figure A.1(b) montre les profils de hauteur d'eau pour la cote maximale $z_{max} = 1840,0$ m.

Il faut noter que compte tenu des caractéristiques du modèle numérique de terrain, nous avons dû utiliser un maillage carré de taille $\Delta x = \Delta y = 1$ m, ce qui tend à adoucir les formes de la digue.

Les figures A.2 à A.7 montrent les résultats pour des masses volumiques allant de $\varrho = 150$ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ à $\varrho = 400$ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ par pas de 50 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

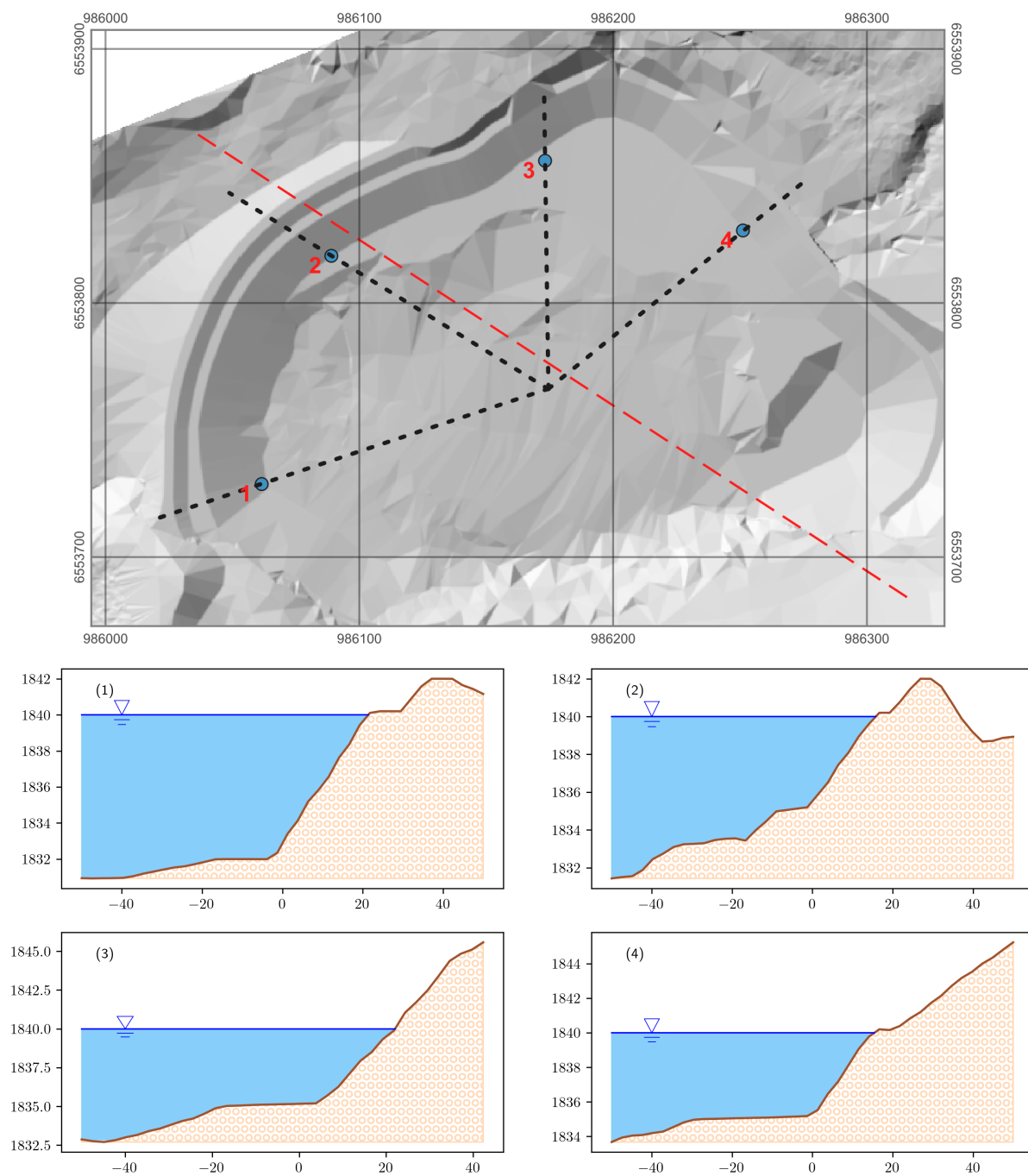


Figure A.1 – Position des quatre jauges n°s 1 à 4. On a tracé le profil du terrain tel que projeté autour de chacun de ces points (l'abscisse $x = 0$ représente la position de la jauge). La droite tirée rouge représente le transect utilisé pour tracer l'évolution des vagues à la figure ???. Attention, le rapport d'aspect des échelles spatiales x et z n'est pas respecté.

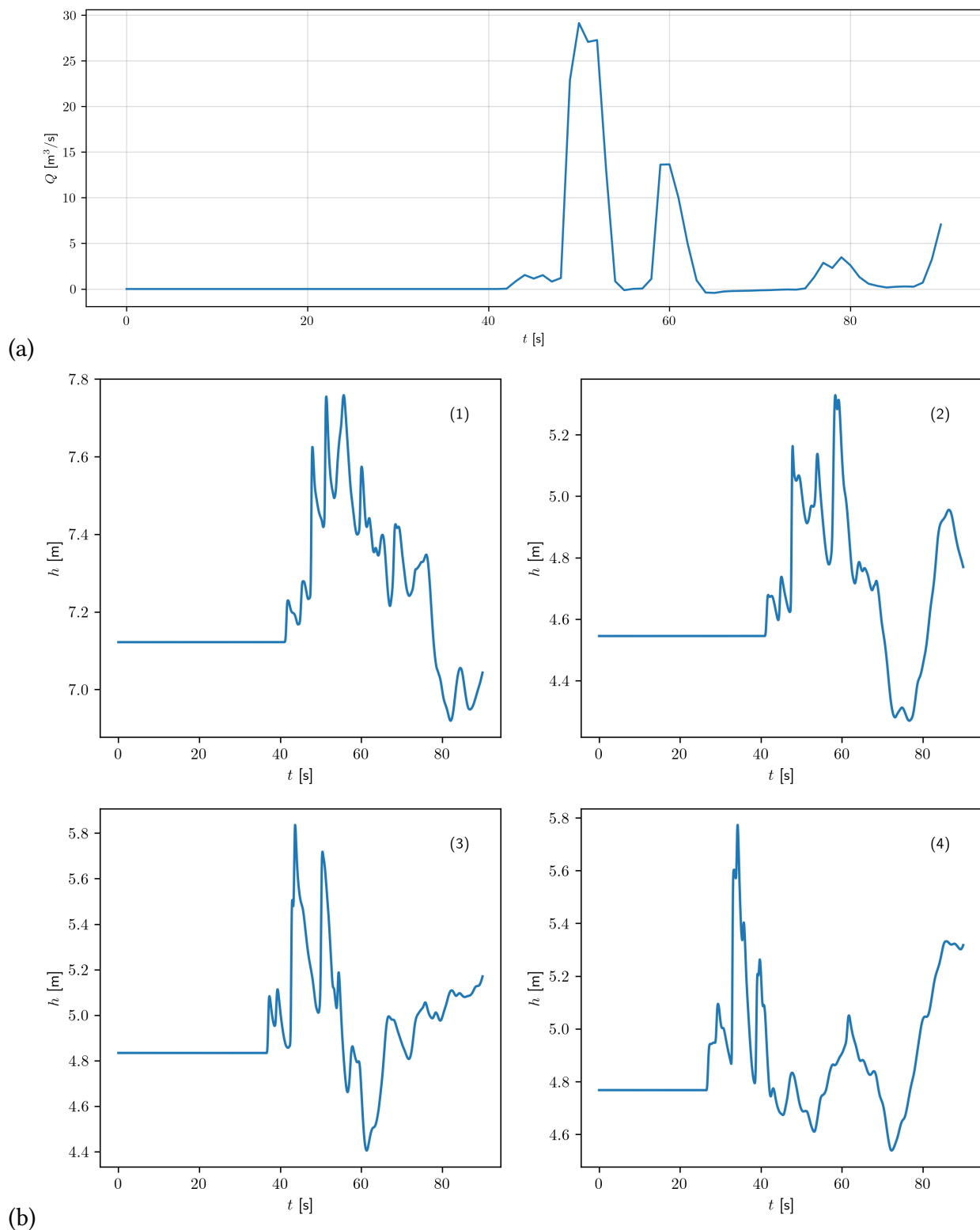


Figure A.2 – Résultat pour une densité $\varrho_a/\varrho = 0,15$. (a) Hydrogramme de la surverse. (b) Évolution de la hauteur d'eau aux points (1)–(4)

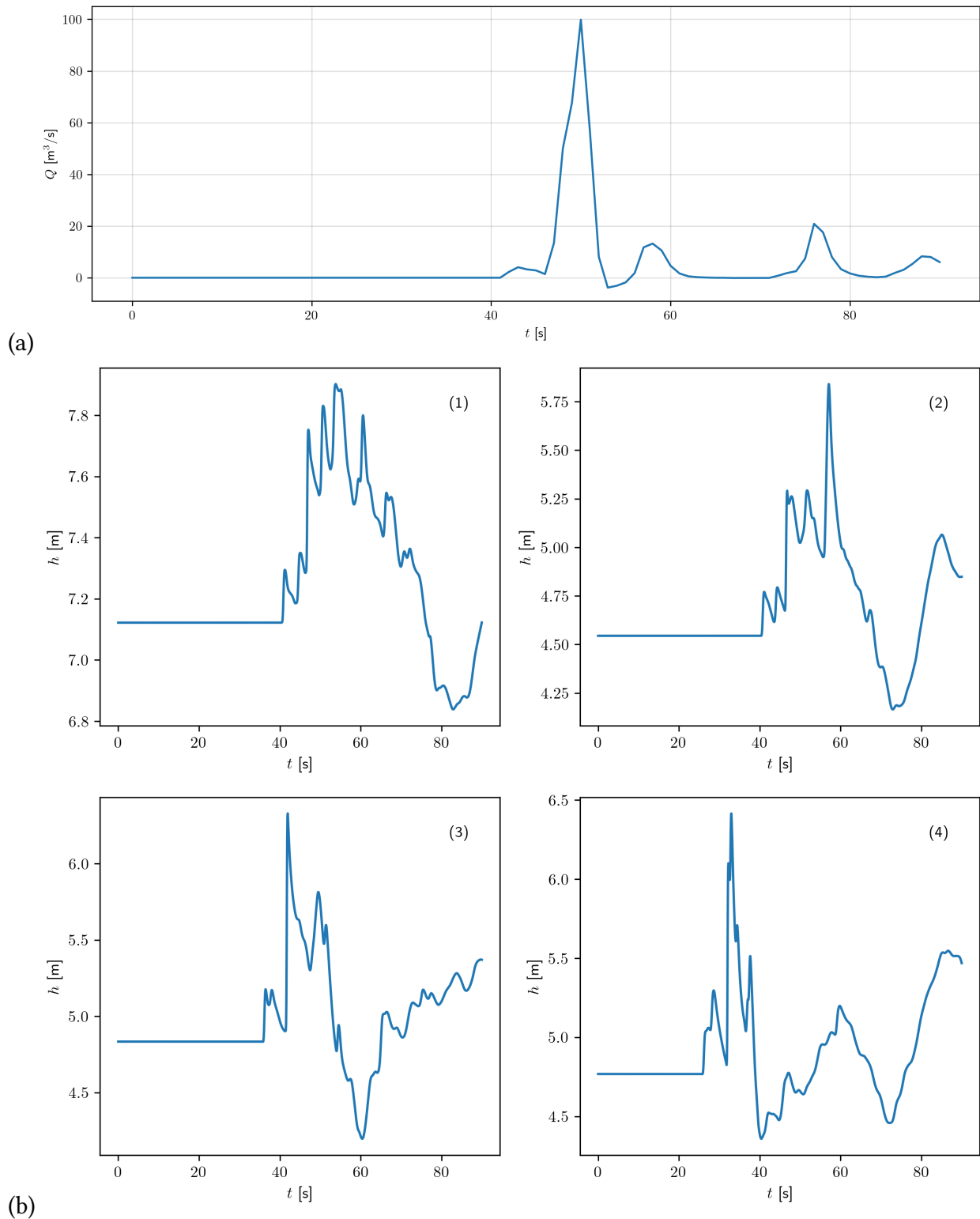


Figure A.3 – Résultat pour une densité $\varrho_a/\varrho = 0,20$. (a) Hydrogramme de la surverse. (b) Évolution de la hauteur d'eau aux points (1)–(4)

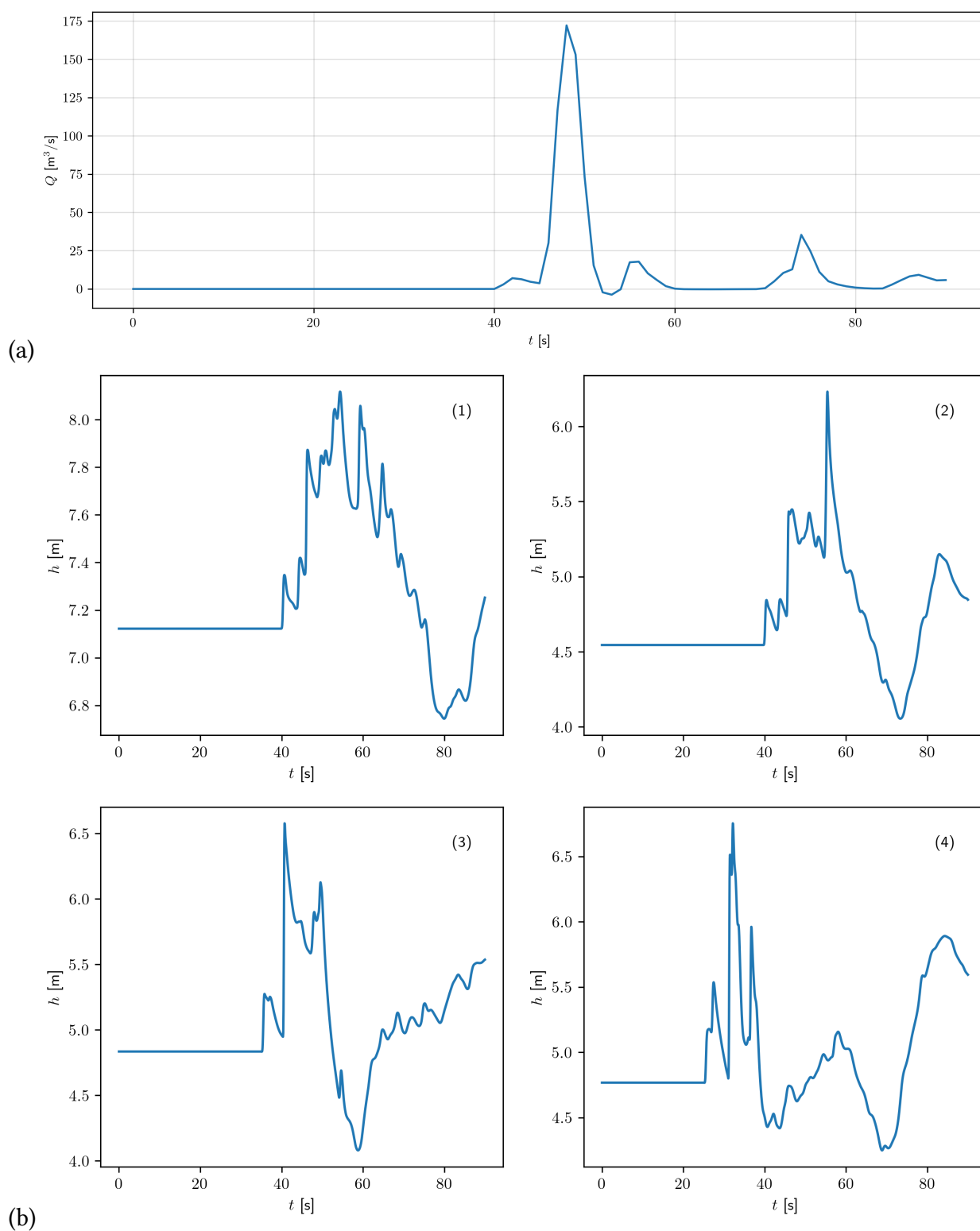


Figure A.4 – Résultat pour une densité $\varrho_a/\varrho = 0,25$. (a) Hydrogramme de la surverse. (b) Évolution de la hauteur d'eau aux points (1)–(4)

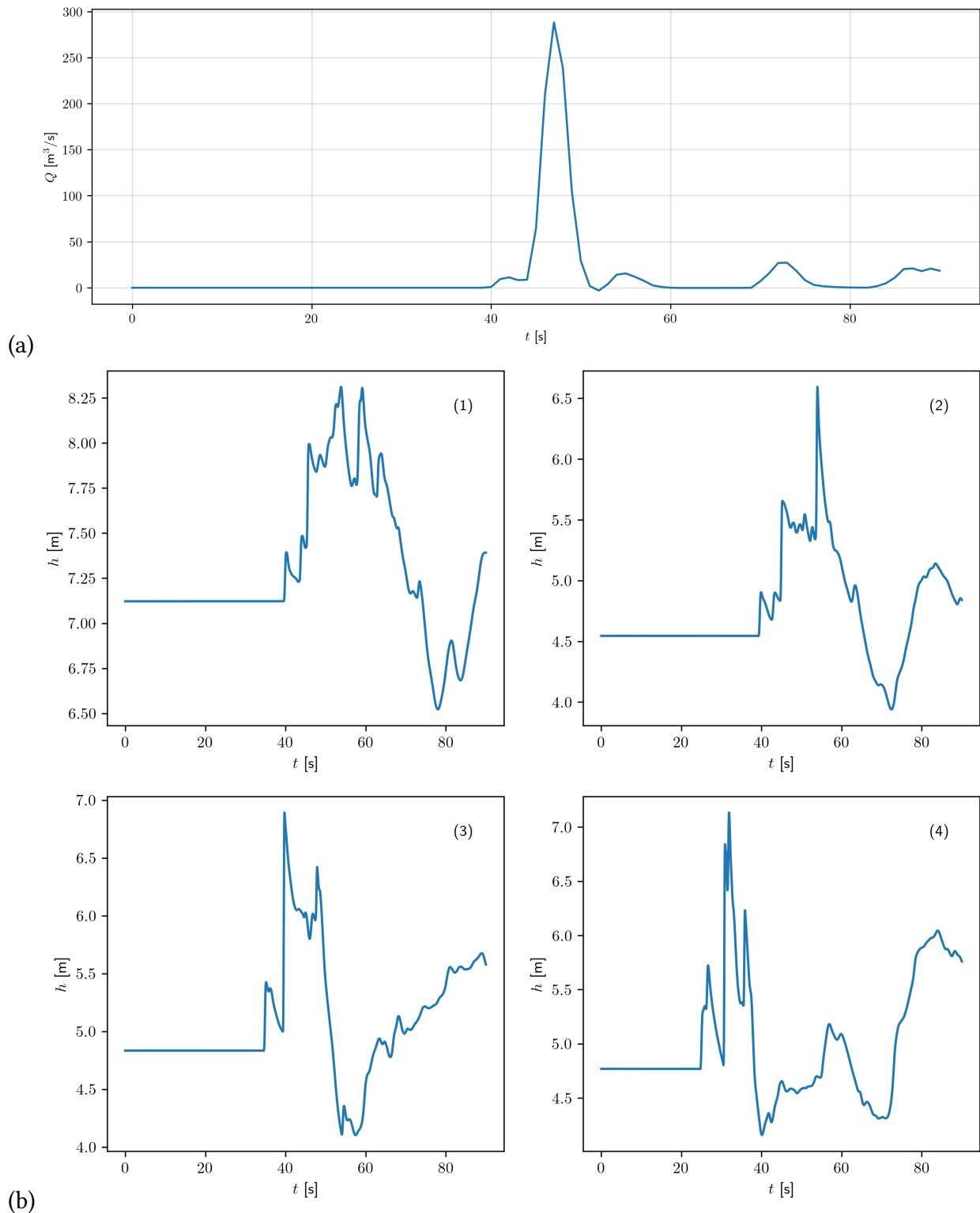


Figure A.5 – Résultat pour une densité $\varrho_a/\varrho = 0,30$. (a) Hydrogramme de la surverse. (b) Évolution de la hauteur d’eau aux points (1)–(4)

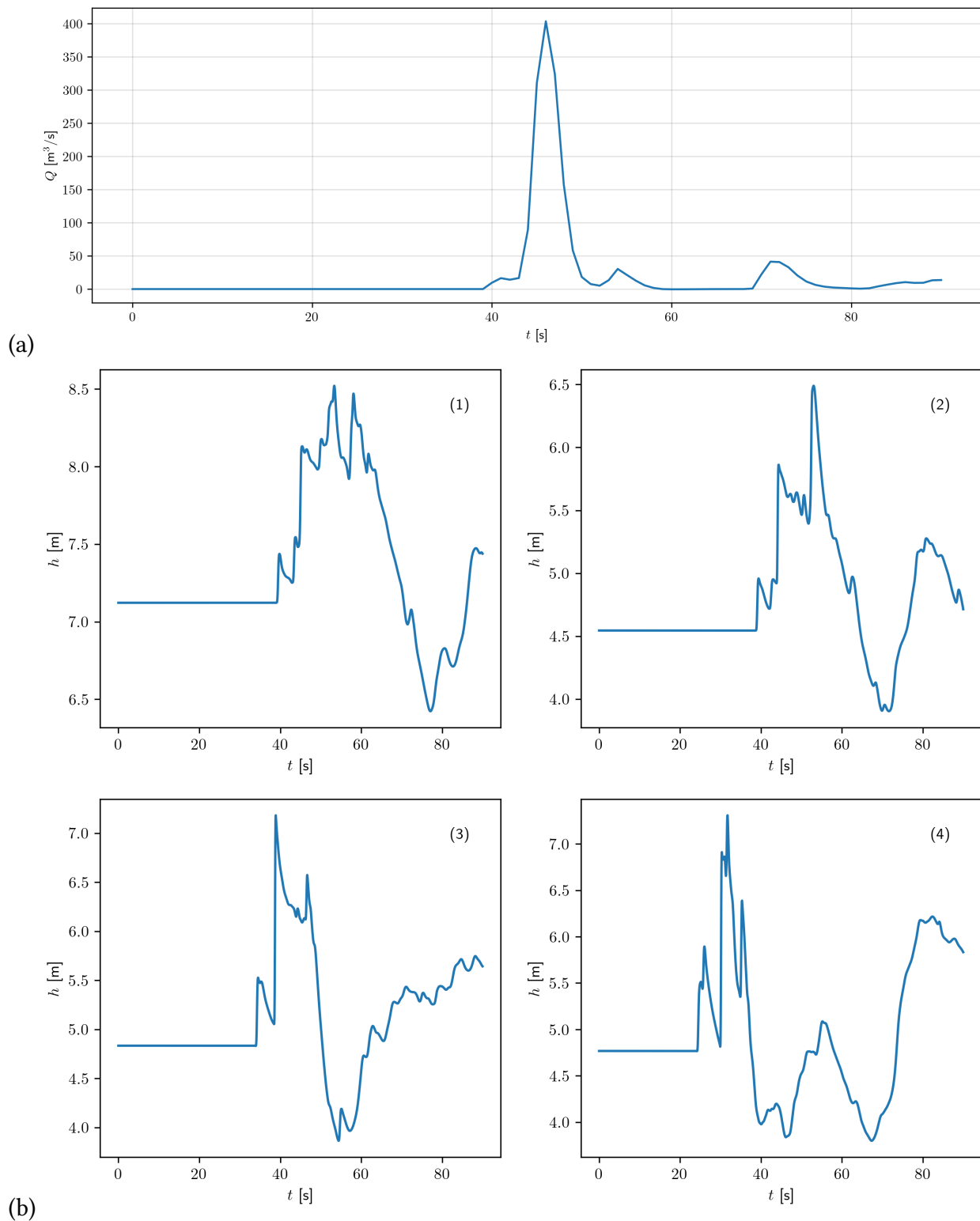


Figure A.6 – Résultat pour une densité $\varrho_a/\varrho = 0,35$. (a) Hydrogramme de la surverse. (b) Évolution de la hauteur d’eau aux points (1)–(4)

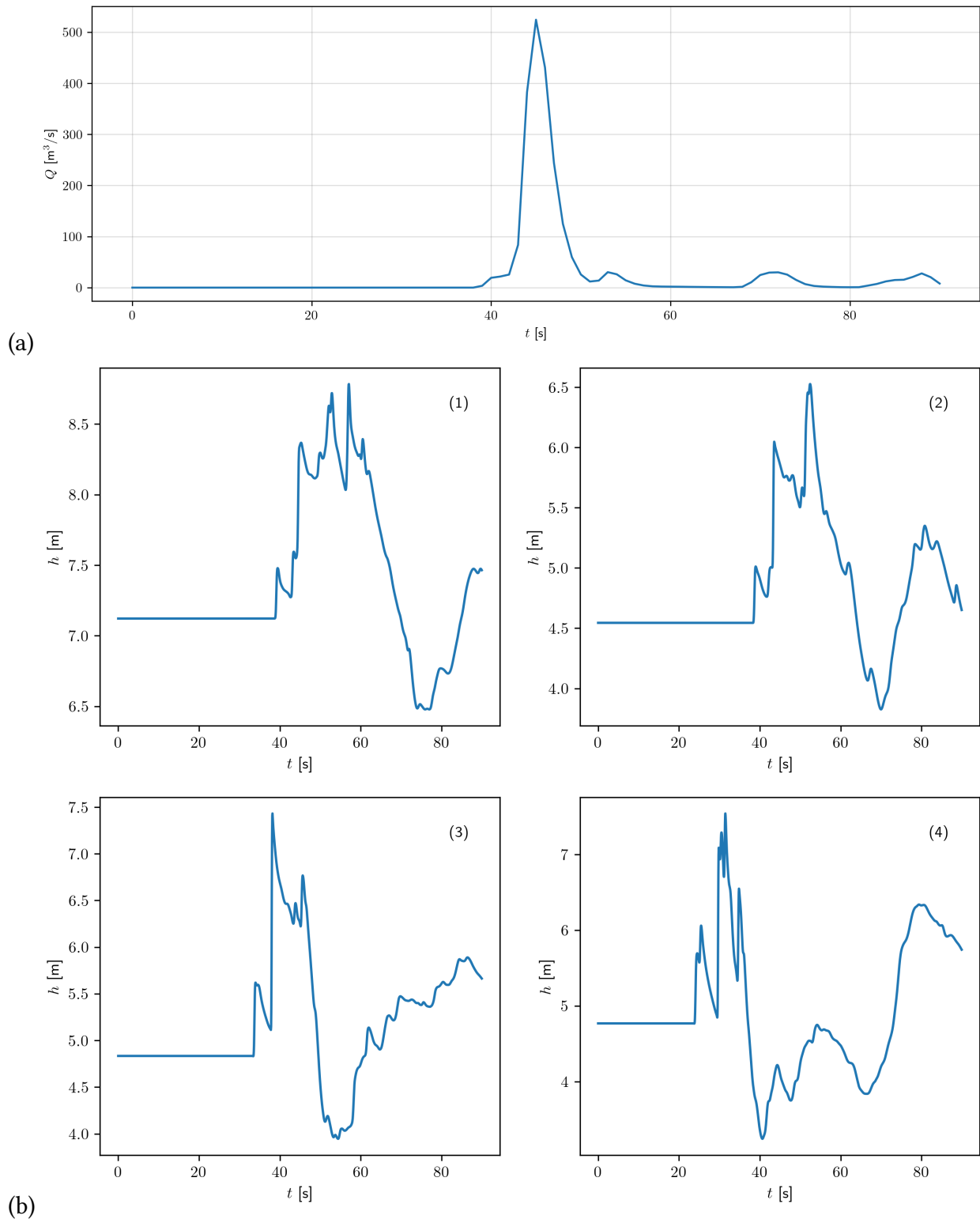


Figure A.7 – Résultat pour une densité $\varrho_a/\varrho = 0,40$. (a) Hydrogramme de la surverse. (b) Évolution de la hauteur d’eau aux points (1)–(4)

Cette étude a été réalisée par Toraval groupement d'ingénieurs-conseils.



<http://www.toraval.fr>

<http://www.toraval.ch>

Toraval Suisse : Chemin des Chardonnerets 13, CH-1008 Prilly

Toraval France : 2838 route des Annuits, F-73 400 Ugine

- chargés d'étude :
 - calculs : Christophe Ancey (ancey@toraval.ch)
- commanditaire de l'étude : Syndicat Intercommunal Flaine (19 janvier 2026)
- maîtrise d'œuvre : Abest
- le corps de ce rapport contient 18 pages
- supplément électronique : néant.