

1D numerical modeling of flows in a mining pumped storage reservoir

Auteur : Chabeau, Aurore

Promoteur(s) : Erpicum, Sébastien; Archambeau, Pierre

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil des constructions, à finalité spécialisée en "civil engineering"

Année académique : 2024-2025

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/23177>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



University of Liege - Faculty of Applied Sciences

Master's thesis for the degree of Civil Construction Engineer

Master's thesis: 1D numerical modeling of flows in a mining pumped storage reservoir

Realised by:

CHABEAU Aurore s201141

Academic Advisor: SÉBASTIEN ERPICUM

Co-Academic Advisor: PIERRE ARCHAMBEAU

Jury: ELENA PUMMER (NTNU), SERGE BROUYÈRE

Academic Year 2024 - 2025

Résumé

Ce mémoire présente le développement et la validation d'un modèle numérique unidimensionnel destiné à simuler l'écoulement à surface libre dans un réseau de galeries souterraines interconnectées, utilisé comme réservoir inférieur dans une installation de pompage-turbinage souterrain (UPSH). Cette approche s'inscrit dans le cadre de la transition énergétique, avec pour ambition de valoriser des infrastructures minières abandonnées en les transformant en systèmes de stockage d'énergie renouvelable.

Le modèle repose sur les équations de Saint-Venant, résolues par une méthode des volumes finis avec un schéma temporel explicite de type Runge-Kutta d'ordre 2. Les jonctions en T sont modélisées à l'aide des multiplicateurs de Lagrange, garantissant la conservation de la masse et la continuité de la charge hydraulique.

Le réseau étudié, inspiré d'une maquette physique à l'échelle 1:100, est constitué de seize conduites interconnectées de 10 cm de diamètre, réparties autour d'un point d'injection central. Il se compose de quatre galeries principales, huit galeries secondaires et quatre galeries terminales, formant quatre sous-réseaux rectangulaires symétriques, chacun présentant un comportement hydraulique similaire grâce à cette géométrie symétrique. Quatre phases hydrauliques ont été identifiées lors du remplissage : (1) remplissage du point d'injection, (2) propagation des ondes vers les extrémités, (3) interactions entre ondes incidentes et réfléchies, et (4) stabilisation progressive vers un niveau d'eau uniforme.

Le modèle reproduit ces phénomènes, avec des erreurs moyennes inférieures à 2,6 % en régime stabilisé, calculées comme les déviations absolues moyennes entre les prédictions de hauteur d'eau du modèle et les mesures aux capteurs. Ces écarts sont à mettre en perspective avec la précision expérimentale : bien que la résolution nominale des capteurs à ultrasons soit de ± 1 mm, les variations entre répétitions, les écarts initiaux entre capteurs (jusqu'à 6 mm pour certains), ainsi que les effets de traitement des données (moyennage, détection d'anomalies) introduisent une incertitude globale de l'ordre de quelques millimètres.

L'extension à l'échelle réelle démontre la transposabilité des résultats, confirmant la validité de l'approche pour des applications industrielles. Une analyse de sensibilité géométrique extensive révèle que les réseaux peuvent être adaptés à diverses contraintes spatiales tout en maintenant leurs performances hydrauliques.

Le modèle permet ainsi d'identifier les zones critiques pour le dimensionnement structural, de mieux anticiper les efforts hydrauliques, et d'optimiser les stratégies de contrôle opérationnel. Il révèle notamment que les conduites interconnectées peuvent subir des inversions de débit fréquentes, imposant des exigences accrues en termes de résistance à la fatigue.

Le modèle constitue ainsi un outil pertinent pour l'analyse des écoulements transitoires dans les réseaux souterrains complexes et contribue au développement fiable des systèmes UPSH en tant que solution de stockage durable au service des énergies renouvelables.

Abstract

This master's thesis presents the development and validation of a one-dimensional numerical model designed to simulate free-surface flow in a network of interconnected underground galleries, used as the lower reservoir in an Underground Pumped Storage Hydropower (UPSH) system. This approach aligns with the goals of the energy transition, aiming to repurpose abandoned mining infrastructures into renewable energy storage systems.

The model is based on the Saint-Venant equations, solved using a finite volume method with a second-order explicit Runge-Kutta time scheme. T-junctions are modeled using Lagrange multipliers, ensuring both mass conservation and hydraulic head continuity.

The studied network, inspired by a 1:100 scale physical model, consists of sixteen interconnected PVC pipes with a diameter of 10 cm, arranged around a central injection point. It includes four main galleries, eight secondary galleries, and four terminal galleries, forming four symmetrical rectangular sub-networks. Each sub-network exhibits similar hydraulic behavior due to this symmetric geometry. Four hydraulic phases were identified during filling: (1) filling of the injection point, (2) wave propagation toward the extremities, (3) interactions between incident and reflected waves, and (4) progressive stabilization toward a uniform water level.

The model accurately reproduces these phenomena, with average errors below 2.6% in steady-state conditions, calculated as the mean absolute deviations between model-predicted and sensor-measured water heights. These discrepancies are to be considered in light of the experimental accuracy: although the nominal resolution of the ultrasonic sensors is 1 mm, variations between repetitions, initial offsets between sensors (up to 6 mm in some cases), and data processing effects (smoothing, anomaly detection) introduce an overall uncertainty of a few millimeters.

The extension to full scale confirms the transferability of the results, validating the approach for industrial applications. An extensive geometric sensitivity analysis shows that the network can be adapted to various spatial constraints while maintaining its hydraulic performance.

The model thus enables the identification of critical zones for structural design, improves anticipation of hydraulic loads, and helps optimize operational control strategies. It notably reveals that the interconnected conduits are subject to frequent flow reversals, requiring enhanced fatigue resistance.

Overall, the model proves to be a relevant tool for analyzing transient flows in complex underground networks and contributes to the reliable development of UPSH systems as a sustainable energy storage solution.

Geometry of the lab model

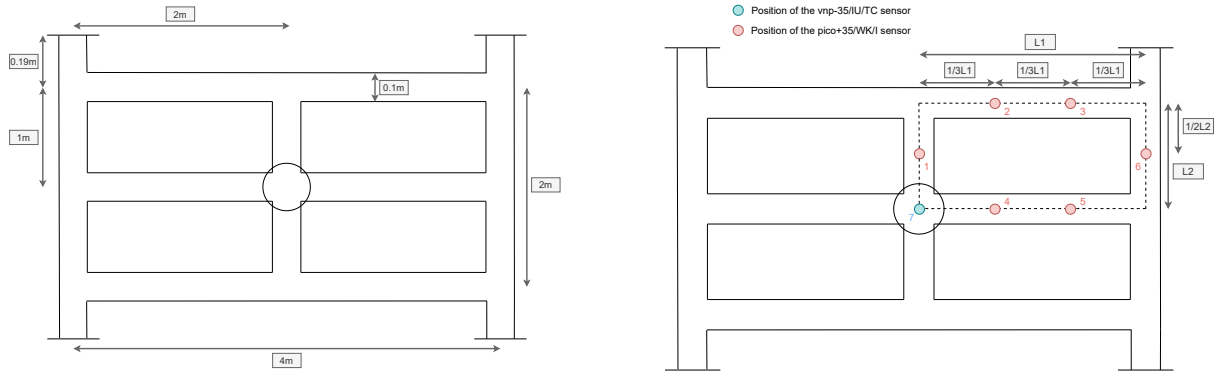


Figure 1: Dimensions of the experimental setup and position of the sensors

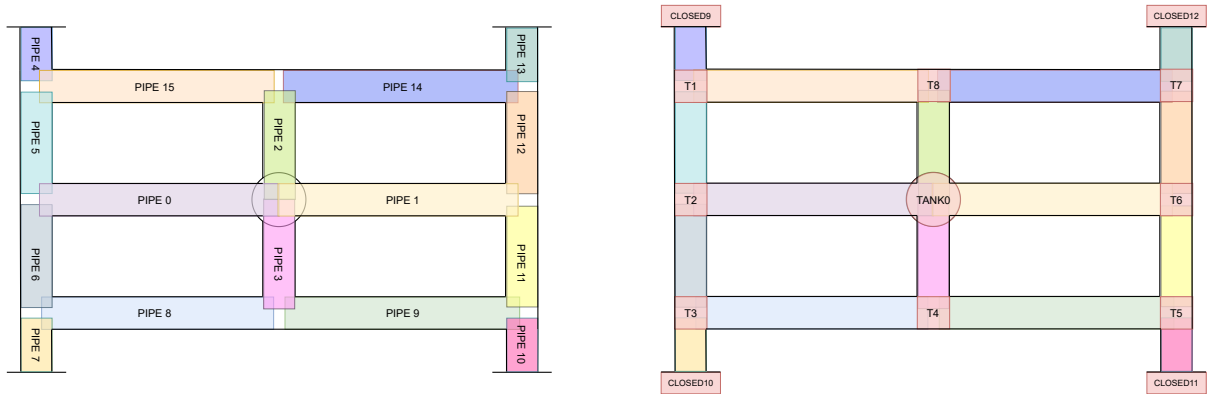


Figure 2: Network diagram with the names of pipes and junctions

Steady-state validation

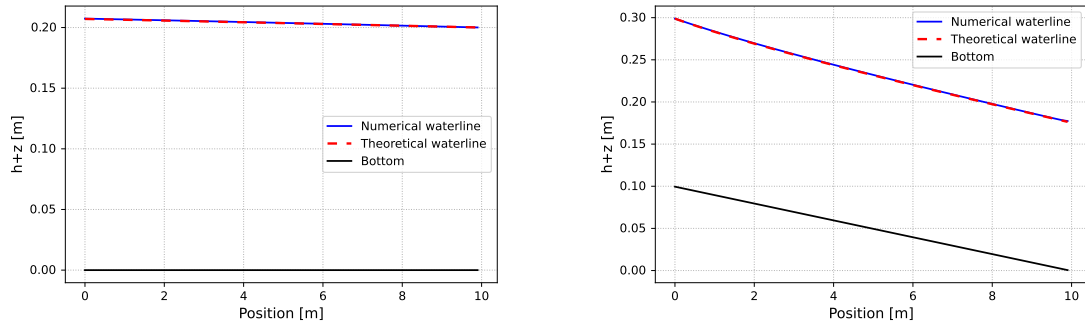


Figure 3: Comparison of results obtained numerically and by water line calculation for a subcritical flow (left) and a supercritical flow (right) in a circular pipe

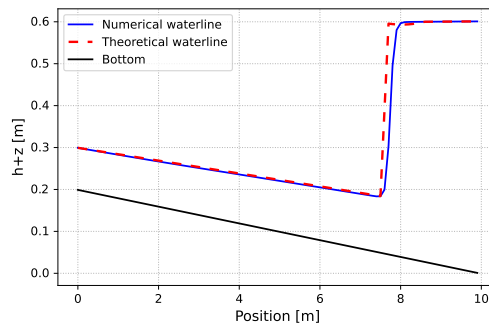


Figure 4: Comparison of results obtained numerically and by water line calculation for an hydraulic jump in a rectangular pipe

Dam break unsteady flow

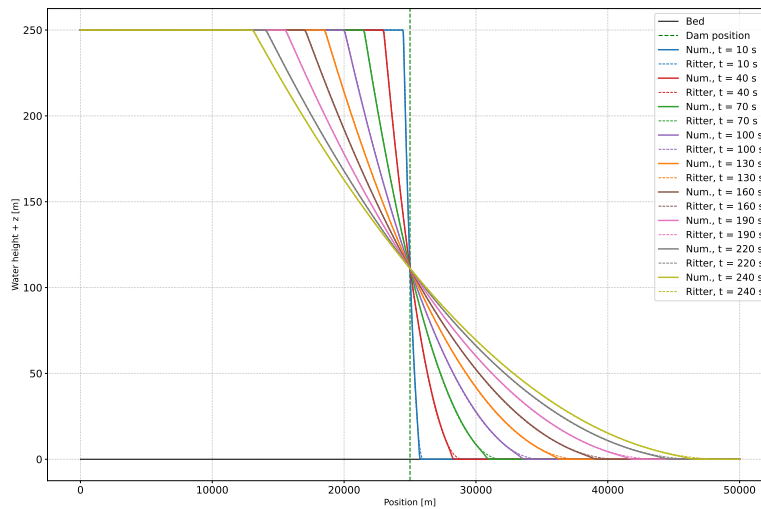


Figure 5: Comparison between the numerical solution and Ritter's analytical solution for water height at different times, using linear reconstruction and $\Delta x = 10$ m

Comparison of results for $Q_{mean} = 1.87L/s$

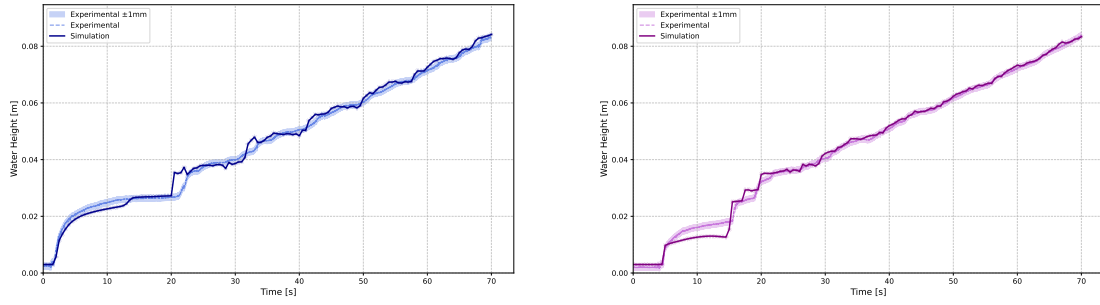


Figure 6: Comparison of results for sensors 1 (left) and 2 (right)

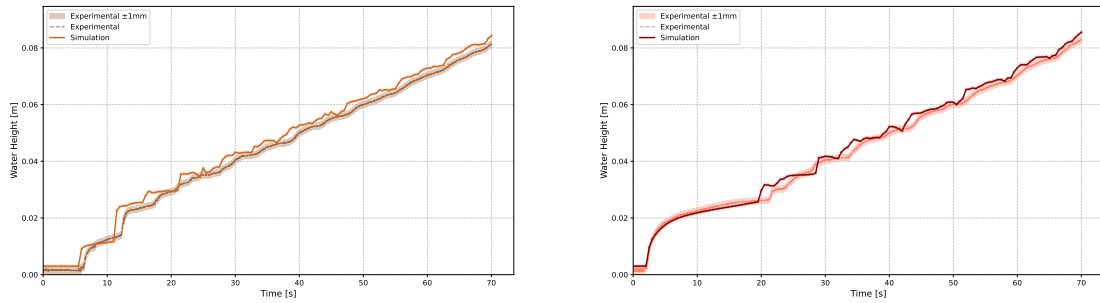


Figure 7: Comparison of results for sensors 3 (left) and 4 (right)

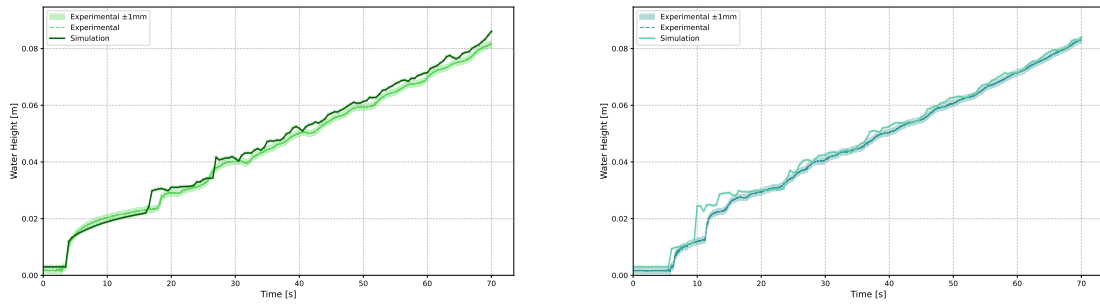


Figure 8: Comparison of results for sensors 5 (left) and 6 (right)

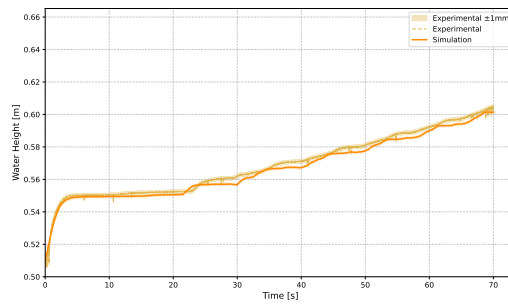


Figure 9: Comparison of results for sensor 7

Full-scale results

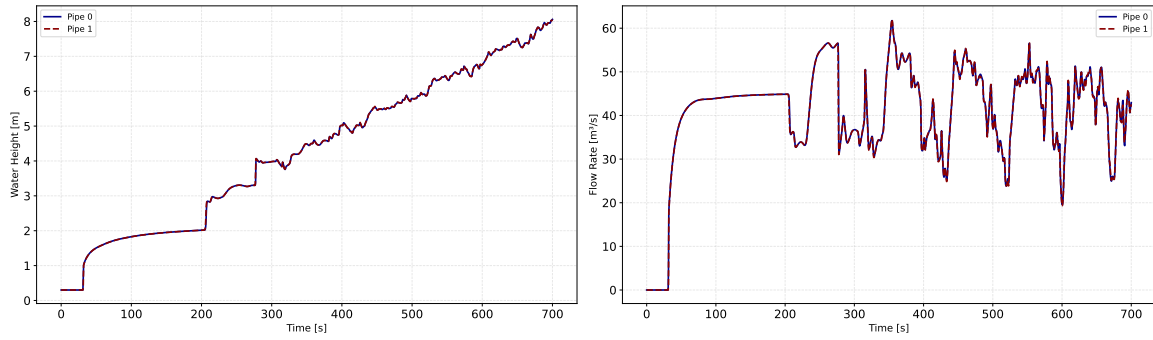


Figure 10: Evolution of water height and flow rate over time at the middle of pipes 0 and 1

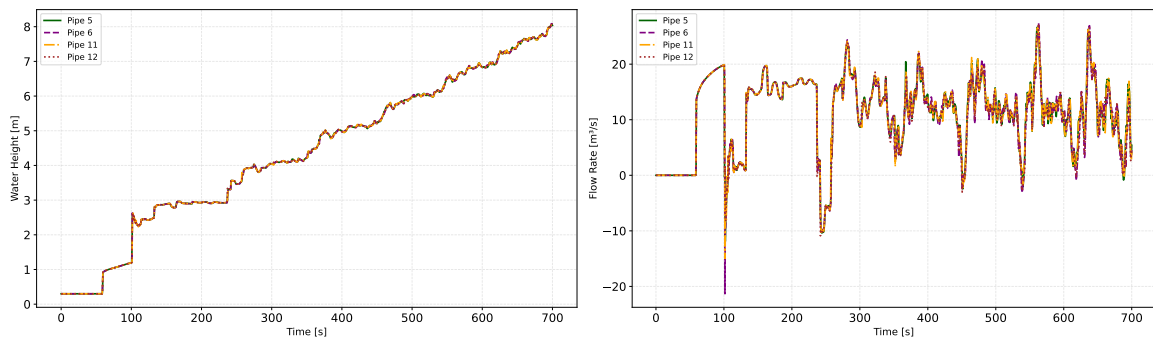


Figure 11: Evolution of water height and flow rate over time at the middle of pipes 5, 6, 11 and 12

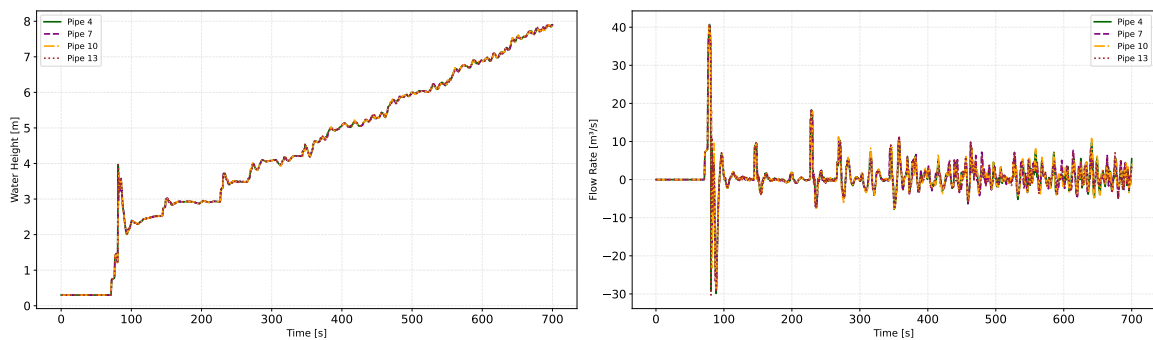


Figure 12: Evolution of water height and flow rate over time at the middle of pipes 4, 7, 10 and 13

Geometry sensitivity analysis: effect of pipe spacing

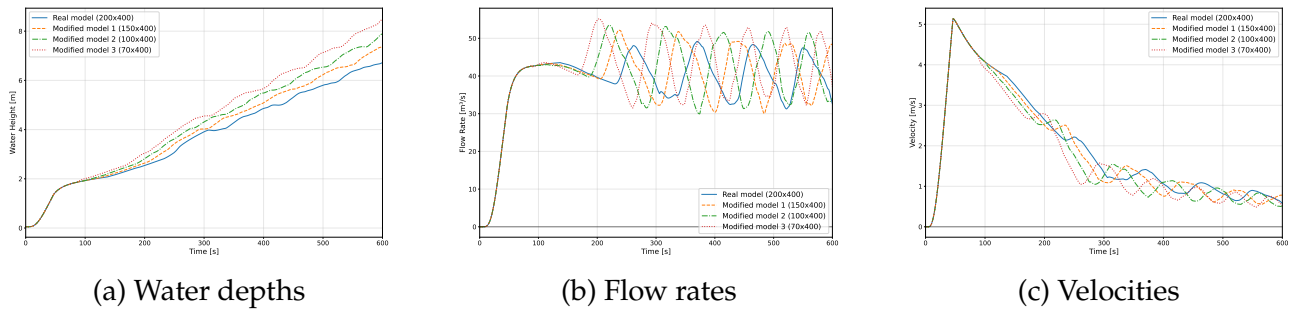


Figure 13: Hydraulic behavior comparison at the middle of pipes 0 and 1 across different network spacings

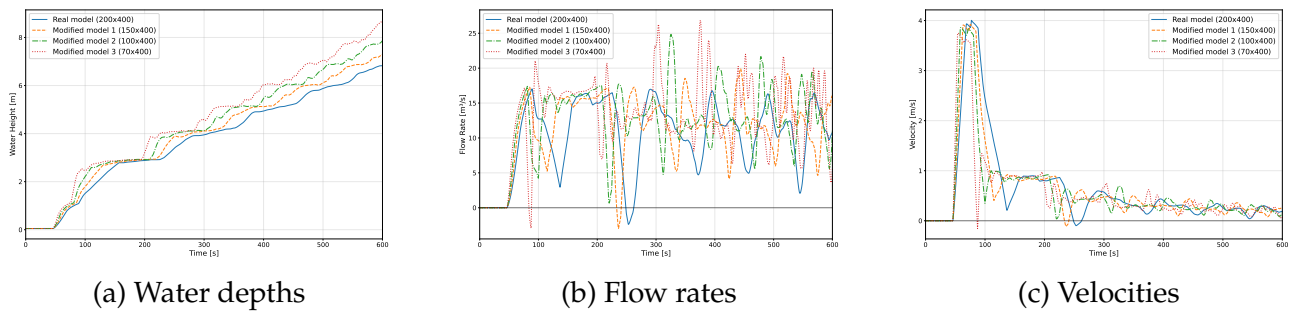


Figure 14: Hydraulic behavior comparison at the middle of pipes 5, 6, 11 and 12 across different network spacings