



Étude hydraulique du D01, du D03 et du D04

Agglomération d'Annemasse

Rapport Final - version du 17 décembre 2015



Priscille Béguin / Adrien Momplot / Gislain Lipeme Kouyi

Sommaire

I.Objectif et cadre de l'étude.....	3
II.Démarche de modélisation.....	4
III.Modélisation du DO1.....	5
1. Analyse du fonctionnement hydraulique.....	5
2.Modèle 3D.....	5
3.Résultats.....	5
4.Position du capteur.....	6
5.Détermination de la loi reliant la hauteur d'eau mesurée au débit déversé.....	7
6.Etude des incertitudes.....	8
7.Préconisation de mise en conformité du site.....	8
IV.Modélisation du DO3.....	10
1.Analyse du fonctionnement hydraulique.....	10
2.Le modèle 3D.....	10
3.Résultats.....	10
4.Position du capteur.....	11
5.Détermination de la loi reliant la hauteur d'eau mesurée au débit déversé.....	12
6.Incertitudes.....	13
V.Modélisation du DO4.....	14
1.Analyse du comportement hydraulique de l'ouvrage.....	14
2.Le modèle 3D.....	14
3.Résultats.....	14
4.Position du capteur.....	15
5.Détermination de la loi reliant la hauteur d'eau mesurée au débit déversé.....	16
6.Incertitudes.....	16
VI.Conclusions.....	17
VII.Annexes.....	18

I. Objectif et cadre de l'étude

L'objectif principal de cette étude est **d'instrumenter** les DO 1, 3 et 4 et de permettre de **mesurer** le **débit déversé** à partir de la connaissance de la **hauteur d'eau** et d'une **relation** reliant cette hauteur mesurée au débit déversé (relation appelée « loi » dans la suite du document).

Ce rapport rend compte :

- D'une **analyse** de la ligne d'eau au sein des déversoirs
- De la **préconisation** de **modification** des ouvrages afin de permettre l'amélioration de leur instrumentation ou leurs mise en conformité si cela est nécessaire
- d'une préconisation sur le positionnement des **capteurs** aériens de hauteur d'eau dans les ouvrages afin de fiabiliser les mesures (hauteurs et débits déversés)
- de l'élaboration des **lois** reliant la hauteur d'eau mesurée au point sus-mentionné et le débit déversé

Pour ce faire, des simulations 3D des écoulements au niveau des DO 1, 3 et 4 ont été menées. Dans la suite du présent rapport, chaque déversoir est abordé individuellement. Les **débits caractéristiques** ont été injectés à l'amont des ouvrages dans le but **d'appréhender le comportement hydrodynamique** de ces DO (forme de la surface libre, champs de vitesse, turbulence – notamment présence de zones de stagnation/recirculation, etc.). L'exploitation des résultats de ces simulations nous permet de définir les **positionnements optimaux** des **capteurs** de hauteur, et de créer les **lois reliant** cette **mesure** de hauteur au **débit déversé**.

Cette étude est également menée dans le cadre d'une **collaboration** entre le laboratoire **LGCIE-DEEP** et l'**Agglomération d'Annemasse**. Les étapes de l'étude présentées dans ce rapport ont été conduites en étroite coordination avec les agents et responsables de l'agglomération en charge du suivi de cette étude. Le **transfert de connaissances**, de **compétences** et même de **technologies** dans le domaine de l'instrumentation en réseau d'assainissement est un des **objectifs** de cette **collaboration**.

II. Démarche de modélisation

Pour garantir des résultats exploitables et de bonne qualité nous suivons une méthode bien spécifique. Celle-ci est résumée ci-dessous.

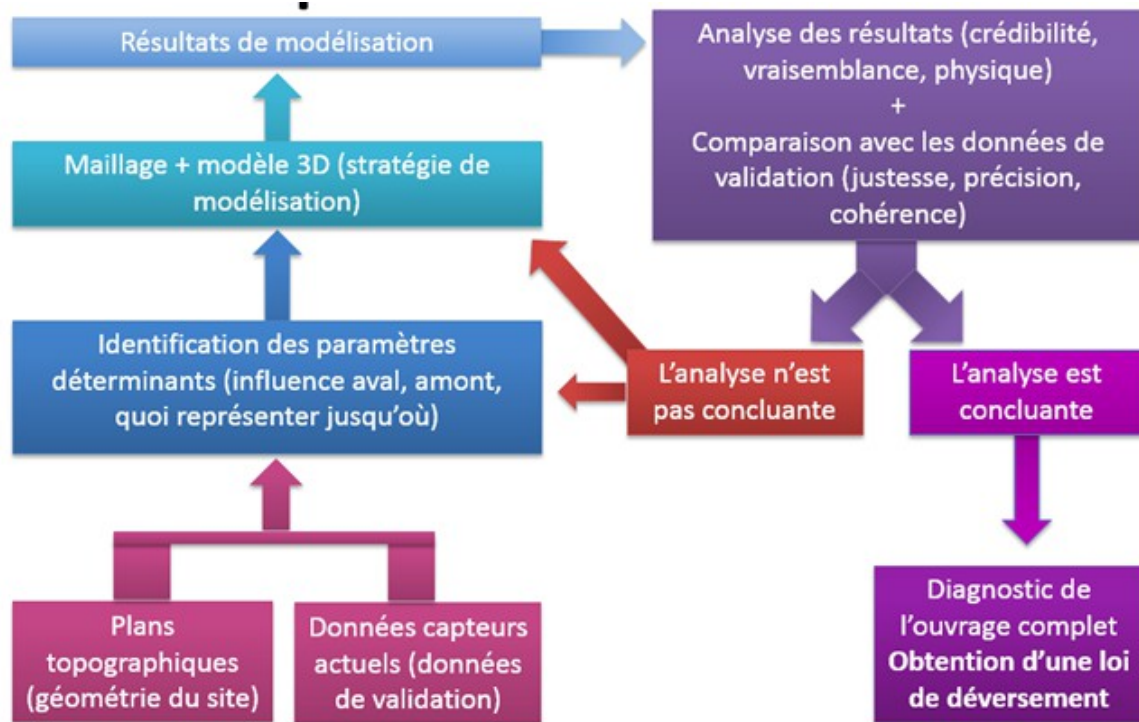


Figure I. Principe et méthode de la modélisation 3D.

C'est grâce aux données fournies par l'Agglomération que nous pouvons identifier les types d'écoulements et les paramètres influents. Cette analyse guide l'ensemble de nos choix de modélisations.

III. Modélisation du DO1

1. Analyse du fonctionnement hydraulique

Le site présente une pente comprise entre 1 et 2 % (selon les tronçons). Il présente trois ruptures, agissant comme des rétrécissements brusques, à la sortie de la première zone déversante, à l'entrée de la seconde partie déversante et en sortie de la deuxième partie déversante (avec la canalisation aval). En dehors de ces points particuliers, aucune rupture brusque de l'écoulement n'est à craindre.

2. Modèle 3D

En nous appuyant sur l'analyse hydraulique du site et de sa géométrie, nous sélectionnons l'approche adaptée aux conditions d'écoulement et obtenons nos premiers résultats de simulation. En l'absence d'information sur la gamme de débits habituellement observée dans l'ouvrage, nous avons choisi de modéliser les débits allant de $0,25 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ à $3 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, de $0,25 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ en $0,25 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Cette gamme de débit devrait couvrir un taux important d'événements observables. Il est à noter que si le plafond de la gamme de débit choisi s'avère être trop faible, une étude complémentaire devra être menée afin d'affiner la loi pour les événements extrêmes.

Le maillage retenu est composé de 5 220 000 mailles hexaédriques, de tailles variables (entre 2 et 8 cm pour la longueur, entre 2 et 4 cm pour la largeur, entre 2 et 4 cm pour la hauteur). Un exemple de simulation est montré en Figure II.

3. Résultats

L'écoulement dans l'ouvrage est torrentiel, sauf quand la canalisation aval se met en charge, imposant alors une contrainte très forte à l'aval, générant un régime fluvial et un ressaut hydraulique dans la seconde partie déversante de l'ouvrage. Le **débit de référence** est observé lors de nos simulations à **$0,3 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$** .

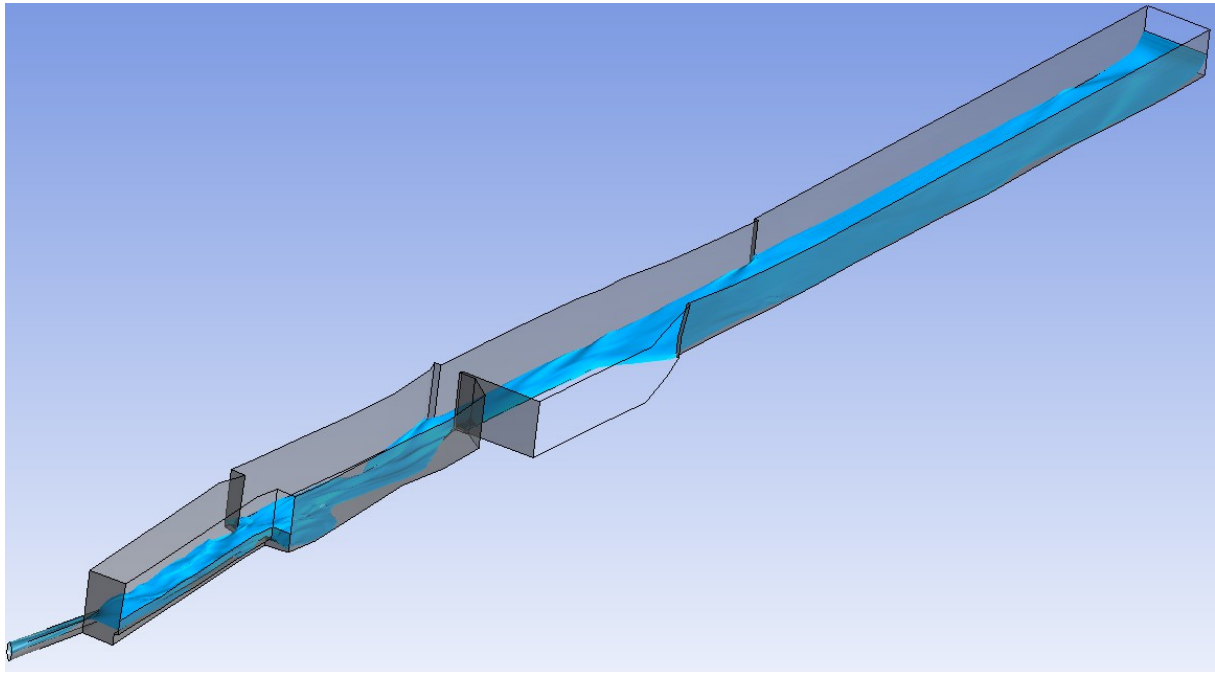


Figure II: Exemple de résultat de simulation, pour un débit entrant égal à $1 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. La flèche rouge indique le sens de l'écoulement.

4. Position du capteur

Les données des simulations sont analysées afin de déterminer un endroit où la hauteur d'eau est relativement constante pour un débit amont donné. On définit le critère suivant pour identifier cette zone : si le gradient sur la composante Z de la surface libre (élévation de la surface libre) est inférieur à 10 % dans toutes les directions, alors la zone présente une surface libre stable, propice à la mesure. Nous établissons ensuite une loi reliant cette hauteur au volume déversé. L'établissement de la loi repose sur 12 simulations, pour des débits allant de $0,25 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ à $3 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, de $0,25 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ en $0,25 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. À ces 12 simulations, s'ajoutent la simulation du débit de référence de l'ouvrage (premier débit pour lequel un déversement est observé) : $0,3 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$.

L'analyse de ces 13 simulations montrent que le DO1 est propice à la mesure dans sa configuration actuelle. En effet, nous avons pu identifier une zone pour laquelle l'écoulement est suffisamment calme (gradient de hauteur d'eau inférieur à 10 %) pour tous les débits simulés. De plus, la différence de hauteur d'eau entre deux débits est toujours strictement supérieur à 2 cm dans cette zone. Ces deux conditions permettent l'établissement d'une loi bijective reliant la hauteur d'eau mesurée au débit déversé. L'emplacement retenu pour le capteur de hauteur d'eau est présenté en Figure III.

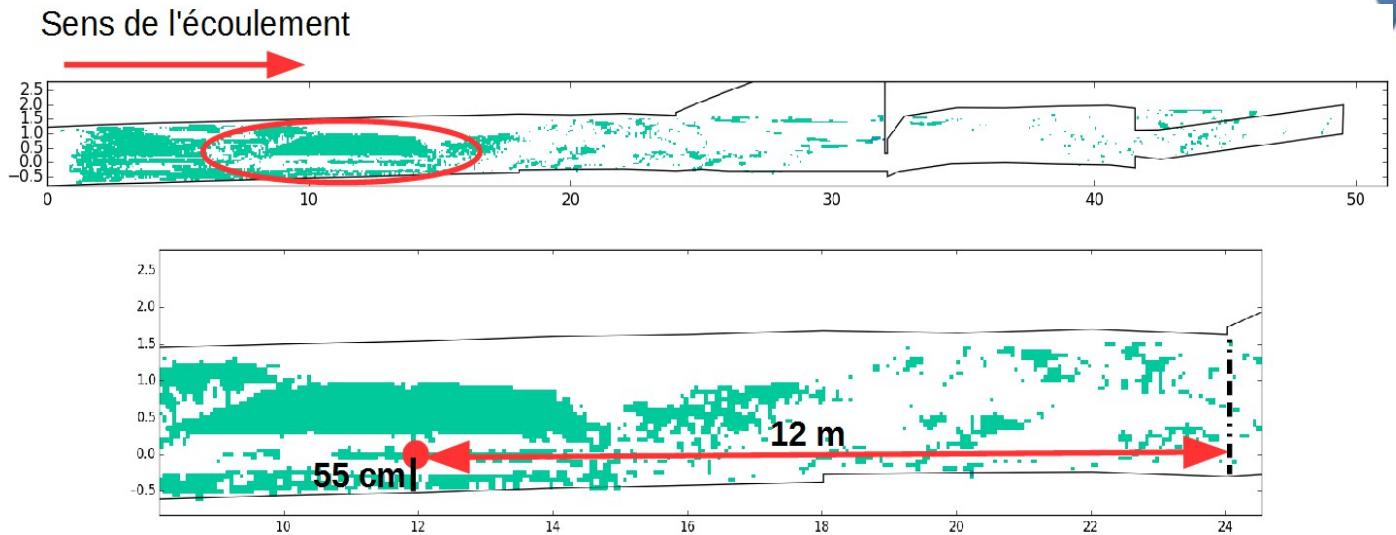


Figure III: Emplacement du capteur de hauteur d'eau. La vue du haut est une vue d'ensemble, la vue du bas est un zoom permettant de situer la position du capteur en fonction de la paroi de la canalisation et de l'entrée dans la première zone déversante.

Notez que le capteur n'est pas placé au centre de la zone qui semble la plus favorable. Afin de pouvoir suivre le débit de temps sec, il faut impérativement se mettre au-dessus de la cunette, ce qui justifie l'emplacement choisi du capteur, un peu en marge de la zone la plus favorable pour les temps de pluies. À partir des données de simulation, nous pouvons à présent établir une relation entre la hauteur d'eau mesurée dans cette zone et les débits entrant, déversé et conservé.

5. Détermination de la loi reliant la hauteur d'eau mesurée au débit déversé

En traçant l'évolution des débits entrant, conservés et déversés en fonction de la hauteur d'eau mesurée dans la zone du capteur identifiée précédemment, nous obtenons les courbes montrées en Figure IV, ci-après.

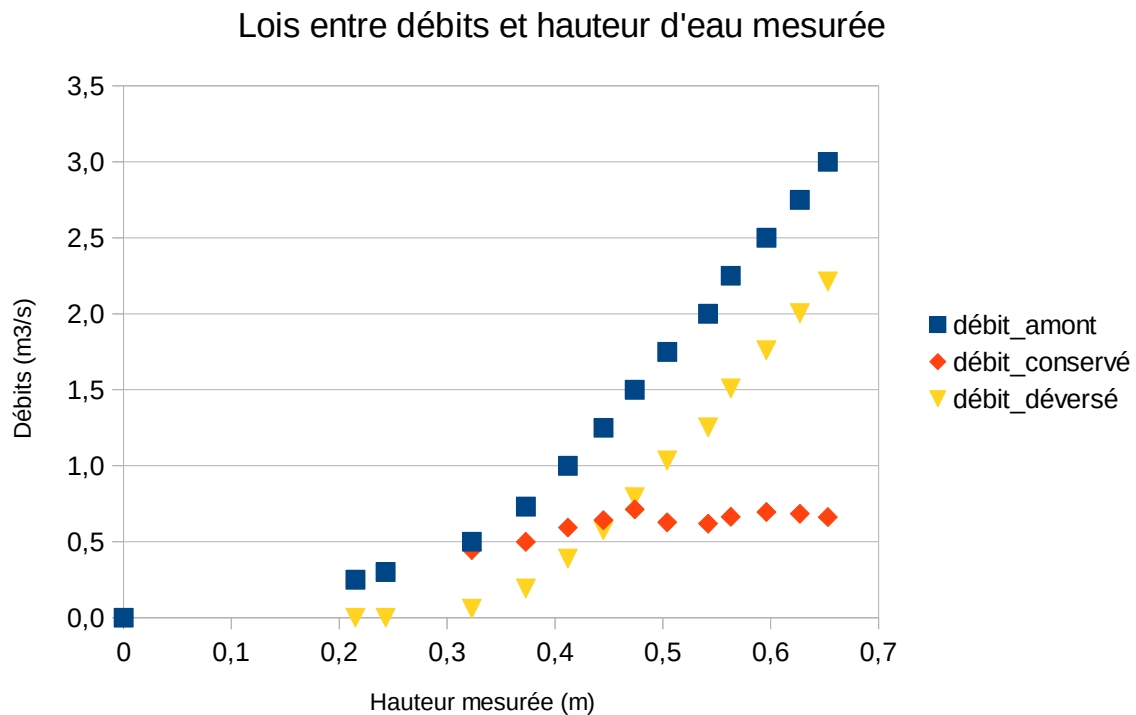


Figure IV: Evolution des débits entrants, conservés et déversés en fonction de la hauteur d'eau mesurée dans la zone du capteur.

Ces courbes montrent que le déversoir DO1 commence à déverser alors que le débit aval n'est pas encore stabilisé. Le déversement commence donc trop tôt, comme il a été constaté par les membres de l'Agglomération. Néanmoins, on remarque que le débit conservé se stabilise aux alentours de 0,650 m³.s⁻¹ et n'augmente plus par la suite. Une fois ce débit conservé atteint, le déversoir fonctionne bien et évacue le surplus vers le milieu naturel. En ce qui concerne les lois reliant les débits entrants, déversés et conservés, il semble judicieux de séparer les courbes en deux parties : avant que le débit conservé ne se stabilise et après que le débit conservé se stabilise (la rupture ayant lieu pour $h = 0,4$ m).

6. Etude des incertitudes

Pour chacune des 4 lois de fonctionnement du DO1 (débit entrant en fonction de la hauteur d'eau, débit conservé en fonction de la hauteur d'eau et les deux débits déversés en fonction de la hauteur d'eau), nous étudions les incertitudes à l'aide de régression linéaire ou de la méthode de Williamson.

Concernant la loi reliant le débit entrant dans le DO1 à la hauteur d'eau mesurée dans la zone identifiée, une loi de type $y = ax^2 + bx$ est retenue. La Figure V représente cette loi, son équation, ainsi que les incertitudes établies sur cette loi.

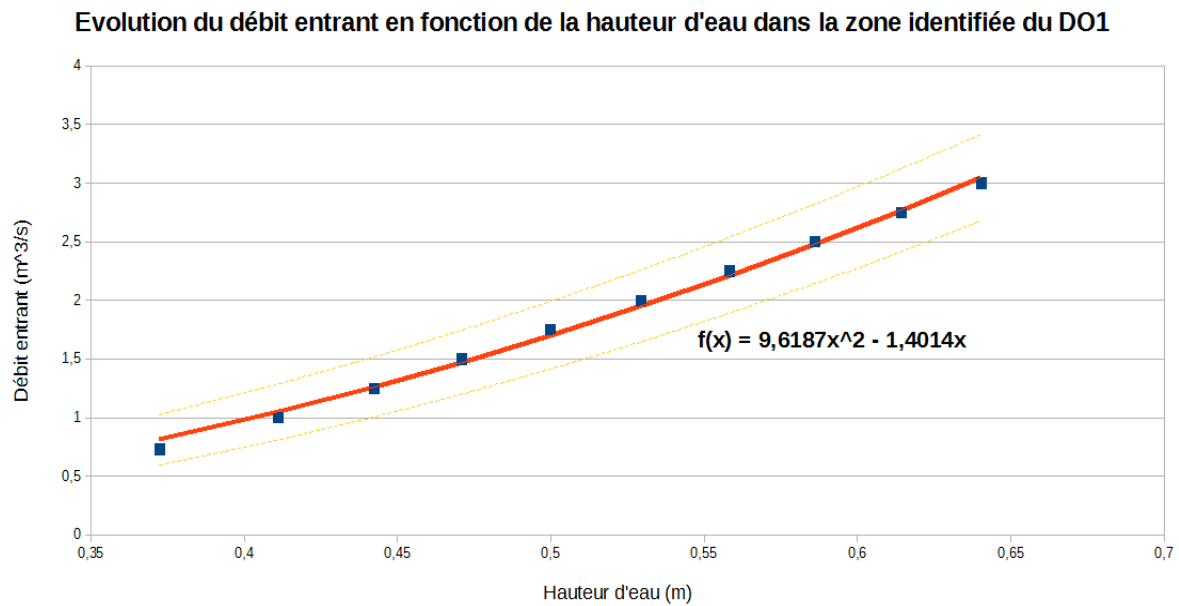


Figure V: Loi reliant le débit entrant à la hauteur d'eau dans la zone identifiée. En bleu, les points des simulations, en rouge, la loi calculée, en ligne discontinue jaune, l'intervalle de confiance à 95 %.

Il est à noter que pour des faibles valeurs de débit (inférieures à la valeur du débit de référence, estimé à $0,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) une approche utilisant la loi de Manning-Strickler permettra une validation de notre loi, sous réserve que la canalisation d'amenée d'eau reste constante dans sa forme et sa pente pour une longueur suffisante (au moins 100 fois son diamètre), et que l'écoulement reste contenu dans la cunette. Pour rappel, la formule de Manning-Strickler est la suivante :

$$Q = K_s * R_h^{2/3} * S^{3/2}$$

Avec :

- Q : le débit dans la canalisation ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) ;
- K_s : le coefficient de Manning-Strickler, fonction de l'état de surface la canalisation (valeur conseillée : $70 \sim 75 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$) ;
- R_h : le rayon hydraulique de la canalisation, fonction de la hauteur d'eau (en m, voir annexes) ;
- S : la surface mouillée, fonction de la hauteur d'eau (en m^2 , voir annexes).

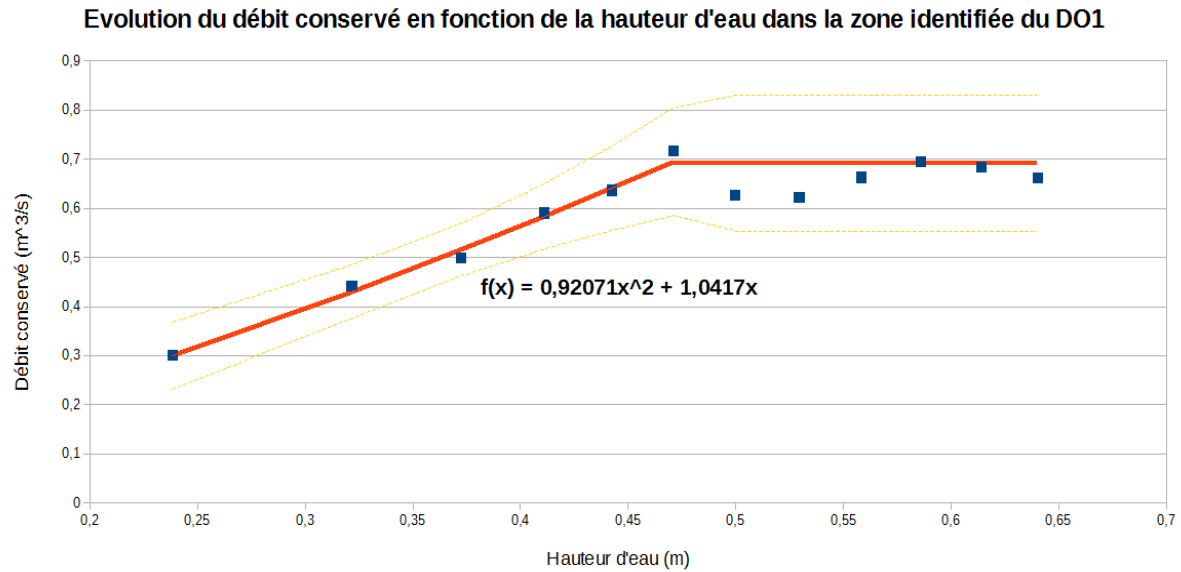


Figure VI: Loi reliant le débit conservé à la hauteur d'eau dans la zone identifiée. En bleu, les points des simulations, en rouge, la loi calculée, en ligne discontinue jaune, l'intervalle de confiance à 95 %.

Concernant la loi reliant le débit conservé à la hauteur d'eau dans la zone identifiée, pour une hauteur d'eau inférieure à 45 cm, nous retenons une loi de type $y = ax^2 + bx$, pour les hauteurs d'eau supérieure à 45 cm, on retient une loi constante du type $y = a$. La Figure VI représente cette loi, son équation, et les incertitudes établies sur cette loi. Pour les valeurs de débit inférieures au débit de référence de l'ouvrage (estimé à $0,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), On pourra simplement prendre la valeur du débit conservé égale au débit entrant dans l'ouvrage.

Concernant la loi reliant le débit déversé par la première zone de déversement à la hauteur d'eau mesurée dans la zone identifiée, nous retenons une loi du type $y = ax + b$. La Figure VII représente cette loi, son équation et les incertitudes établies sur cette loi.

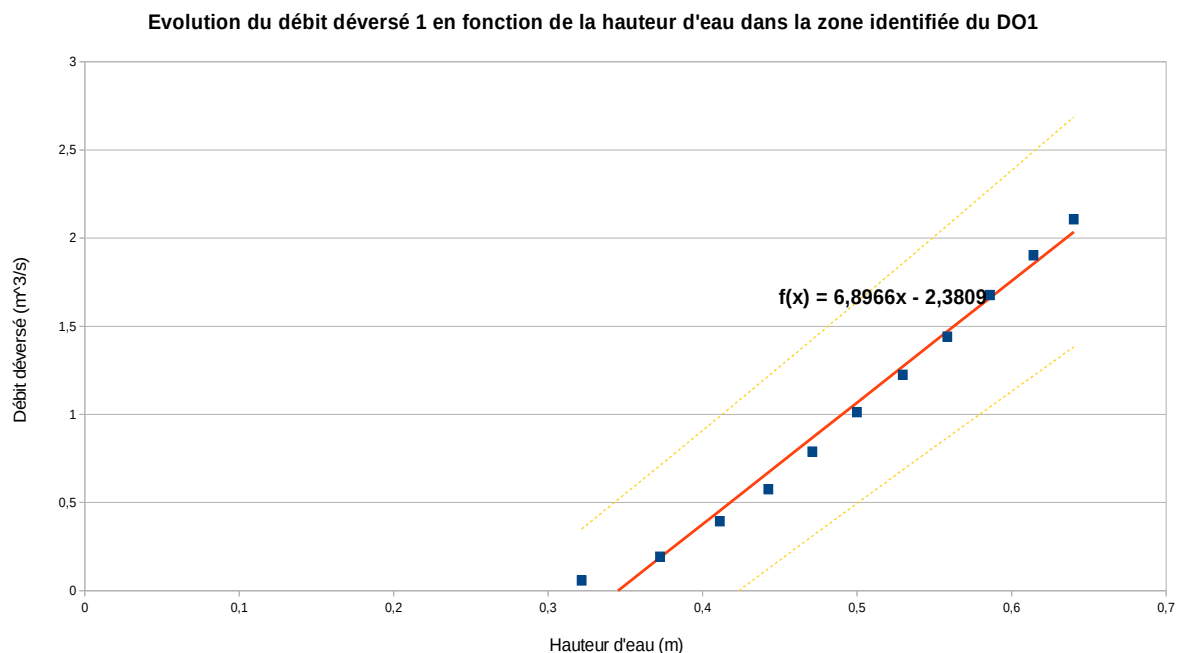


Figure VII: Loi reliant le débit déversé par la première zone de déversement à la hauteur d'eau dans la zone identifiée. En bleu, les points des simulations, en rouge, la loi calculée, en jaune, l'intervalle de confiance à 95 %.

Afin de renforcer la loi notamment pour les faibles débits déversés, une sonde de type tout-ou-rien placée de manière à pouvoir établir de manière certaine l'occurrence ou non d'un déversement peut permettre d'améliorer la définition du débit de référence de l'ouvrage. D'après les lignes d'eau observées pour les différents débits (voir annexes), la position idéale d'une sonde de type tout-ou-rien serait au début de la crête déversante.

Enfin, concernant la loi reliant le débit déversé par la deuxième partie du déversoir à la hauteur d'eau mesurée dans la zone identifiée, nous avons retenu une loi du type $y = ax + b$. La Figure VIII représente cette loi, son équation et les incertitudes établies sur cette loi.

Evolution du débit déversé 2 en fonction de la hauteur d'eau mesurée dans la zone identifiée du DO1

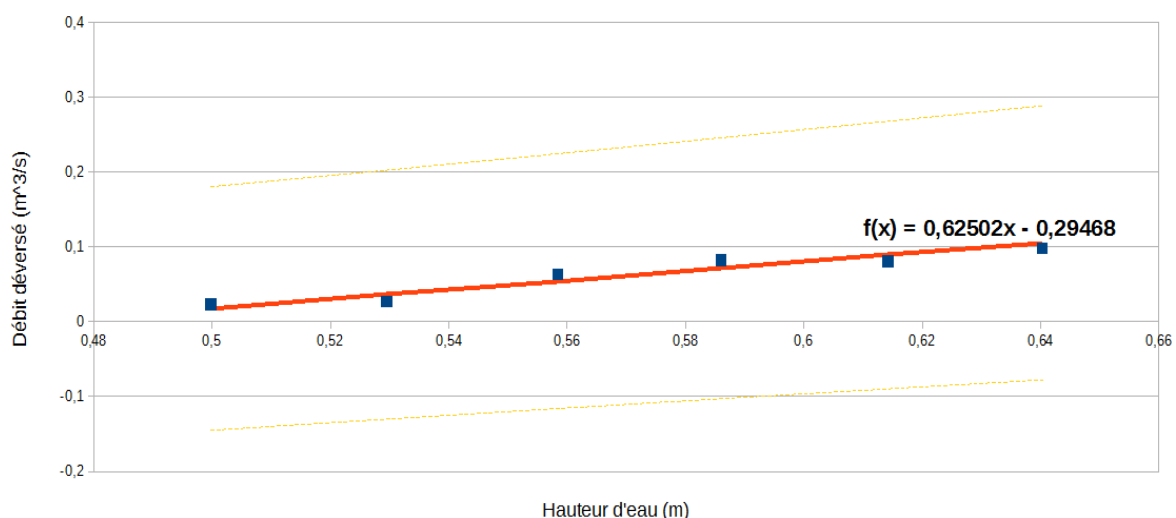


Figure VIII: Loi reliant le débit déversé dans la deuxième partie du déversoir à la hauteur d'eau mesurée dans la zone identifiée. Les points bleus sont les résultats des simulation, la ligne rouge représente la loi calculée, les lignes jaunes discontinues représentent l'intervalle de confiance à 95 %.

Cette loi est la plus incertaine de toute, du fait des très faibles valeurs de débit déversé, malgré un fort débit entrant. Comme pour le débit déversé précédent, une sonde tout-ou-rien permettant d'établir l'occurrence ou non d'un déversement pourra permettre une meilleure évaluation du premier débit entrant déversant. D'après les lignes d'eau observées pour les différents débits (voir annexes), la position idéale d'une sonde de type tout-ou-rien serait vers la fin de la crête déversante (au plus proche de la canalisation aval, sur la crête déversante).

Le détail du calcul des incertitudes sur ces différentes lois de fonctionnement est détaillé en annexes.

7. Préconisation de mise en conformité du site

Les données actuelles de l'Agglomération d'Annemasse montrent que le DO1 déverse plus que les 20 jours calendaires autorisés par an. En l'état, il n'est donc pas conforme aux exigences réglementaires de l'arrêté du 21 juillet 2015. D'après les simulations 3D, c'est la première partie du déversoir qui pose problème et qui commence à déverser dès un débit entrant égal à $0,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Nous proposons de rehausser la crête déversante de cette première partie du déversoir, afin

qu'elle ne commence à déverser que lorsque la canalisation aval est mise en charge (soit un débit d'environ $0,65 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$). De plus, au vu du faible volume déversé par la seconde partie du déversoir, nous suggérons également de fermer cette partie, si la canalisation de décharge de la première partie déversante peut le supporter.

D'après les résultats de modélisation en 3D, une hausse de 30 cm pour la crête déversante de la première partie semble suffisant pour assurer de mettre en charge la canalisation aval de l'ouvrage et d'augmenter le débit de référence de l'ouvrage jusqu'à $0,650 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. On remarque en effet sur la Figure IX que pour un débit entrant de $0,650 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, la première zone de déversement pourvue de sa crête à 30 cm de haut ne déverse pas encore (le niveau de la surface libre est encore en dessous du niveau de la crête) et la canalisation aval est presque complètement en charge. La moindre augmentation de débit finira de mettre en charge la canalisation aval et marquera le début du déversement dans la première zone de déversement.

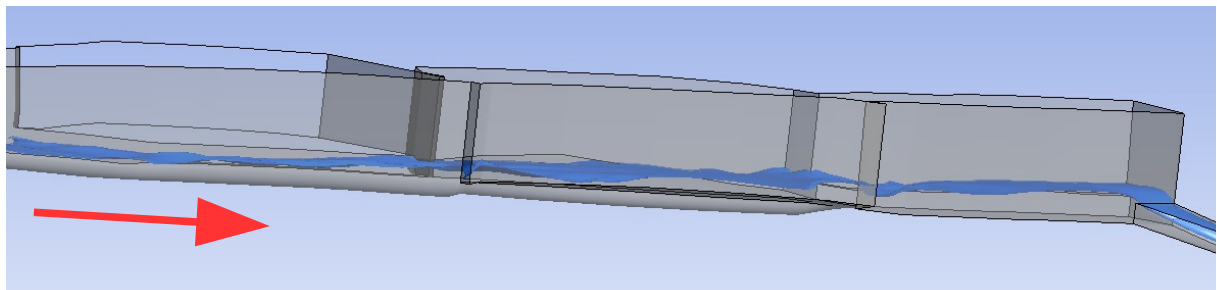


Figure IX: Surface libre numérique après hausse de la crête de la première partie déversante et fermeture de la seconde partie déversante pour un débit entrant égal à $0,650 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. L'écoulement va de gauche à droite. À gauche est représentée la première zone de déversement (pourvue d'une crête de 30 cm de haut), à droite la seconde zone de déversement (fermée) et la canalisation aval. La surface libre est représentée en bleu. La flèche rouge indique le sens de l'écoulement.

Avant de procéder aux travaux, il serait intéressant de récolter des données sur les débits qui transitent par le DO1 pendant un ou deux ans afin de connaître précisément le débit de référence à mettre en place pour que l'ouvrage soit conforme à l'exigence de fréquence de déversement (à savoir 20 jours calendaires maximum par an).

IV. Modélisation du DO₃

1. Analyse du fonctionnement hydraulique

La pente interne de l'ouvrage est de 1 % et la pente de la canalisation d'amenée d'eau est de 1,28 %. la présence d'un coude à l'amont de l'ouvrage laisse présager un écoulement très perturbé dans la chambre avec la déformation de la surface libre.

2. Le modèle 3D

En nous appuyant sur l'analyse hydraulique du site et de sa géométrie, nous sélectionnons l'approche adaptée aux conditions d'écoulement et obtenons nos premiers résultats de simulation. Nous avons choisi de simuler les 21 valeurs de débits suivantes : 0,300 m³.s⁻¹ ; 0,450 m³.s⁻¹ ; 0,600 m³.s⁻¹ ; 0,750 m³.s⁻¹ ; 1,000 m³.s⁻¹ ; 1,250 m³.s⁻¹ ; 1,500 m³.s⁻¹ ; 1,750 m³.s⁻¹ ; 2,000 m³.s⁻¹ ; 2,250 m³.s⁻¹ ; 2,500 m³.s⁻¹ ; 2,750 m³.s⁻¹ ; 3,000 m³.s⁻¹ ; 3,250 m³.s⁻¹ ; 3,500 m³.s⁻¹ ; 4,000 m³.s⁻¹ ; 4,500 m³.s⁻¹ ; 5,000 m³.s⁻¹ ; 6,000 m³.s⁻¹ ; 7,000 m³.s⁻¹ et 8,000 m³.s⁻¹. Cette gamme de débits s'appuie sur les résultats de simulation du logiciel MikeUrban (débit entrant dans l'ouvrage pour une période de retour de 4,4 ans égal à 4,990 m³.s⁻¹ ; débit entrant dans l'ouvrage pour une période de retour de 10 ans égal à 9,100 m³.s⁻¹) et sur les résultats du logiciel HSL (débit maximal à 8 m³.s⁻¹).

Le maillage retenu est composé de 3 200 000 mailles hexaédriques, de tailles variables (entre 2 et 4 cm pour la longueur, entre 1 et 3 cm pour la largeur, entre 1 et 3 cm pour la hauteur). Un exemple de simulation est montré en Figure X.

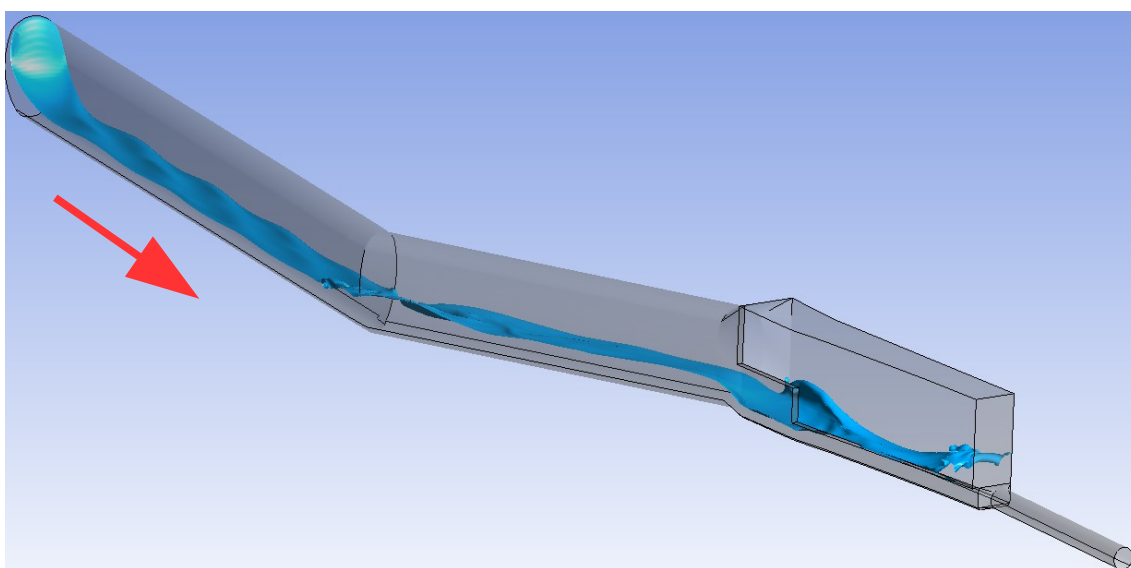


Figure X: Exemple de résultats de simulation, pour un débit entrant égal à 1,000 m³.s⁻¹. La flèche rouge indique le sens de l'écoulement. On observe une grande vague en entrée de déversoir qui déforme la surface libre. Le ressaut en sortie de chambre de déversement est important.

3. Résultats

On observe dans la canalisation amont un régime d'écoulement torrentiel, avec influence amont. Le coude présent à l'amont de l'ouvrage impose un passage en régime fluvial. Un ressaut se forme donc. Cette zone permet de s'assurer que les conditions d'écoulements ne sont pas influencées par les paramètres d'entrée. De plus, il ralentit l'écoulement qui repasse en régime torrentiel après le coude. Le **débit de référence** de l'ouvrage a été identifié et est égal à **0,300 m³.s⁻¹**.

Il faut maintenant déterminer la zone d'instrumentation qui permettra de récolter des données fiables pour la plus large gamme de débits possible.

4. Position du capteur

L'analyse des 21 simulations présentées montre deux zones possibles d'instrumentation : une située dans la canalisation amont, peu avant la chambre de l'ouvrage et une seconde dans la chambre de l'ouvrage, contre le mur opposé à la crête déversante (voir Figure XI et Figure XII).

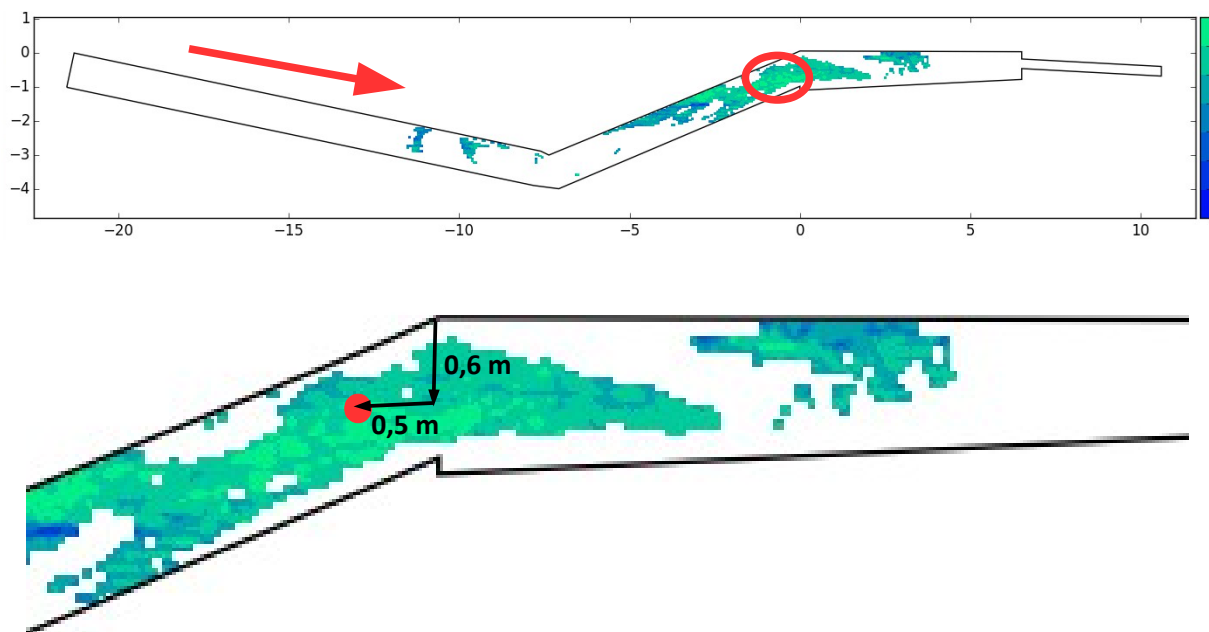


Figure XI: Emplacement du capteur dans la canalisation amont.

La zone d'implantation du capteur situé dans la canalisation amont permet de récolter des données fiables mais seulement jusqu'à un débit entrant égal à 3,500 m³.s⁻¹. Après ce débit, la hauteur d'eau dans la canalisation est trop élevée (proche de la mise en charge) et cette implantation ne permet pas de suivre les débits supérieurs.

La zone d'implantation du capteur situé dans la chambre de l'ouvrage permet de suivre toute la gamme de débits simulée, mais présente l'inconvénient d'avoir des incertitudes sur la mesure de hauteur d'eau plus élevées.

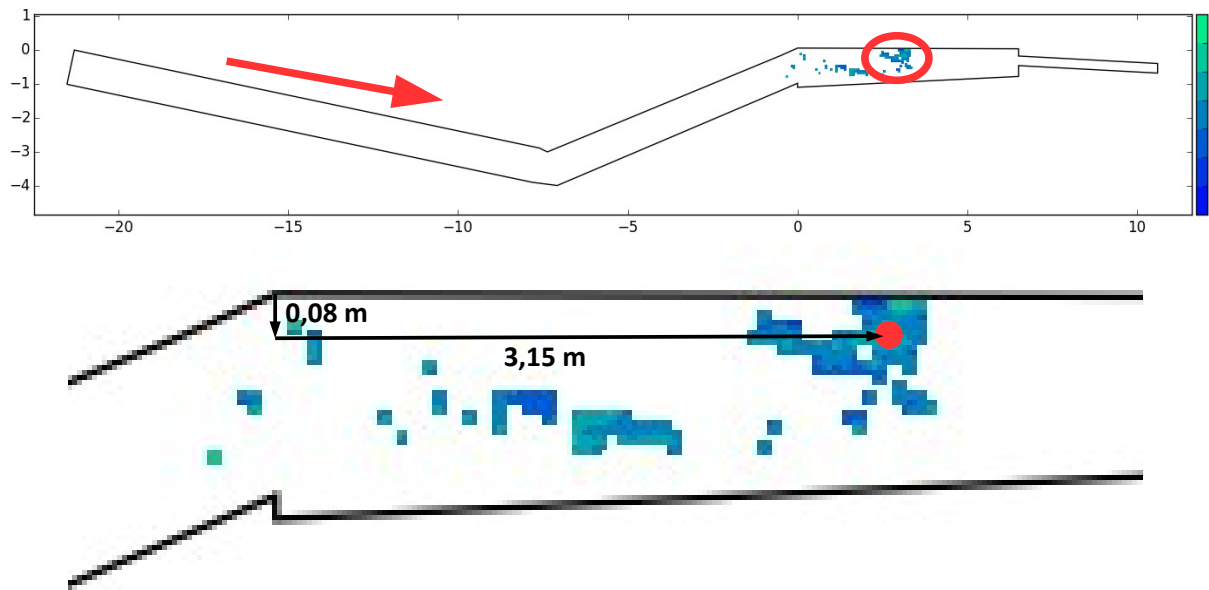


Figure XII: Emplacement du capteur dans la chambre du déversoir.

5. Détermination de la loi reliant la hauteur d'eau mesurée au débit déversé

En traçant l'évolution des débits entrant, conservés et déversés en fonction de la hauteur d'eau mesurée dans les zones identifiées précédemment, nous obtenons les courbes montrées en Figure XIII pour le capteur de la canalisation amont et en Figure XIV pour le capteur de la chambre, ci-après.

Lois de fonctionnement du DO3 pour un capteur implanté dans la canalisation amont

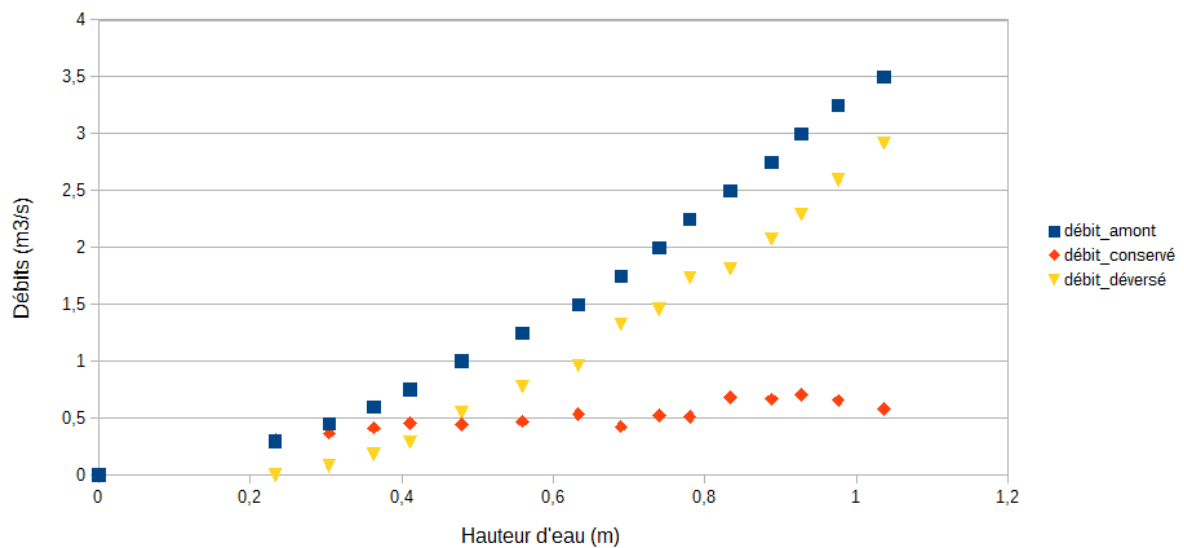


Figure XIII: Evolution des débits entrants, conservés et déversés en fonction de la hauteur d'eau mesurée pour le capteur situé dans la canalisation amont.

Lois de fonctionnement du DO3 pour un capteur implanté dans la chambre du déversoir

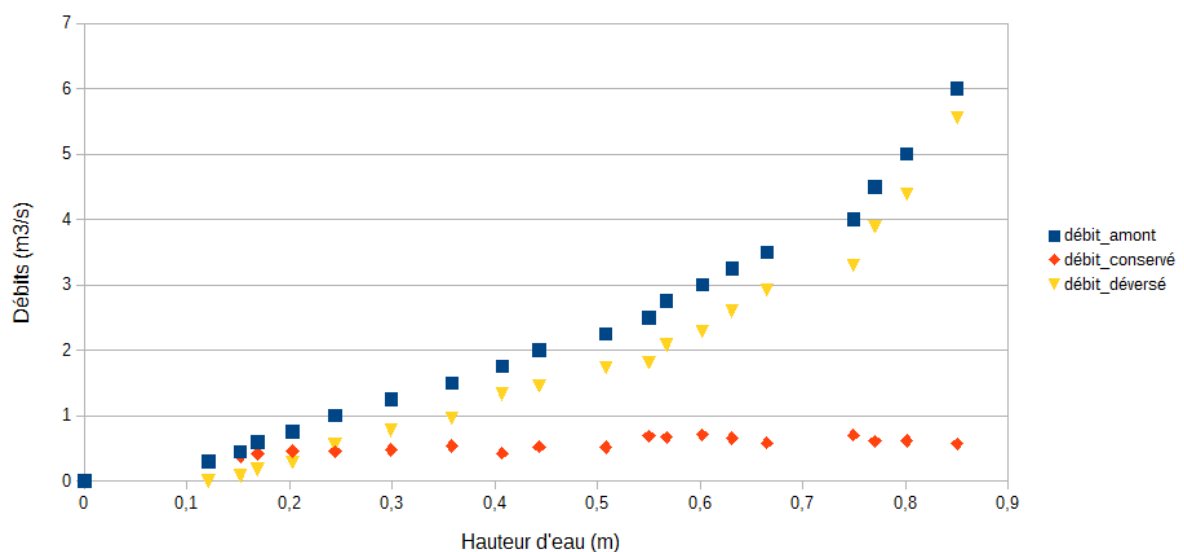


Figure XIV: Evolution des débits entrants, conservés et déversés en fonction de la hauteur d'eau mesurée pour le capteur situé dans la chambre du déversoir.

Ces courbes montrent que le DO3 commence à déverser alors que le débit aval n'est pas encore stabilisé. Le déversement commence donc trop tôt. Néanmoins, on remarque que le débit conservé se stabilise aux alentours de 0,600 m³.s⁻¹ et n'augmente plus par la suite. Une fois ce débit conservé atteint, le déversoir fonctionne bien et évacue le surplus vers le milieu naturel.

6. Étude des incertitudes

Pour chacune des 6 lois de fonctionnement du DO₃ (débit entrant en fonction de la hauteur d'eau, débit conservé en fonction de la hauteur d'eau et débit déversés en fonction de la hauteur d'eau pour les deux implantations de capteur identifiées), nous étudions les incertitudes à l'aide de régressions linéaires ou de la méthode de Williamson.

Concernant la loi reliant le débit entrant dans le DO₃ à la hauteur d'eau mesurée dans la zone identifiée dans la canalisation amont, une loi de type $y = ax^2 + bx$ est retenue. La Figure XV représente cette loi, son équation, ainsi que les incertitudes établies sur cette loi.

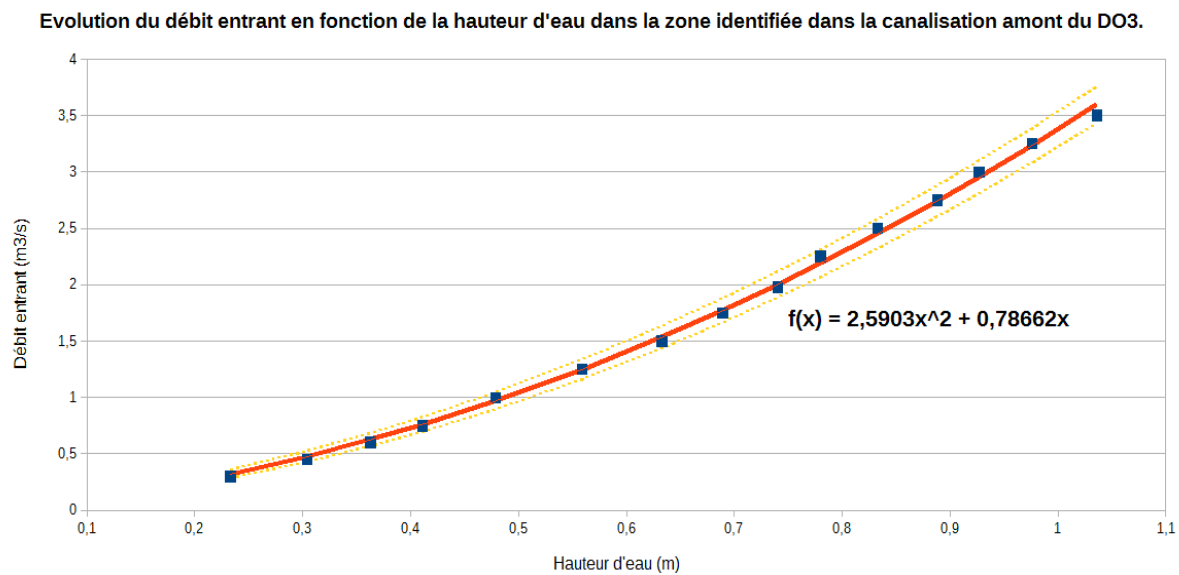


Figure XV: Loi reliant le débit entrant dans le déversoir à la hauteur d'eau mesurée dans la zone identifiée dans la canalisation amont. Les points bleus sont les résultats des simulation, la ligne rouge représente la loi calculée, les lignes jaunes discontinues représentent l'intervalle de confiance à 95 %.

Concernant la loi reliant le débit conservé par le DO₃ à la hauteur d'eau mesurée dans la zone identifiée dans la canalisation amont, une loi de type $y = ax^2 + bx$ est retenue. La Figure XVI représente cette loi, son équation, ainsi que les incertitudes établies sur cette loi.

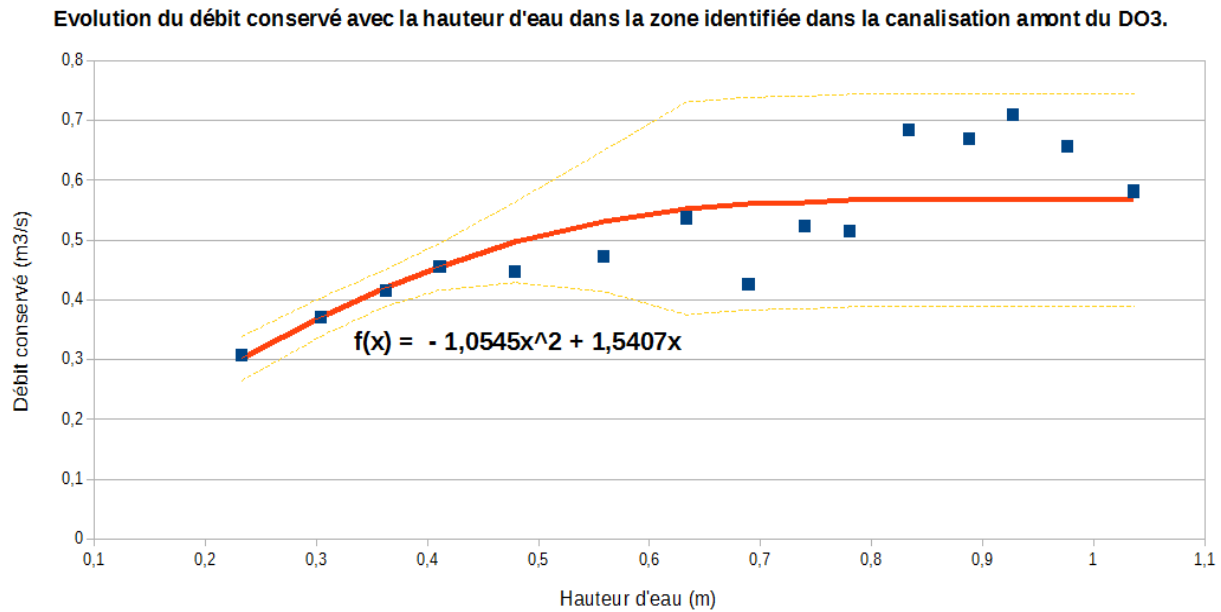


Figure XVI : Loi reliant le débit conservé par le déversoir à la hauteur d'eau mesurée dans la zone identifiée dans la canalisation amont. Les points bleus sont les résultats des simulation, la ligne rouge représente la loi calculée, les lignes jaunes discontinues représentent l'intervalle de confiance à 95 %.

On remarque que ce débit est assez incertain une fois la mise en charge de la canalisation aval atteinte. Cela est principalement dû à l'écoulement dans la chambre qui apporte beaucoup d'énergie cinétique. La condition aval d'entonnement liée à la canalisation aval n'arrive pas à transformer cette énergie cinétique en énergie potentiel. Le régime fluvial n'arrive pas à s'établir et l'embouchure de la canalisation est continuellement prise dans un ressaut hydraulique (voir les différentes lignes d'eau pour le DO3 en annexes). On a donc un écoulement très variable à cet endroit du déversoir et par nature très incertain. Nous suggérons de vérifier systématiquement le débit conservé fourni par cette loi en le confrontant au débit conservé obtenu par différence entre débit entrant et débit déversé fourni par nos lois de fonctionnement.

Concernant la loi reliant le débit déversé par le DO3 à la hauteur d'eau mesurée dans la zone identifiée dans la canalisation amont, une loi de type $y = ax^2 + bx + c$ est retenue. La Figure XVII représente cette loi, son équation, ainsi que les incertitudes établies sur cette loi.

Evolution du débit déversé en fonction de la hauteur d'eau dans la zone identifiée dans la canalisation amont du DO3.

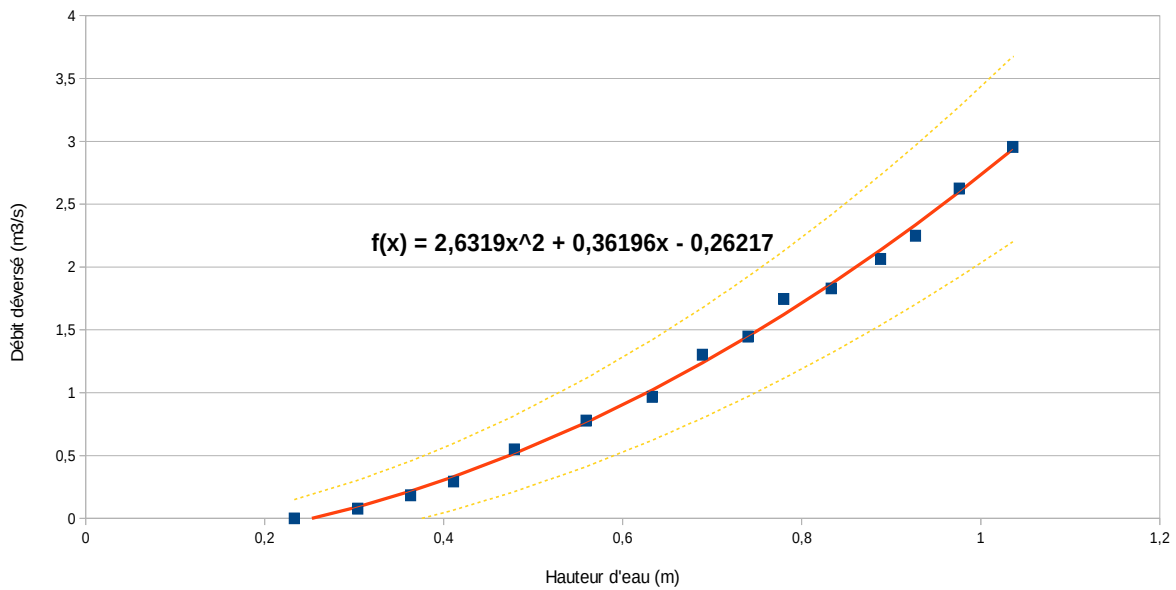


Figure XVII: Loi reliant le débit déversé par le déversoir à la hauteur d'eau mesurée dans la zone identifiée dans la canalisation amont. Les points bleus sont les résultats des simulation, la ligne rouge représente la loi calculée, les lignes jaunes discontinues représentent l'intervalle de confiance à 95 %.

Concernant la loi reliant le débit entrant dans le DO3 à la hauteur d'eau mesurée dans la zone identifiée dans la chambre du déversoir, une loi de type $y = ax^2 + bx$ est retenue. La Figure XVIII représente cette loi, son équation, ainsi que les incertitudes établies sur cette loi.

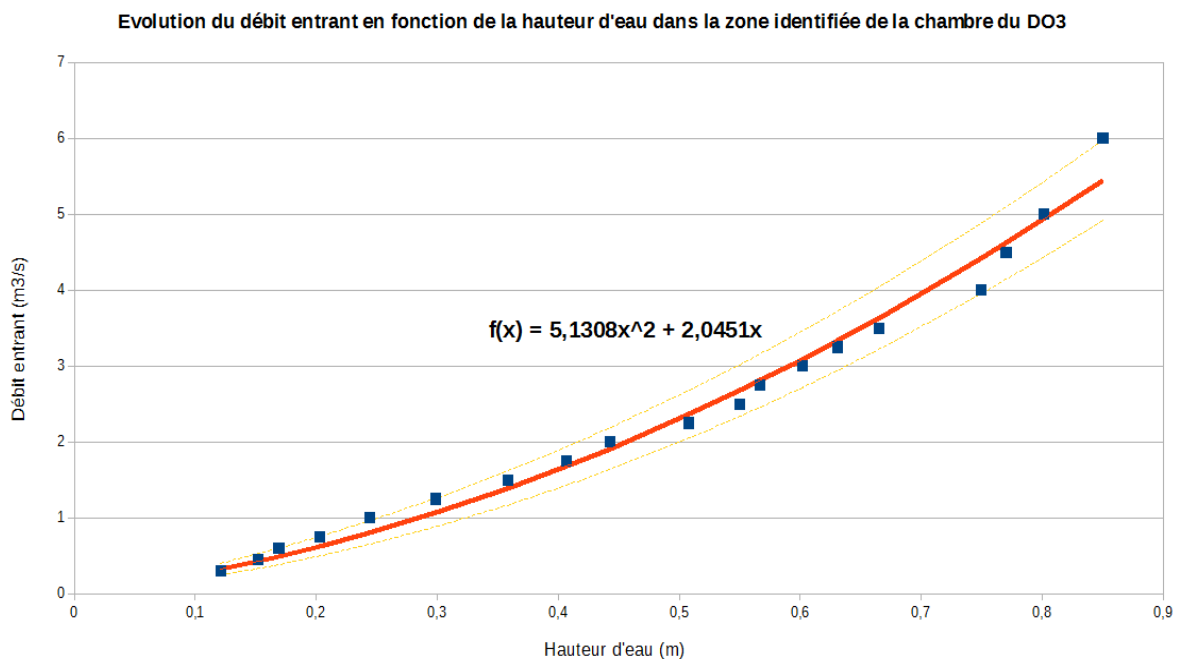


Figure XVIII : Loi reliant le débit entrant dans le déversoir à la hauteur d'eau mesurée dans la zone identifiée dans la chambre du déversoir. Les points bleus sont les résultats des simulation, la ligne rouge représente la loi calculée, les lignes jaunes discontinues représentent l'intervalle de confiance à 95 %.

Concernant la loi reliant le débit conservé par le DO3 à la hauteur d'eau mesurée dans la zone identifiée dans la chambre du déversoir, une loi de type $y = ax^2 + bx$ est retenue. La Figure XIV représente cette loi, son équation, ainsi que les incertitudes établies sur cette loi.

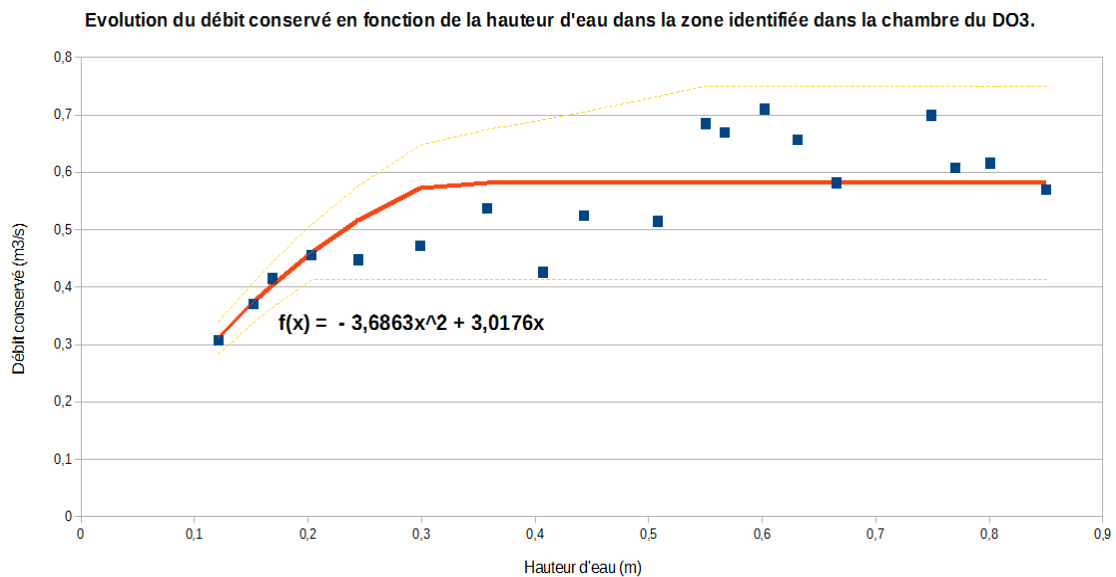


Figure XIX: Loi reliant le débit conservé par le déversoir à la hauteur d'eau mesurée dans la zone identifiée dans la chambre du déversoir. Les points bleus sont les résultats des simulation, la ligne rouge représente la loi calculée, les lignes jaunes discontinues représentent l'intervalle de confiance à 95 %.

À nouveau, on remarque que le débit conservé possède des incertitudes élevées dès que la canalisation aval est en charge pour les mêmes raisons citées précédemment. Les préconisations sont applicables ici, à savoir une confrontation systématique au débit conservé obtenu par différence des débits entrant et déversé.

Concernant la loi reliant le débit déversé par le DO3 à la hauteur d'eau mesurée dans la zone identifiée dans la chambre du déversoir, une loi de type $y = ax^2 + bx + c$ est retenue. La Figure XX représente cette loi, son équation, ainsi que les incertitudes établies sur cette loi.

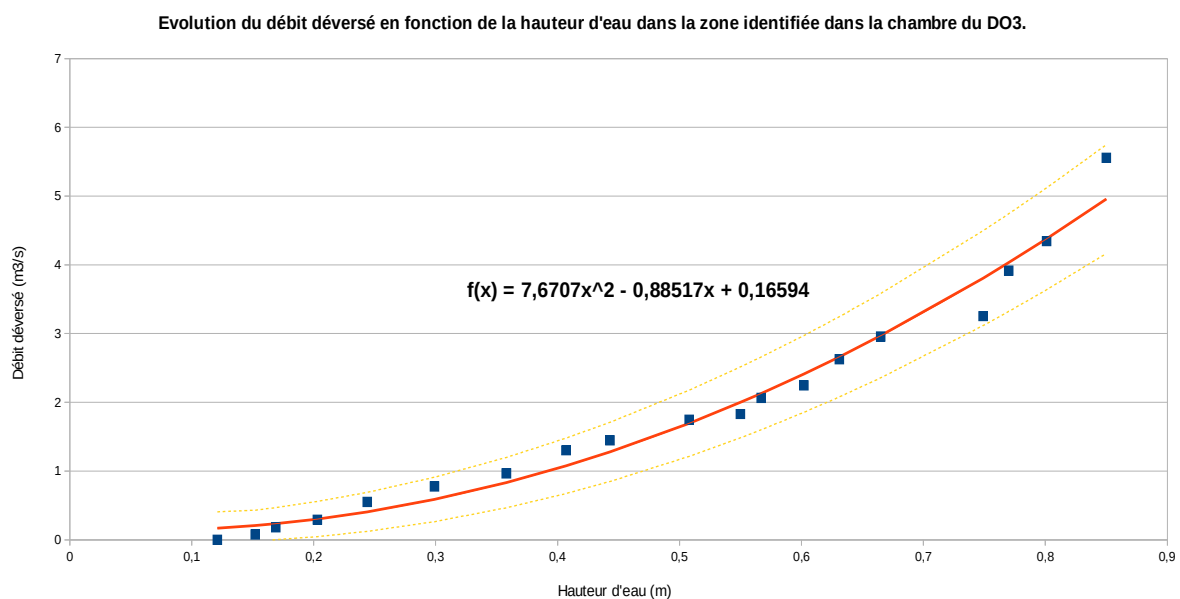


Figure XX: Loi reliant le débit déversé par le déversoir à la hauteur d'eau mesurée dans la zone identifiée dans la chambre du déversoir. Les points bleus sont les résultats des simulation, la ligne rouge représente la loi calculée, les lignes jaunes discontinues représentent l'intervalle de confiance à 95 %.

Comme expliquer précédemment, on remarque que les lois obtenues à partir de la mesure dans la chambre sont légèrement plus incertaine, mais couvre une gamme de débit plus large que les lois obtenues à partir de la mesure dans la canalisation amont du déversoir. Nous suggérons l'établissement des deux capteurs dans un premier temps afin de les confronter l'un à l'autre. De plus, avec une période d'observation suffisante, il sera possible de connaître la fréquence de mise en charge de la canalisation amont. Une fois cette fréquence connue, une décision plus pertinente pourra être prise quant au maintien ou non des deux capteurs.

V. Modélisation du DO4

1. Analyse du fonctionnement hydraulique

La pente interne de l'ouvrage est de 1,5 %, de même que celle de la canalisation d'amenée d'eau. On s'attend donc à observer un régime torrentiel et probablement un ressaut hydraulique quand la condition à l'aval de l'ouvrage sera assez forte pour imposer un régime d'écoulement fluvial (mise en charge de la canalisation).

2. Le modèle 3D

En nous appuyant sur l'analyse hydraulique du site et de sa géométrie, nous sélectionnons l'approche adaptée aux conditions d'écoulement et obtenons nos premiers résultats de simulation. Nous avons choisi de simuler les 10 valeurs de débits suivantes : $0,184 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$; $0,298 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$; $0,450 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$; $0,600 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$; $0,750 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$; $0,900 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$; $1 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$; $1,150 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$; $1,300 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ et le débit de référence de l'ouvrage. En l'absence d'information sur la gamme de débits habituellement observée dans l'ouvrage, ce panel permet d'obtenir une idée du comportement de l'ouvrage. À noter que si le plafond de la gamme de débits choisi s'avère ne pas être pertinent (particulièrement s'il est trop bas), une étude complémentaire devra être menée afin d'affiner la loi pour les événements extrêmes.

Le maillage utilisé est constitué de 2 223 700 mailles hexaédriques, de taille variable (entre 2 et 6 cm de long, entre 1 et 4 cm de large et entre 1 et 4 cm de haut). Un exemple de simulation est montré en Figure XXI.

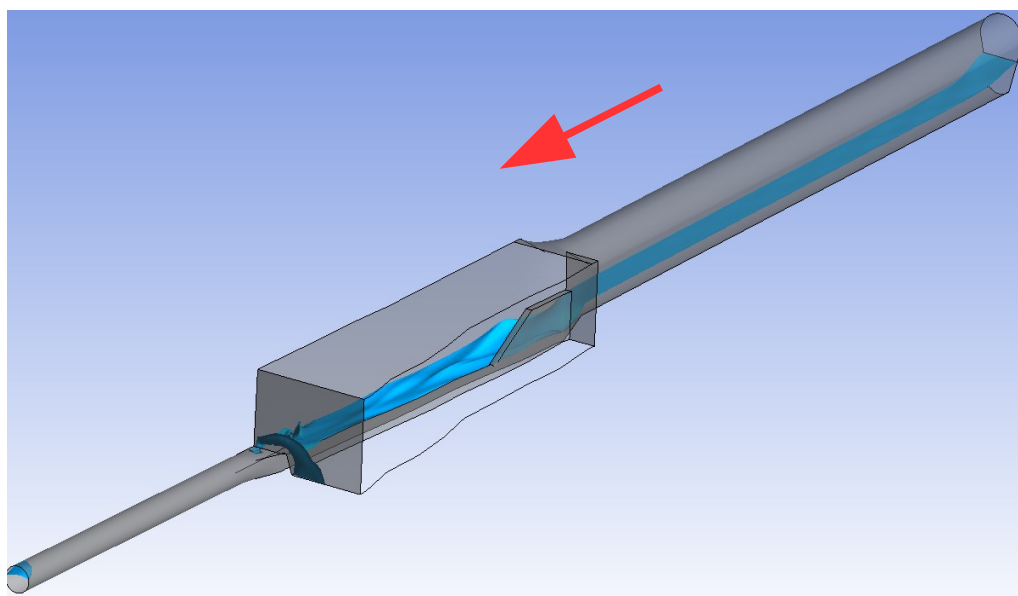


Figure XXI: Exemple de simulation pour le DO4, pour un débit entrant de $0,450 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. La flèche rouge indique le sens de l'écoulement.

3. Résultats

On observe tout d'abord qu'un ressaut important se forme à la sortie de la chambre de déversement. Cette zone permet de s'assurer que les conditions d'écoulements ne sont pas influencées par les paramètres d'entrée. La canalisation amont étant régulière elle permet la formation d'une zone propice à l'instrumentation. Le rétrécissement à l'entrée de la chambre induit une surface perturbée dans l'ouvrage, ce qui rend la mesure difficile dans la chambre de déversement. On observe le **débit de référence** de l'ouvrage à **0,110 m³.s⁻¹**.

4. Position du capteur

L'analyse des simulations pour les 10 débits sélectionnés montrent que le DO4 est propice à la mesure. En effet, nous avons pu identifier une zone pour laquelle le gradient de hauteur d'eau est faible (inférieur à 10 %) et dans laquelle les hauteurs d'eau d'un débit à l'autre varient d'au moins 2 cm. Ces deux conditions permettent l'établissement d'une loi bijective reliant la hauteur d'eau mesurée dans la zone identifiée au débit déversé. L'emplacement retenu pour le capteur est décrit en Figure XXII.

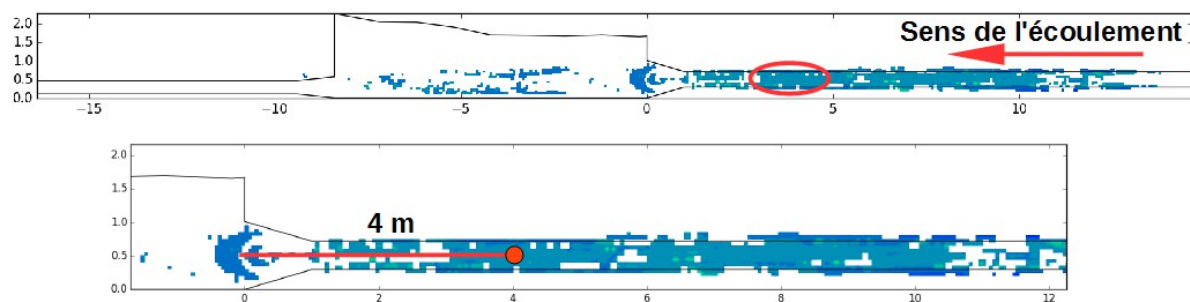


Figure XXII: Emplacement du capteur de mesure de hauteur d'eau à 4 m de l'entrée de la chambre et au milieu de la canalisation.

L'instrumentation se fait donc dans la canalisation amont du déversoir. La mesure de la hauteur d'eau à cet endroit permet de déduire les débits entrant, déversé et conservé.

5. Détermination de la loi reliant la hauteur d'eau mesurée au débit déversé

En traçant l'évolution des débits entrant, conservé et déversé en fonction de la hauteur d'eau mesurée dans la zone du capteur identifiée précédemment, nous obtenons les courbes montrées en Figure XXIII, ci-après.

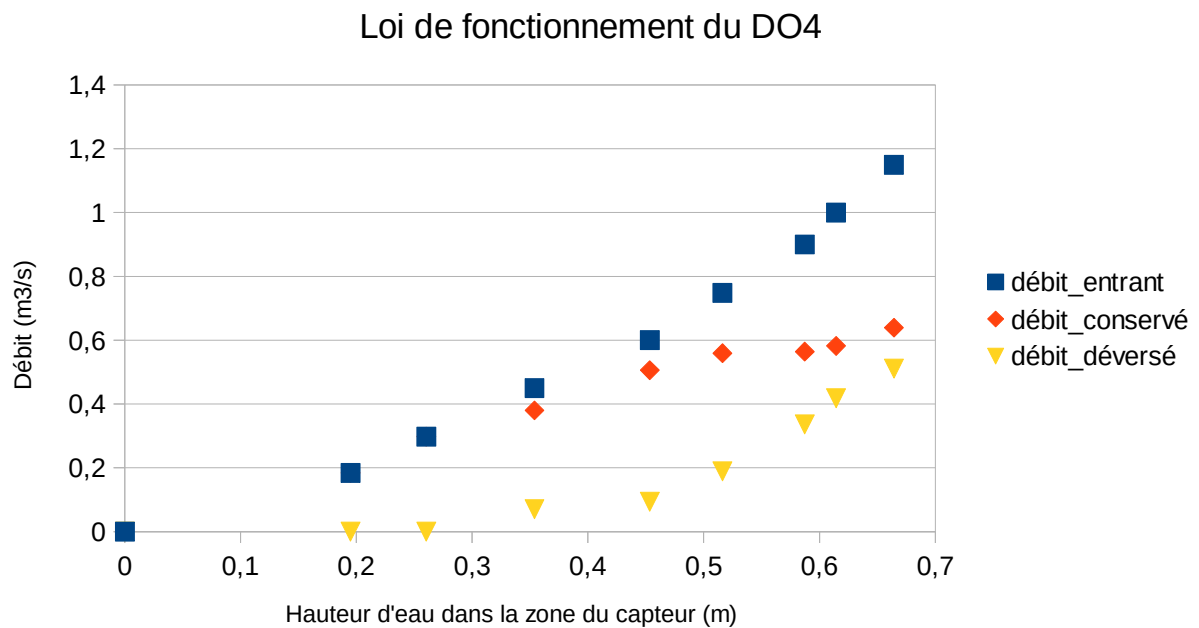


Figure XXIII: Lois entre la hauteur d'eau mesurée par le capteur dans la zone identifiée et les débits entrant, déversé et conservé.

Comme pour le DO3, on remarque que ce déversoir dysfonctionne dans le sens où le débit conservé continue d'augmenter après que le premier déversement ait eu lieu. Cela pose à nouveau la question de savoir si le déversoir surcharge l'aval ou s'il déverse trop tôt. C'est un comportement qui était prévisible, puisque le niveau de la crête déversante du DO4 est inférieure au niveau de la génératrice supérieure de la canalisation de décharge. Une modification de l'ouvrage est à envisager si ce comportement est effectivement un problème.

Enfin, comme pour le DO1, on observe une rupture de comportement pour les trois débits après que le début du déversement. Cela implique de définir deux lois différentes reliant la hauteur d'eau mesurée et les débits.

6. Incertitudes

Concernant la loi reliant le débit entrant à la hauteur d'eau mesurée dans la zone identifiée, nous avons retenu une loi du type $y = ax^2 + bx$. La Figure XXIV représente cette loi, son équation et les incertitudes établies sur cette loi.

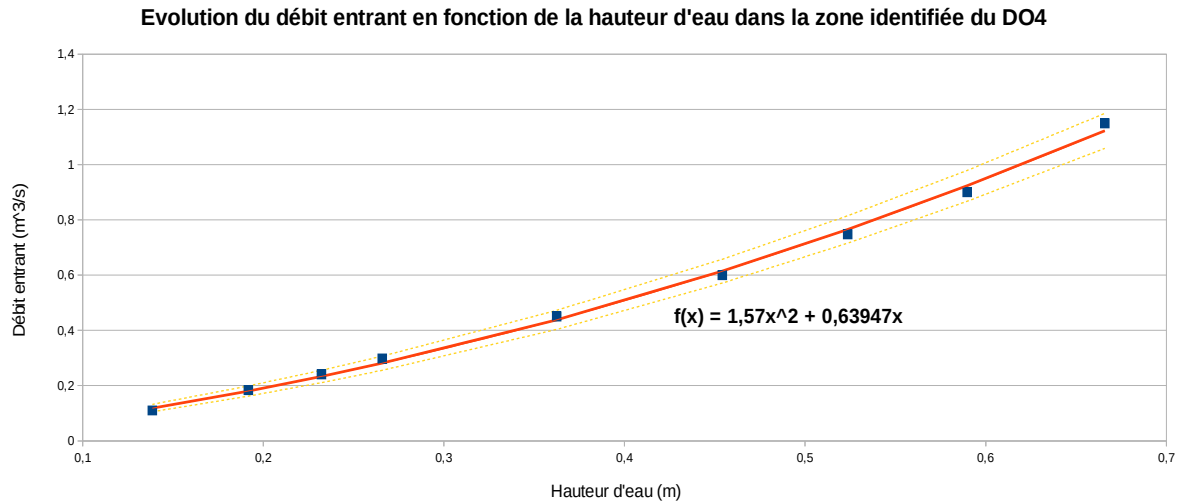


Figure XXIV: Loi reliant le débit entrant dans l'ouvrage à la hauteur d'eau mesurée dans la zone identifiée. Les points bleus représentent les résultats de simulations, la ligne rouge la loi calculée et les lignes jaunes discontinues l'intervalle de confiance à 95 %.

Concernant la loi reliant le débit conservé à la hauteur d'eau dans la zone identifiée, nous avons retenu une loi du type : $y = ax^2 + bx$ jusqu'à atteindre le débit de saturation de la canalisation aval, puis une loi constante du type $y = a$. La Figure XXV représente cette loi, son équation et les incertitudes estimées sur cette loi.

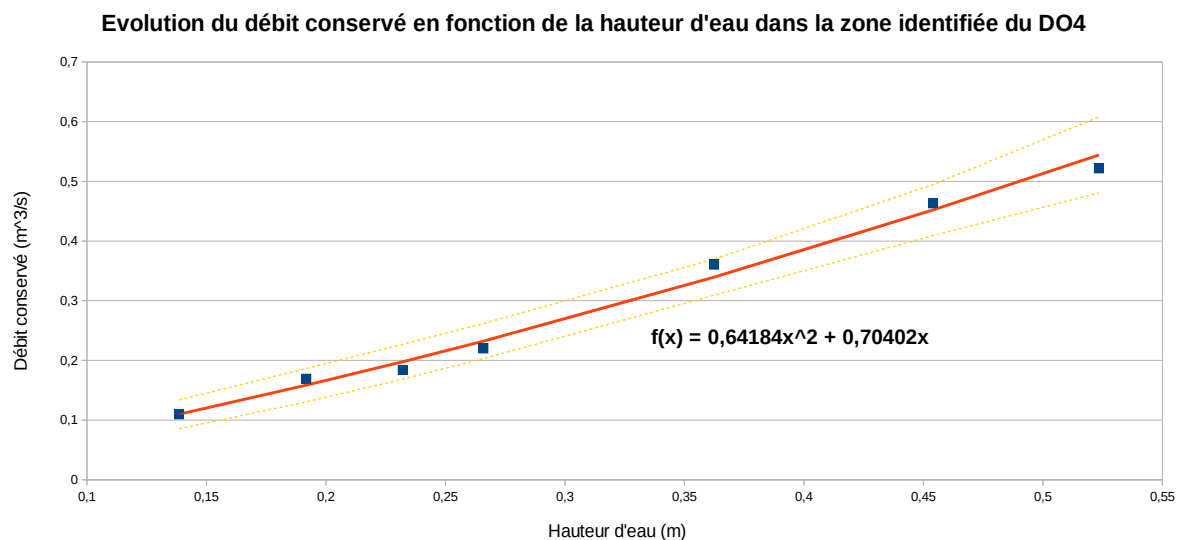


Figure XXV: Loi reliant le débit conservé à la hauteur d'eau dans la zone identifiée. Les points bleus représentent les résultats des simulations, la ligne rouge la loi calculée et les lignes jaunes discontinues l'intervalle de confiance à 95 %.

Pour les valeurs de débits entrants inférieures à la valeur du débit de référence de l'ouvrage (estimé à $0,110 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), il est préférable de prendre un débit conservé égal au débit entrant plutôt que de suivre la loi proposée.

Enfin, concernant la loi reliant le débit déversé à la hauteur d'eau dans la zone identifiée, nous avons retenu une loi de type $y = ax + b$. La Figure XXVI représente cette loi, son équation et les incertitudes estimées sur cette loi.

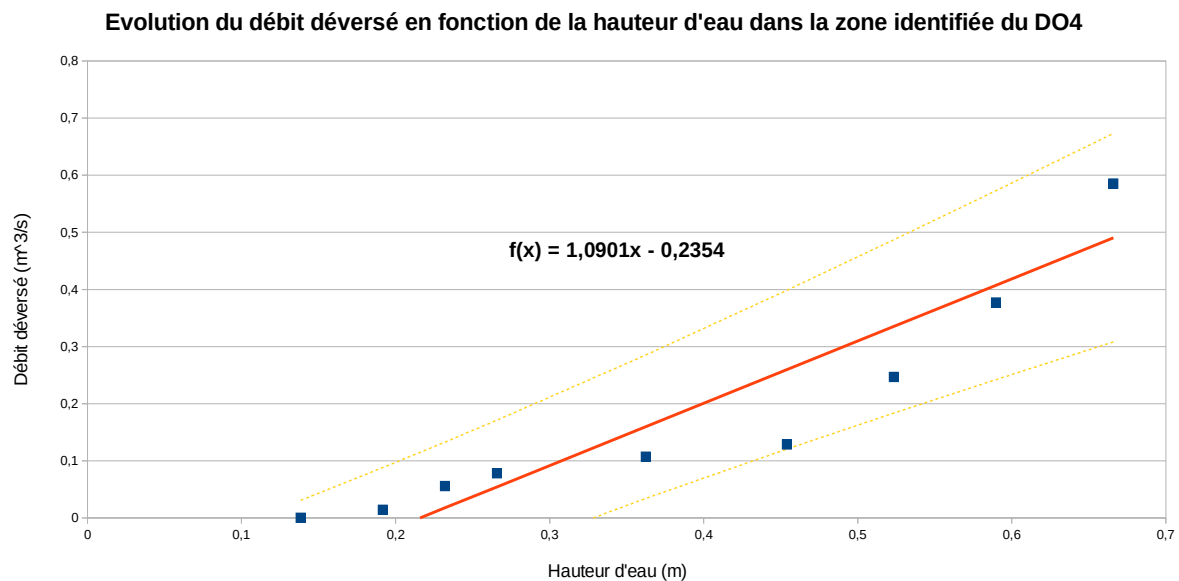


Figure XXVI: Loi reliant le débit déversé par l'ouvrage à la hauteur d'eau dans la zone identifiée. Les points bleus représentent les résultats de simulation, la ligne rouge la loi calculée, les lignes jaunes discontinues l'intervalle de confiance à 95 %.

Afin d'affiner la définition du débit de référence de l'ouvrage et de réduire les incertitudes pour de très faibles débits déversés, un complément d'instrumentation type sonde tout-ou-rien permettant de certifier l'occurrence ou non d'un déversement est à envisager.

Le détail du calcul des incertitudes sur ces différentes lois de fonctionnement est détaillé en annexes.

VI. Conclusions

D'après notre étude l'ensemble des déversoirs modélisés sont **instrumentables**.

Pour le **DO1** l'**instrumentation** peut être **effectuée** dans la **canalisation amont** avant la première chambre de déversement.

La loi de déversement est la suivante : $d_1 = 6,90 h_1 - 2,38$

et $d_2 = 0,63 h_1 - 0,29$

avec : d_1 : le débit déversé dans la première chambre de déversement

d_2 : le débit déversé dans la deuxième chambre de déversement

h_1 : la hauteur d'eau mesurée par le capteur à l'amont du déversoir DO1

Cependant, afin de rendre l'ouvrage conforme à la réglementation, des travaux s'imposent. Le **relèvement** de la première **crête de déversement** et la **fermeture** de la **deuxième chambre** permettrait cette mise en conformité. Une étude statistique est nécessaire pour déterminer les débits les plus fréquents et le débit limite à partir duquel l'ouvrage doit déverser.

Pour le **DO3**, la simulation a révélé deux zones **d'instrumentation** : une située dans la canalisation amont, une située dans la chambre du déversoir.

La loi de déversement pour le capteur dans la canalisation amont est :

$$d_{3CA} = 2,63 h_{3CH}^2 + 0,36 h_{3CH} - 0,26$$

La loi de déversement pour le capteur dans la chambre du déversoir est :

$$d_{3CH} = 7,67 h_{3CH}^2 - 0,89 h_{3CH} + 0,17$$

avec : d_{3CA} : le débit déversé pour le capteur situé dans la canalisation amont

d_{3CH} : le débit déversé pour le capteur situé dans la chambre du déversoir

h_{3CA} : la hauteur d'eau mesurée dans la canalisation amont

h_{3CH} : la hauteur d'eau mesurée dans la canalisation amont

Pour le **DO4**, la simulation a permis de voir que la chambre de déversement est trop perturbée pour être instrumentée. Le **capteur** de hauteur d'eau doit donc être **positionné à l'amont** de la chambre.

La loi de déversement est la suivante : $d_4 = 1,09 h_4 - 2,24$

avec : d_4 : le débit déversé dans la chambre de déversement



h_4 : la hauteur d'eau mesurée par le capteur à l'amont du déversoir DO4

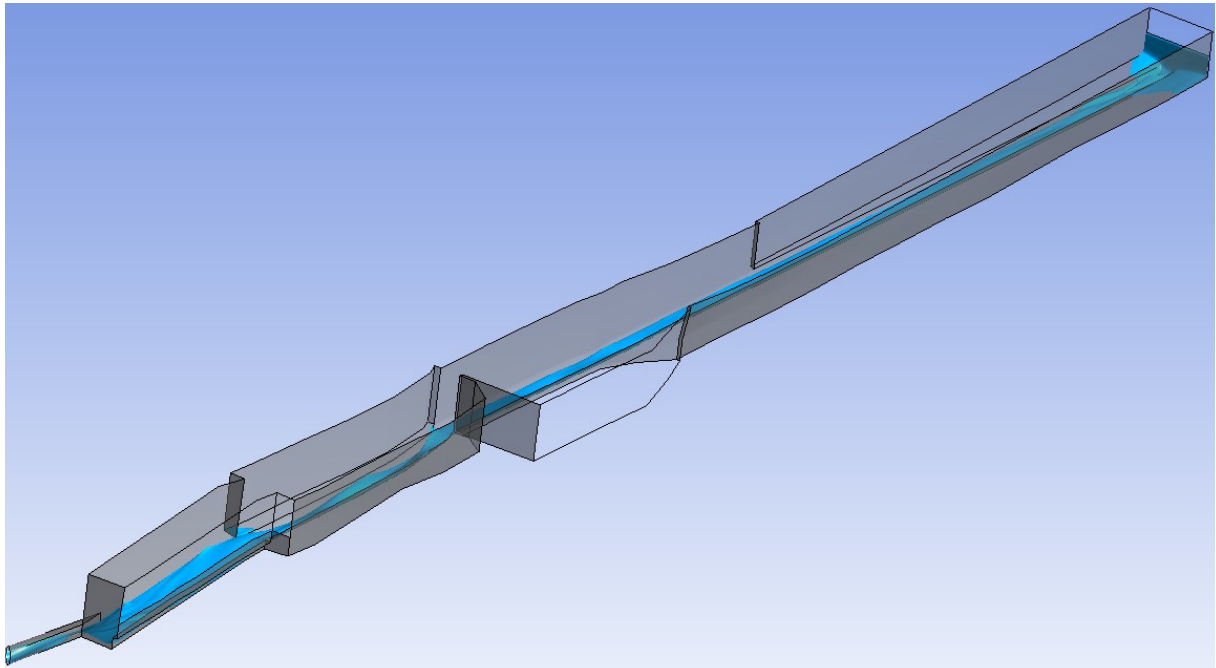
Les simulations 3D des déversoirs d'orage 1,3 et 4 ont permis de mieux comprendre leurs fonctionnements.

Une **campagne** de **validation** des lois déterminées est à **prévoir** pour vérifier les gammes de débits choisis pour les simulations.

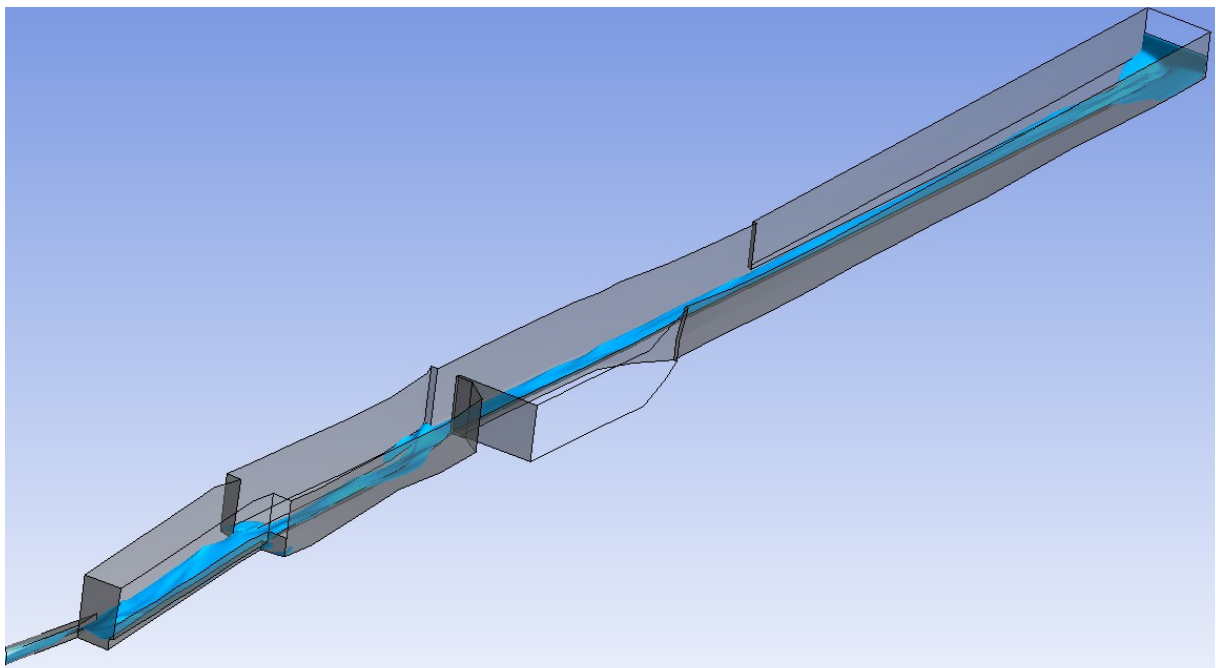
VII. Annexes

A1 - Lignes d'eau pour l'ouvrage DO1 en fonction du débit

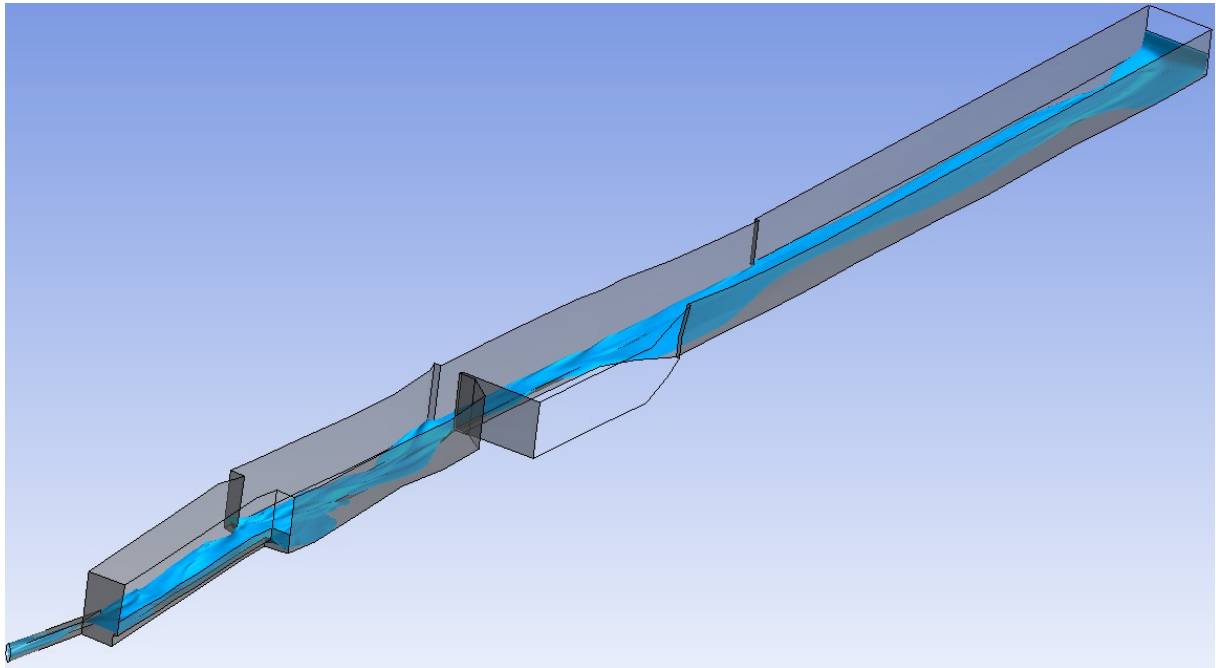
-0,25 m³.s⁻¹ :



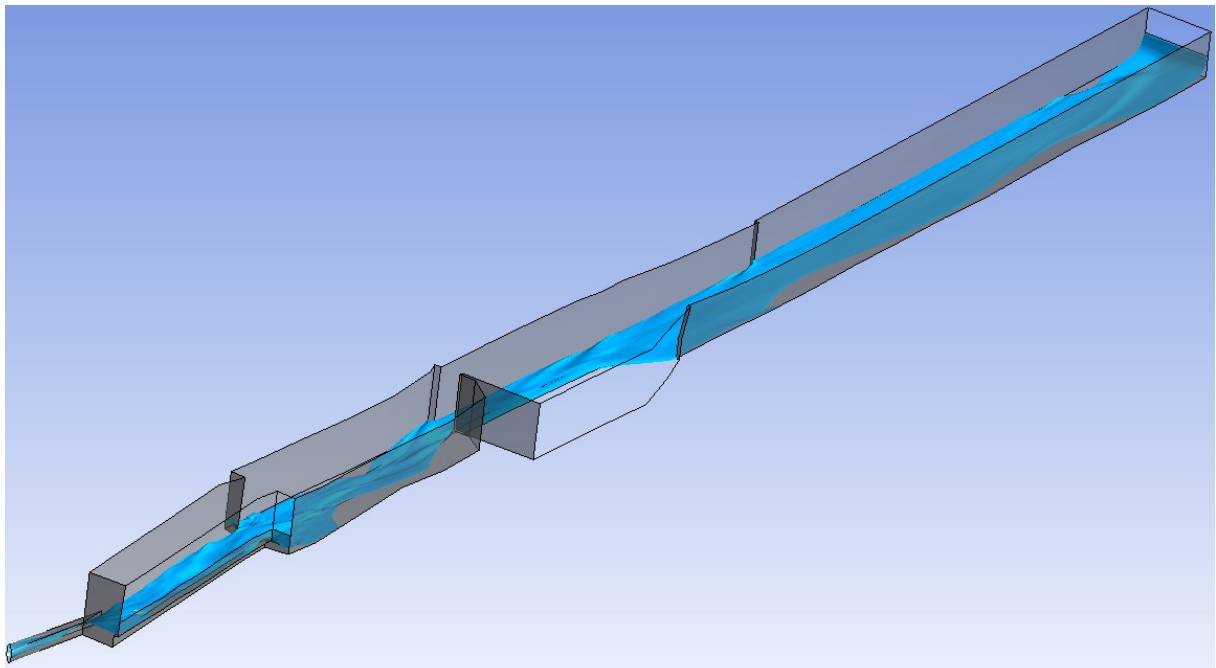
-0,30 m³.s⁻¹ :



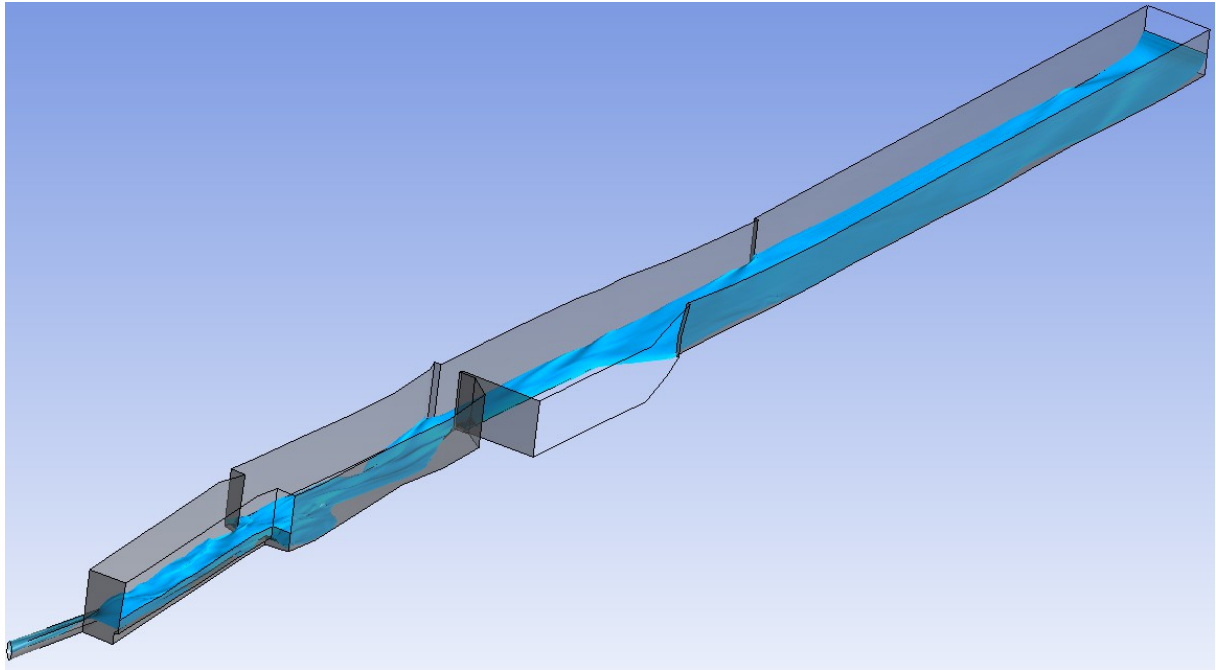
-0,50 m³.s⁻¹ :



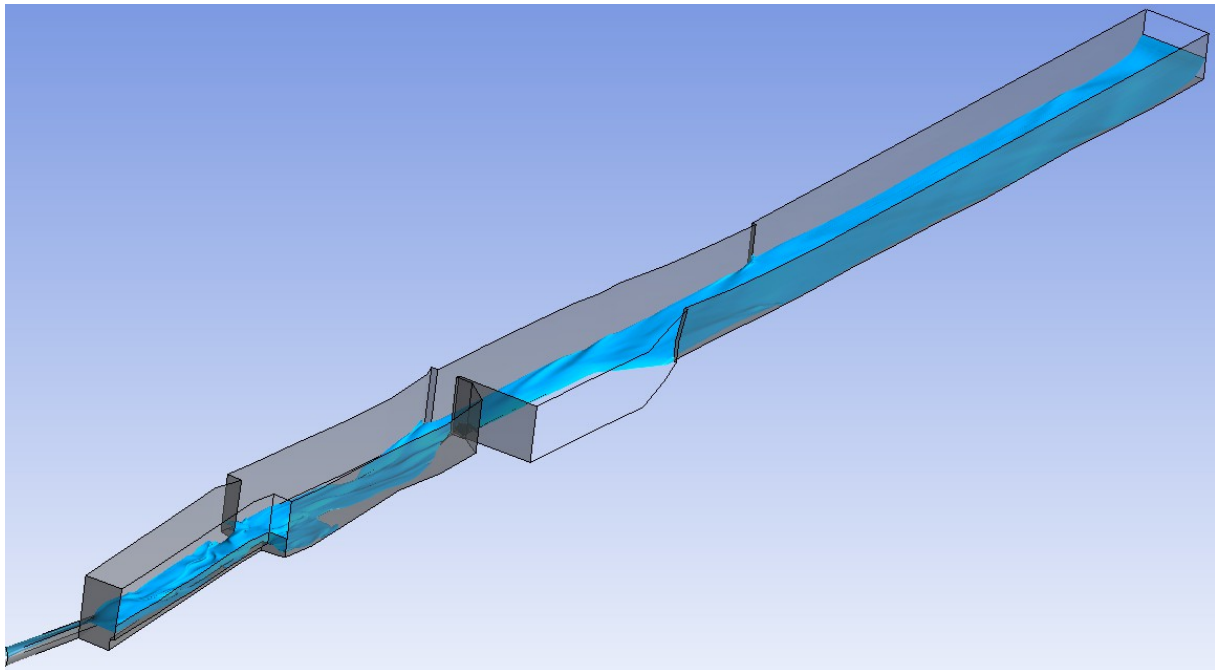
-0,75 m³.s⁻¹ :



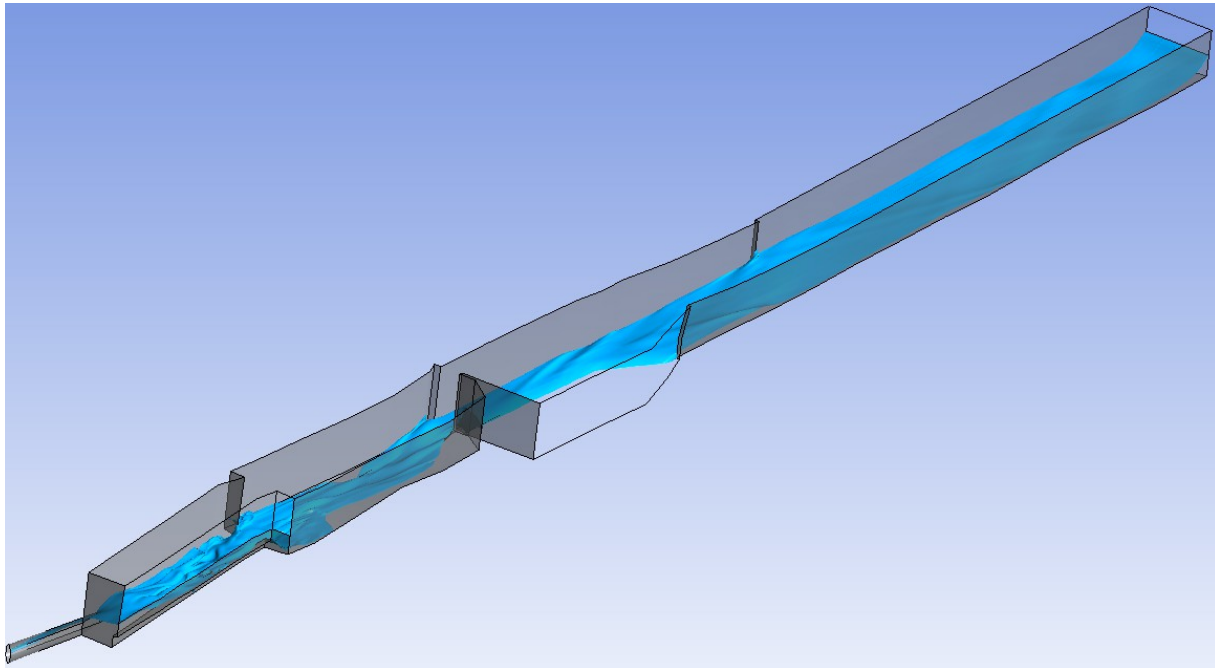
-1,00 m³.s⁻¹ :



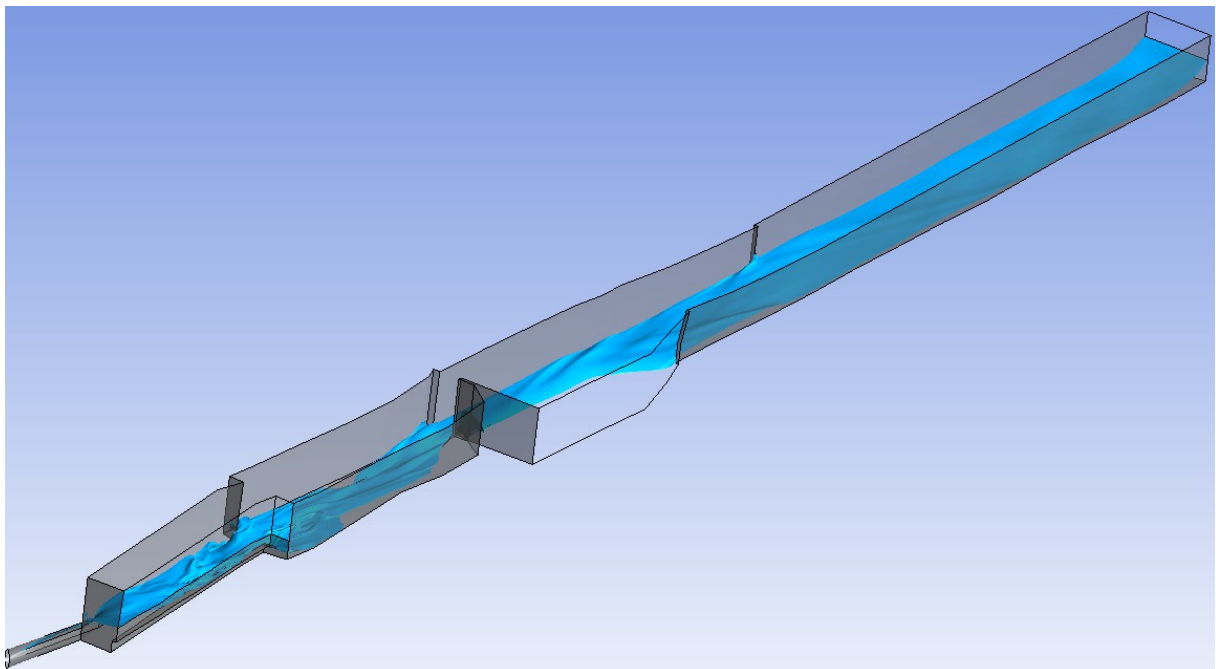
-1,25 m³.s⁻¹ :



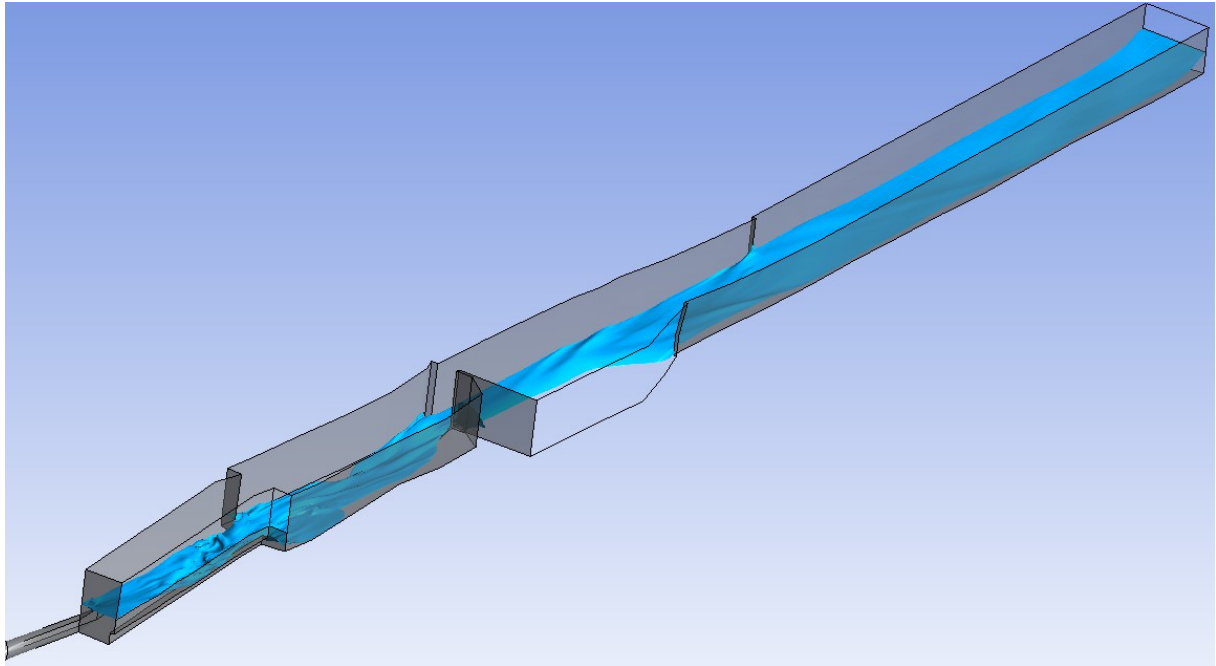
-1,50 m³.s⁻¹ :



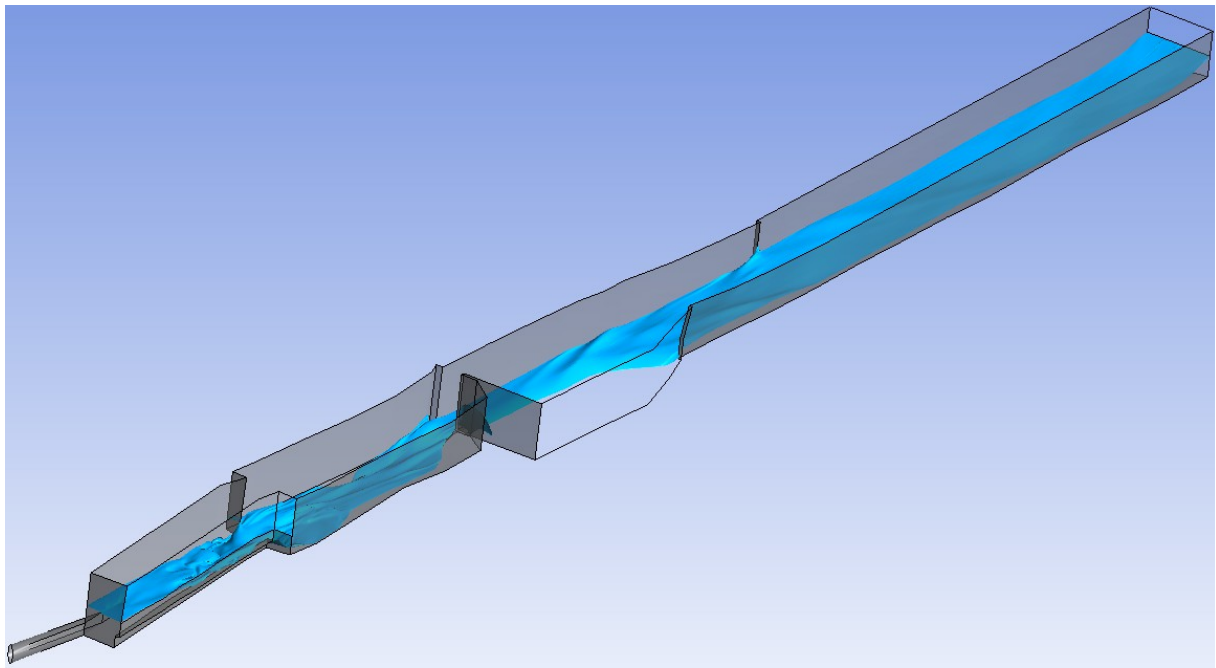
-1,75 m³.s⁻¹ :



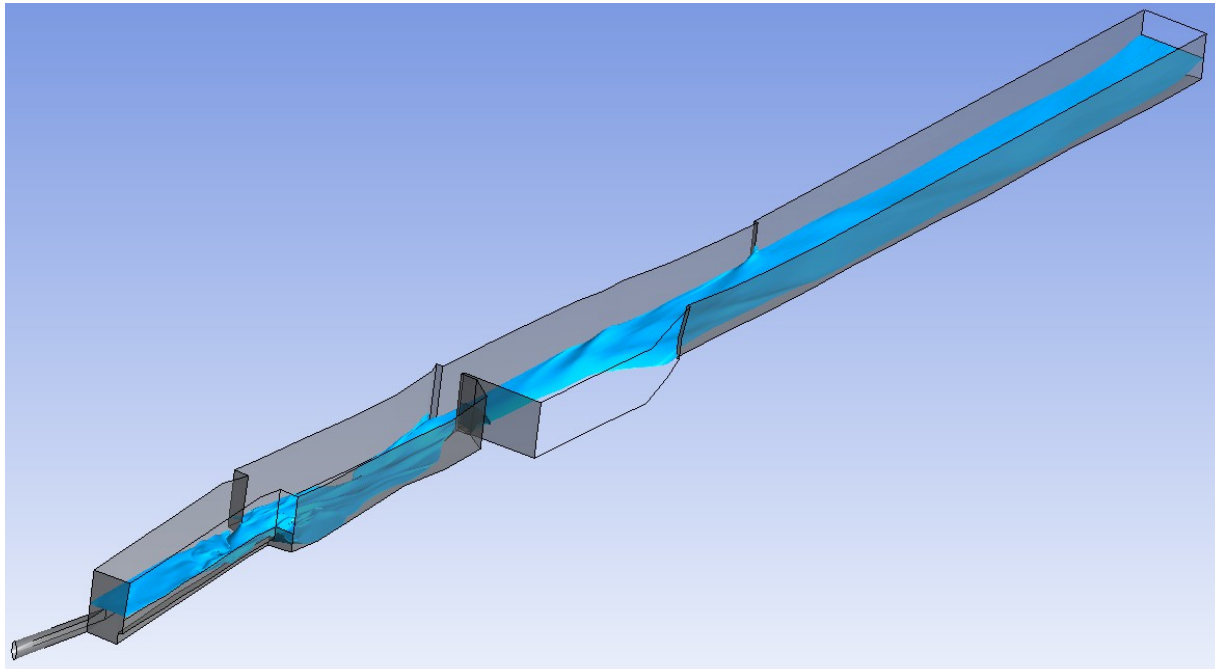
-2,00 m³.s⁻¹ :



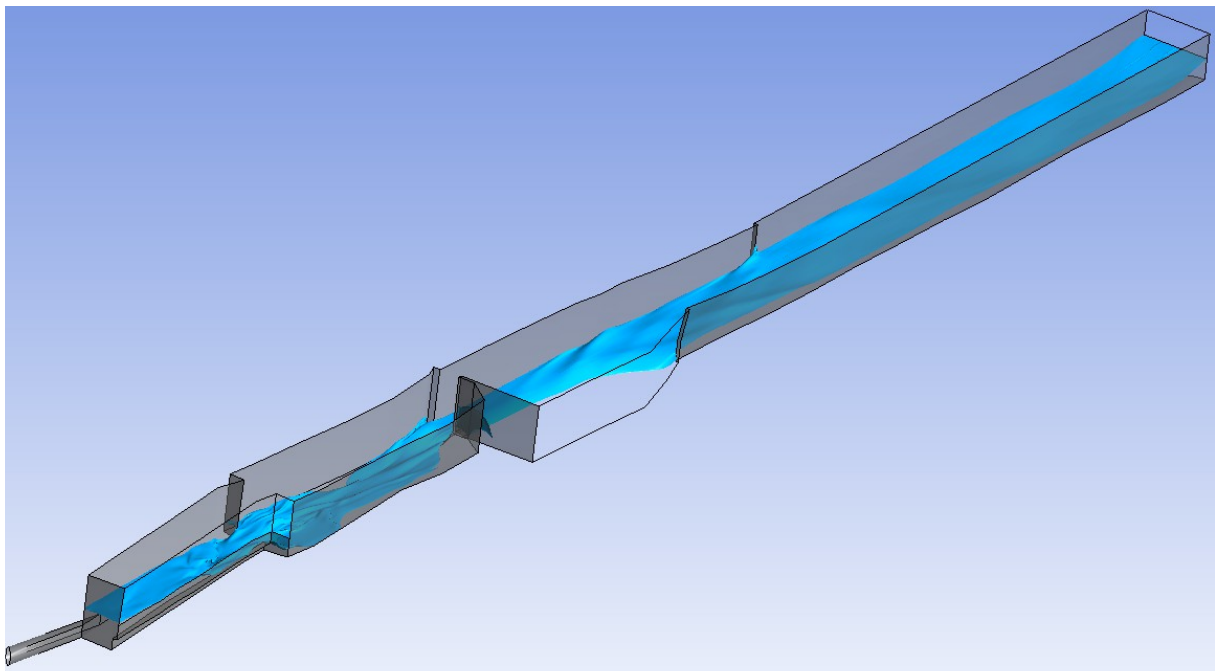
-2,25 m³.s⁻¹ :



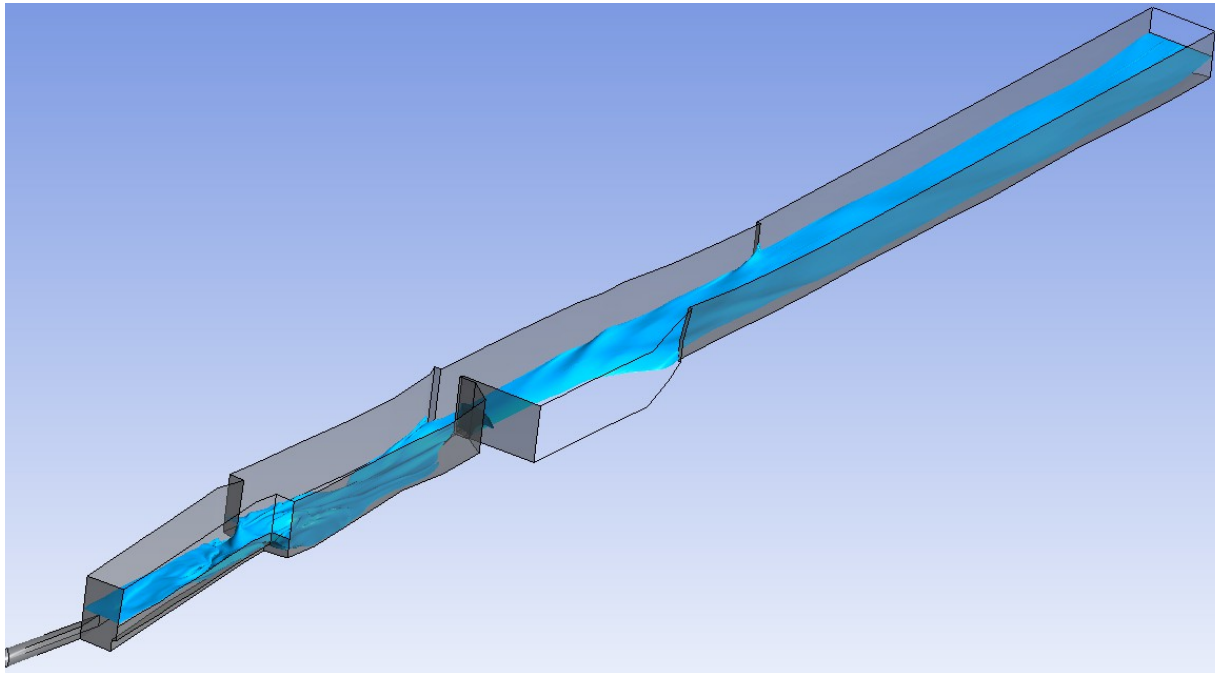
-2,50 m³.s⁻¹ :



-2,75 m³.s⁻¹ :

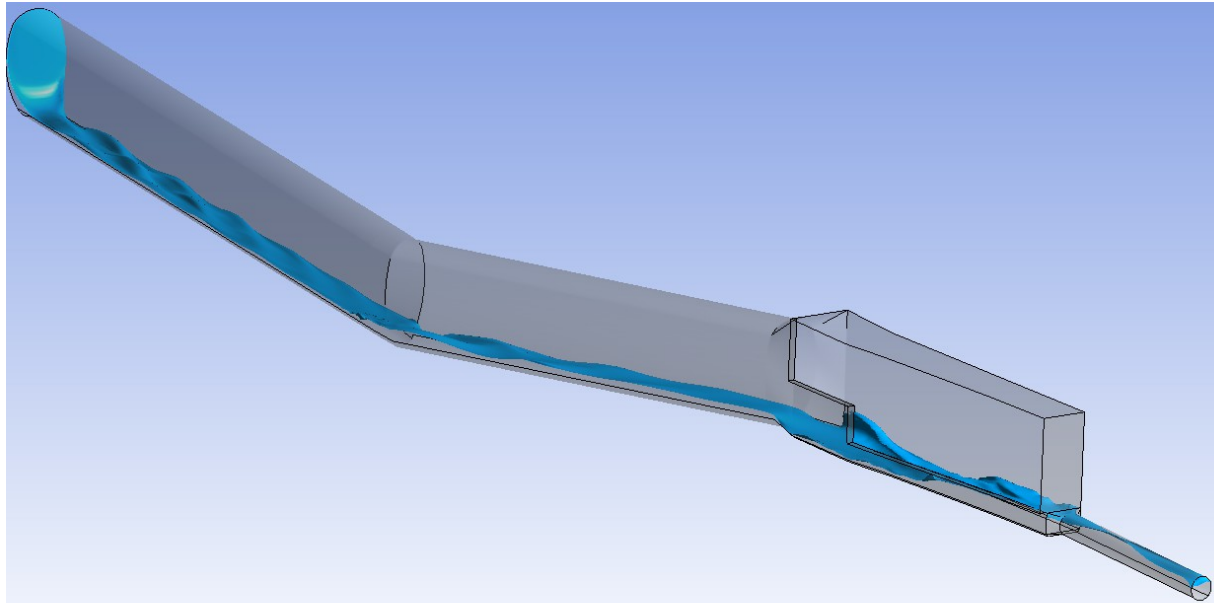


-3,00 m³.s⁻¹ :

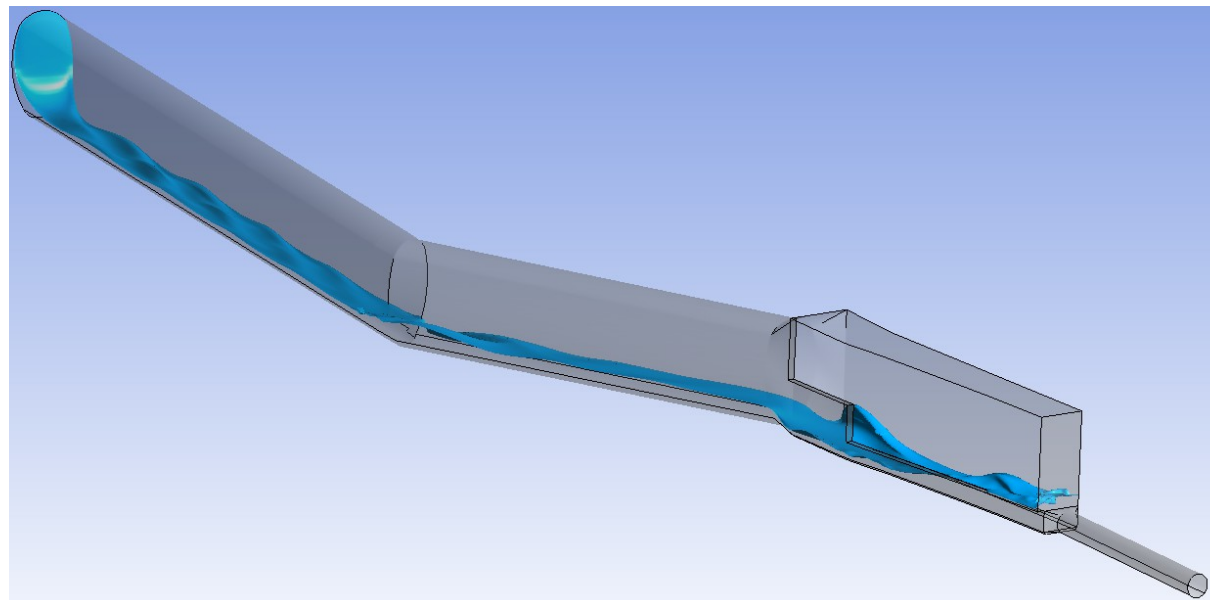


A2 - Lignes d'eau pour l'ouvrage DO3 en fonction du débit

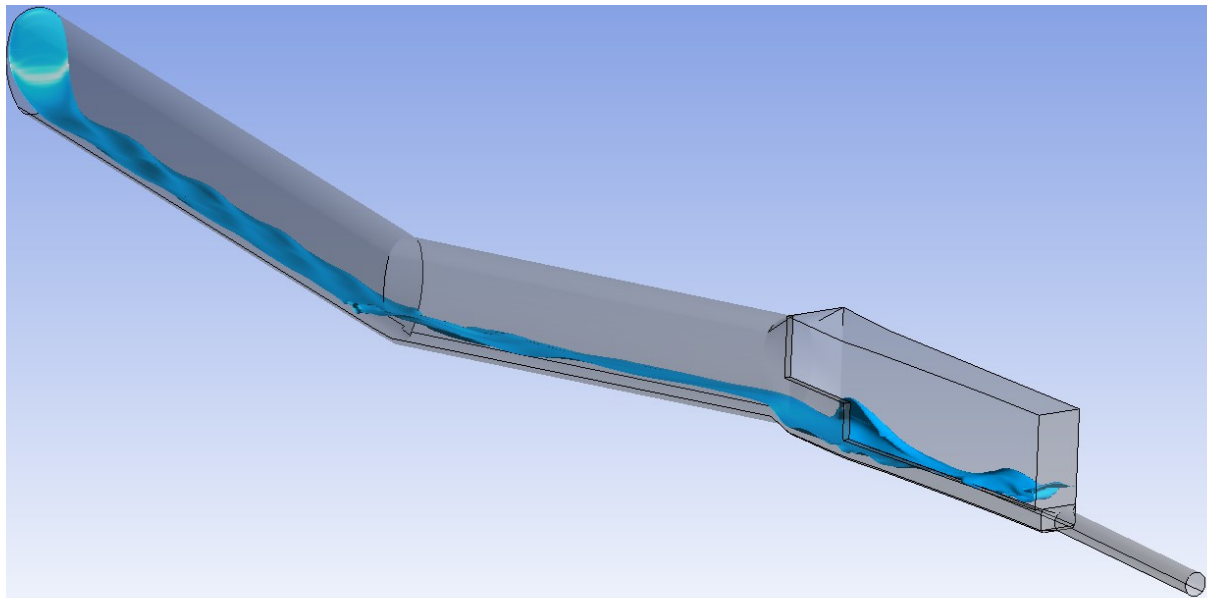
-0,300 m³.s⁻¹ :



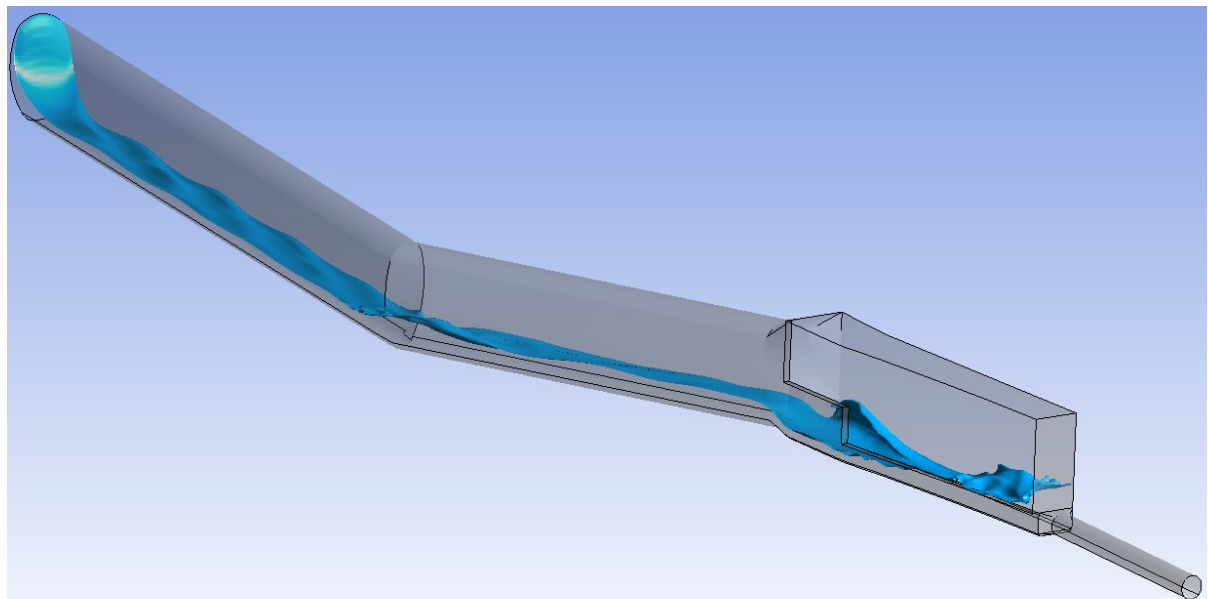
-0,450 m³.s⁻¹ :



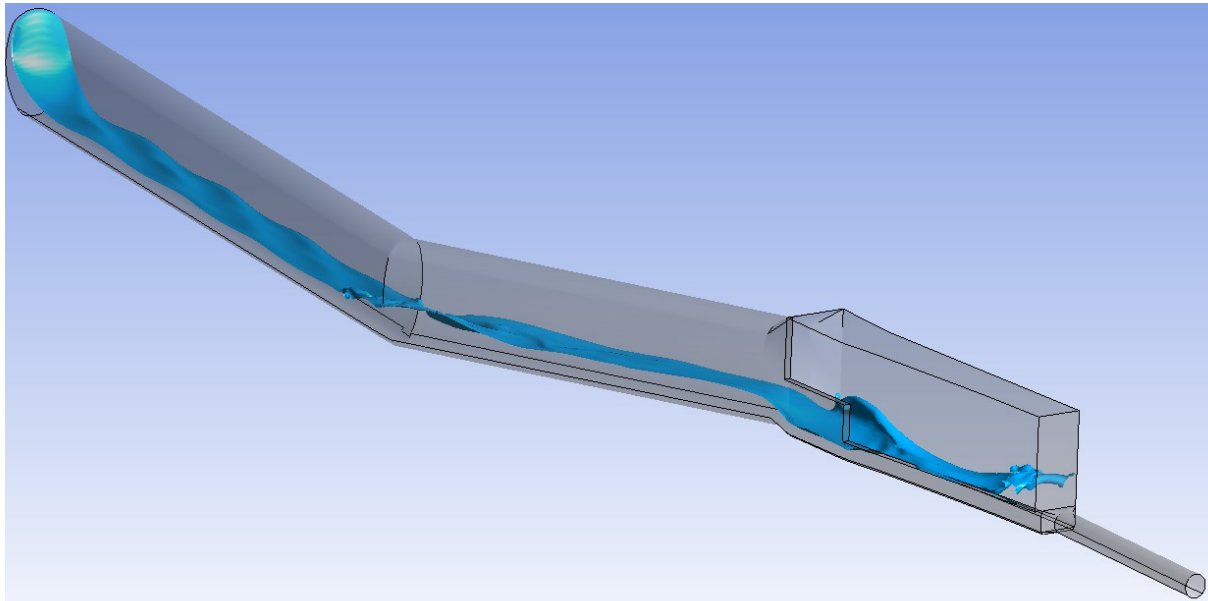
-0,600 m³.s⁻¹ :



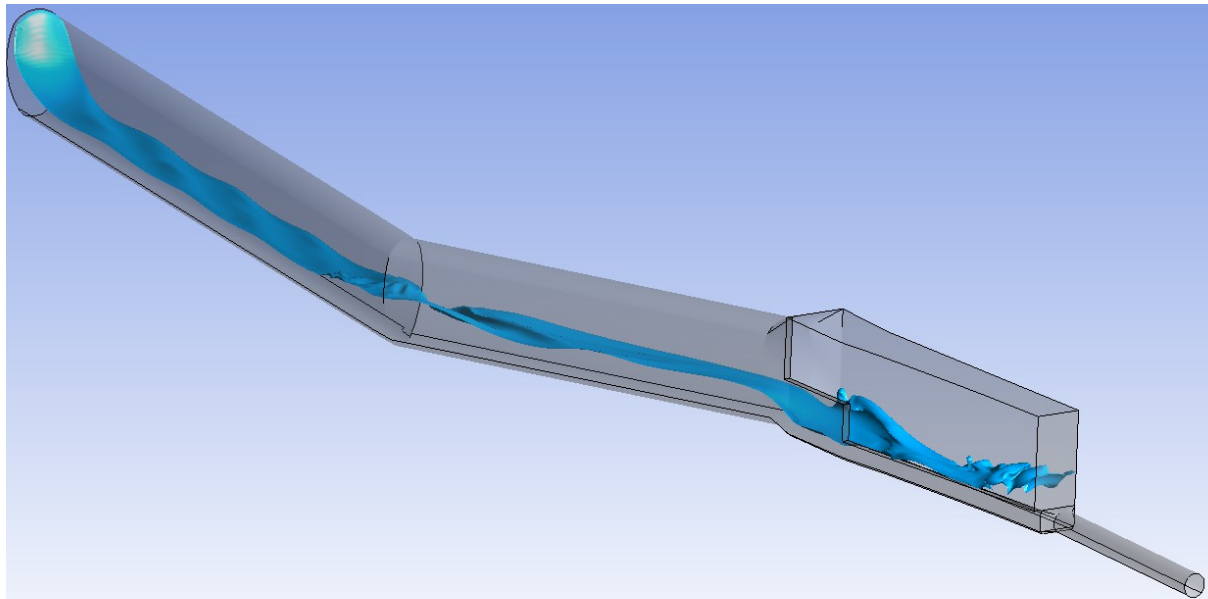
-0,750 m³.s⁻¹ :



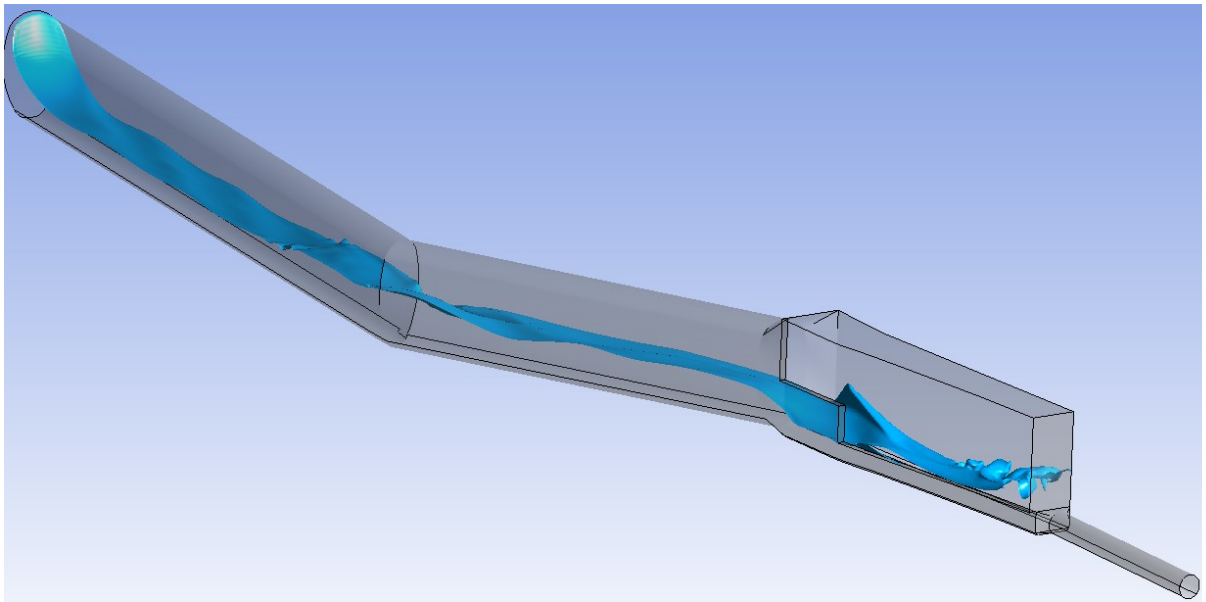
-1,000 m³.s⁻¹ :



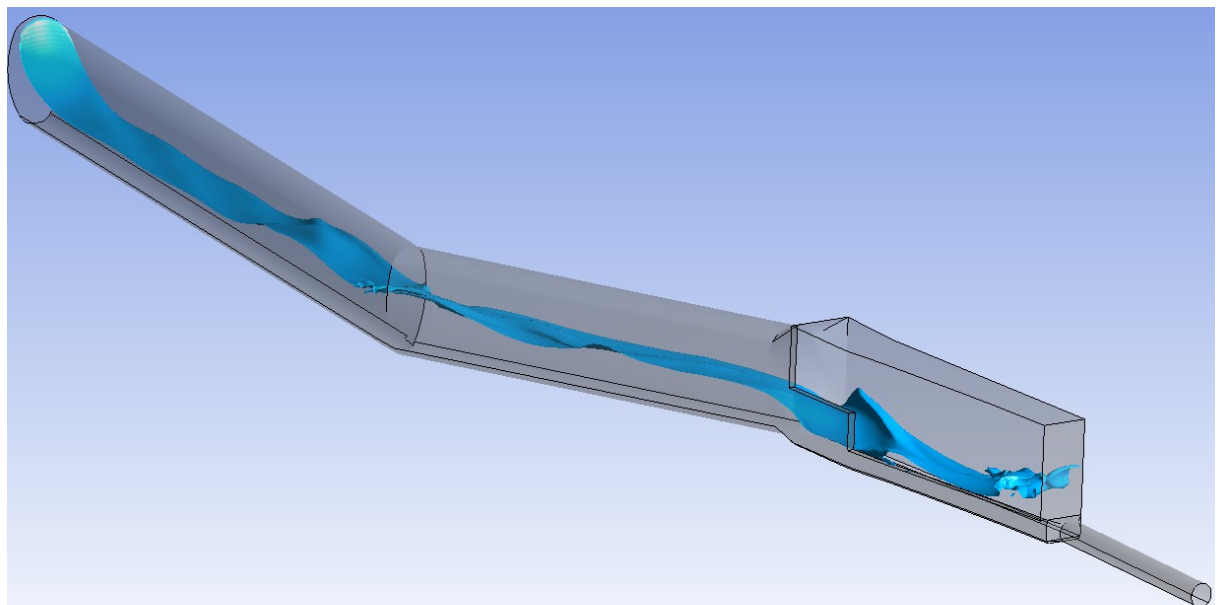
-1,250 m³.s⁻¹ :



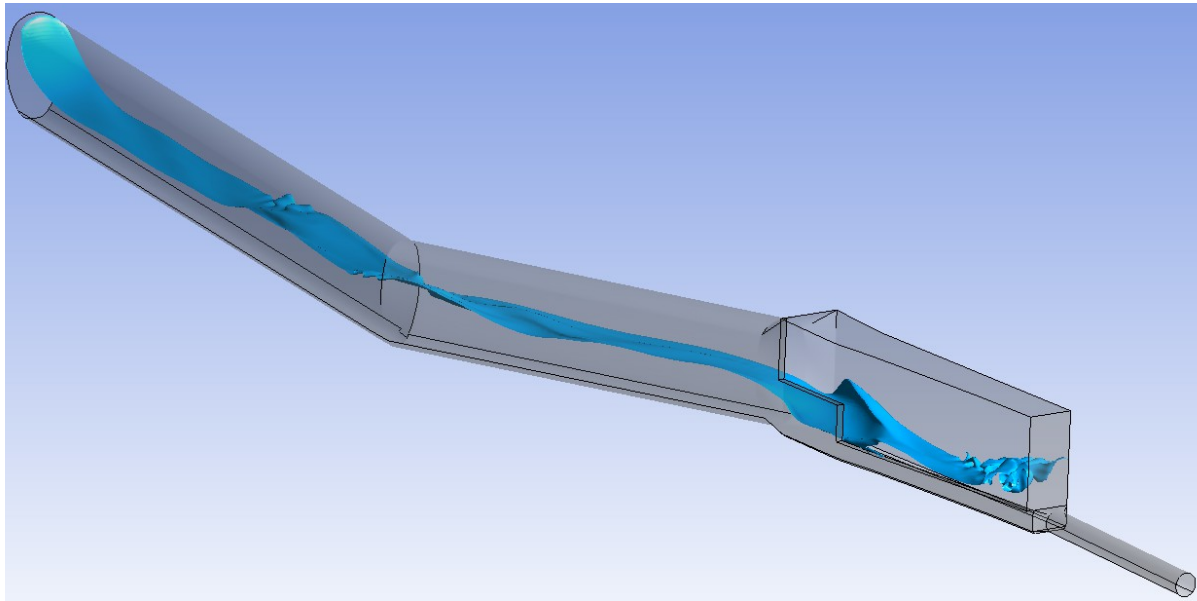
-1,500 m³.s⁻¹ :



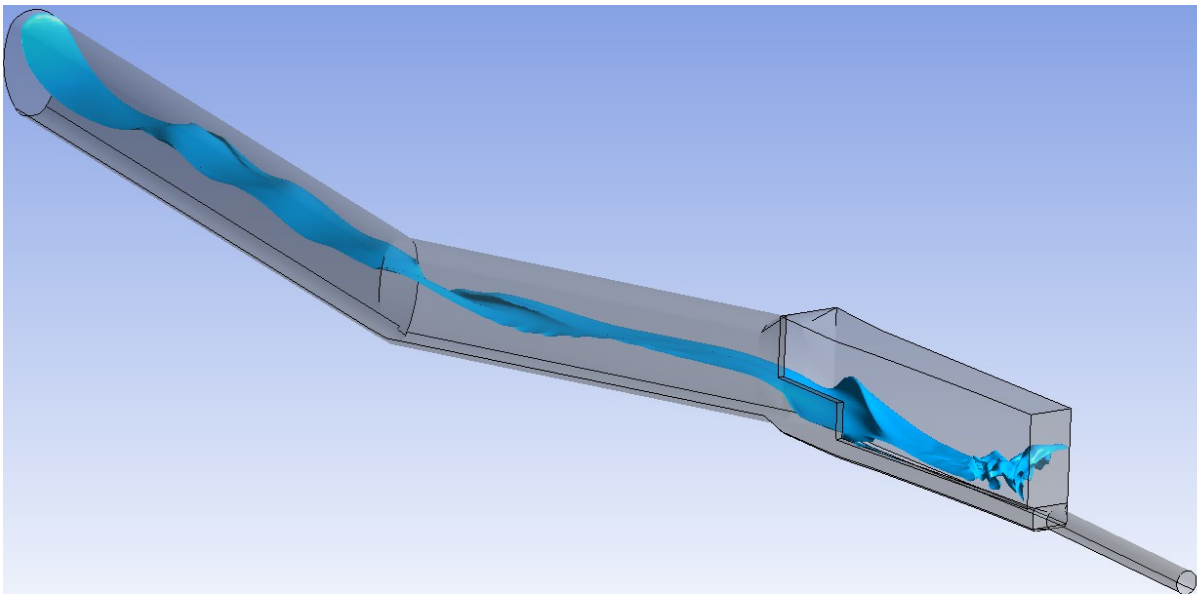
-1,750 m³.s⁻¹ :



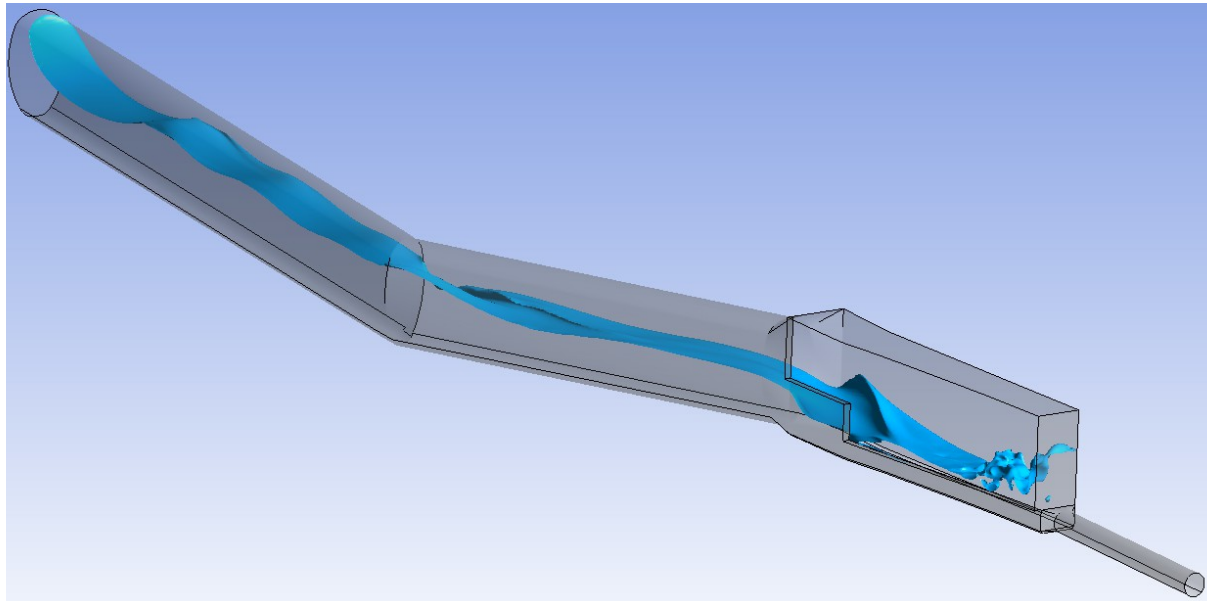
-1,980 m³.s⁻¹ :



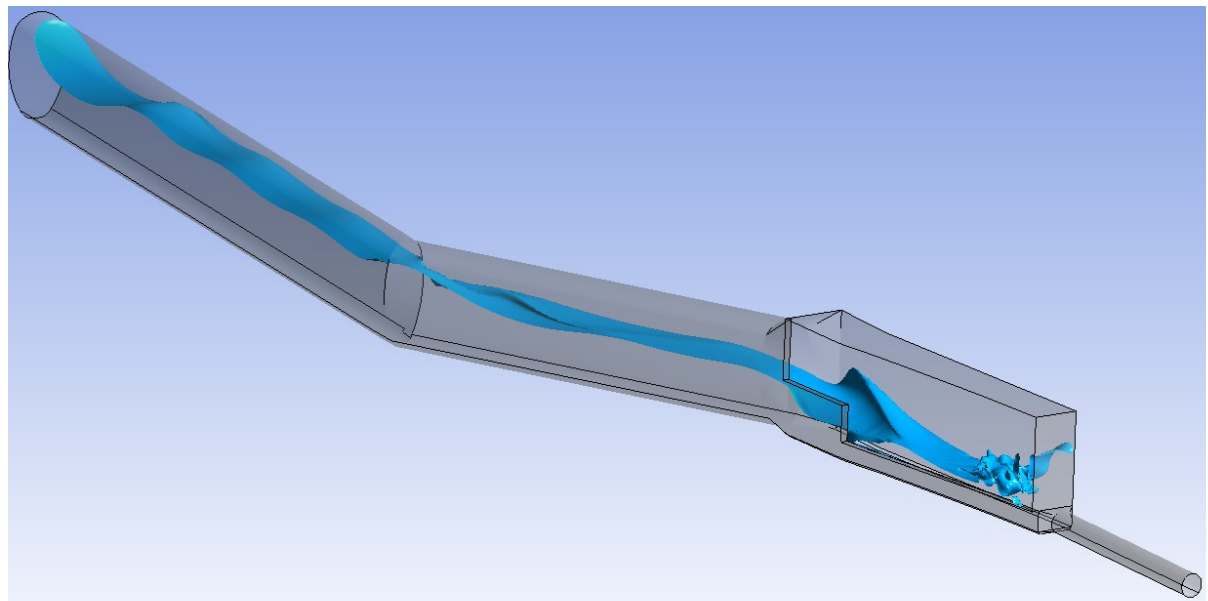
-2,250 m³.s⁻¹ :



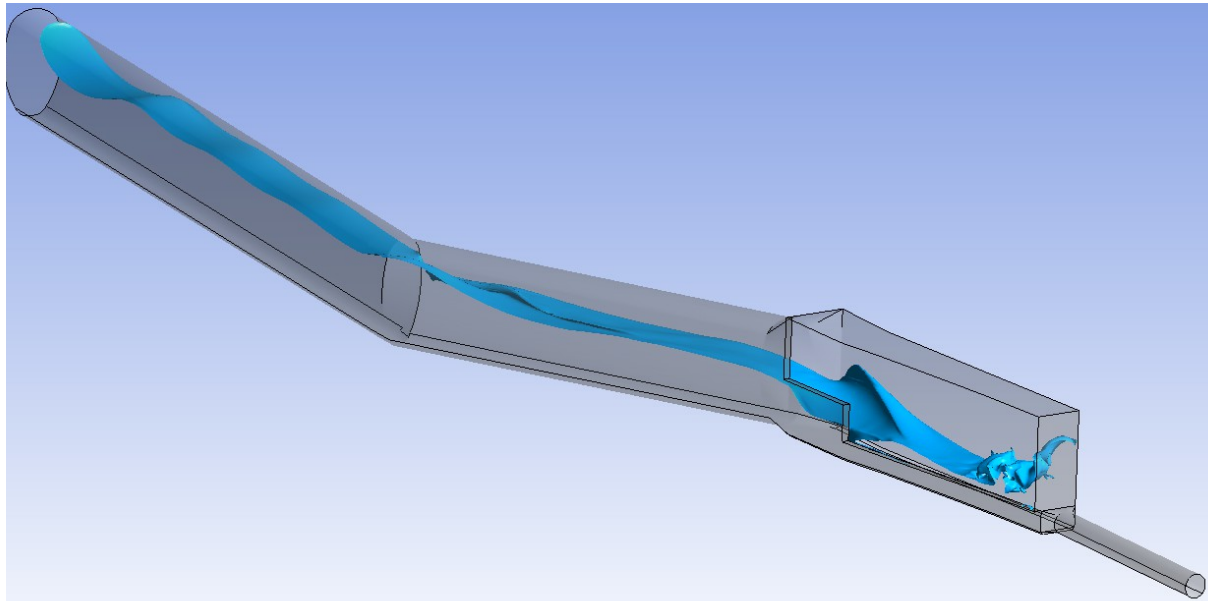
-2,500 m³.s⁻¹ :



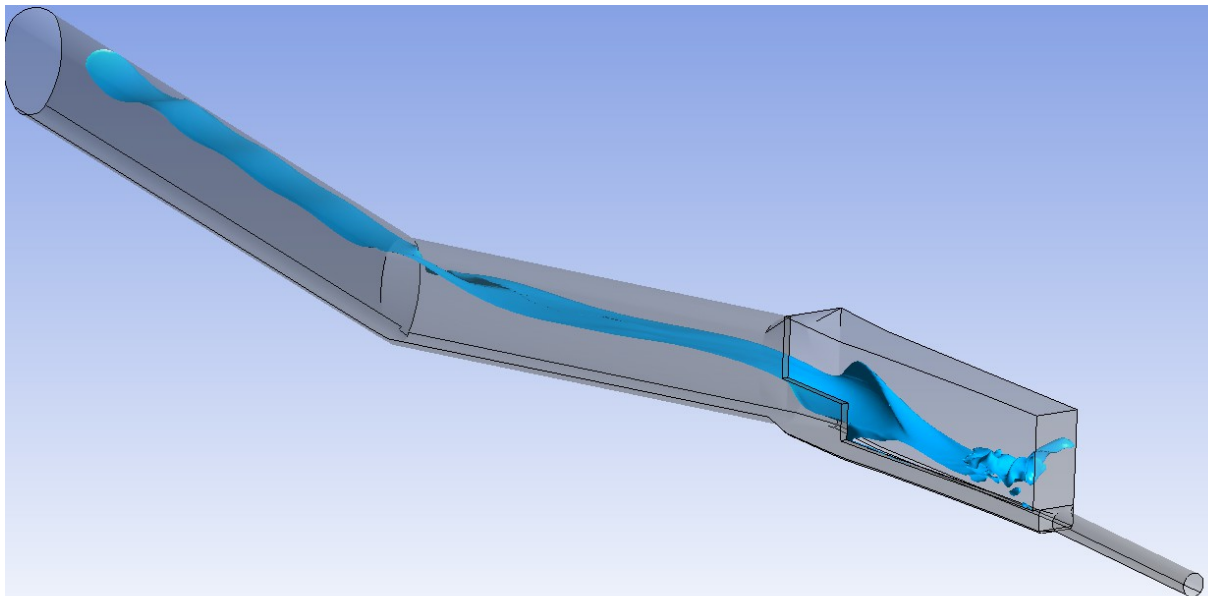
-2,750 m³.s⁻¹ :



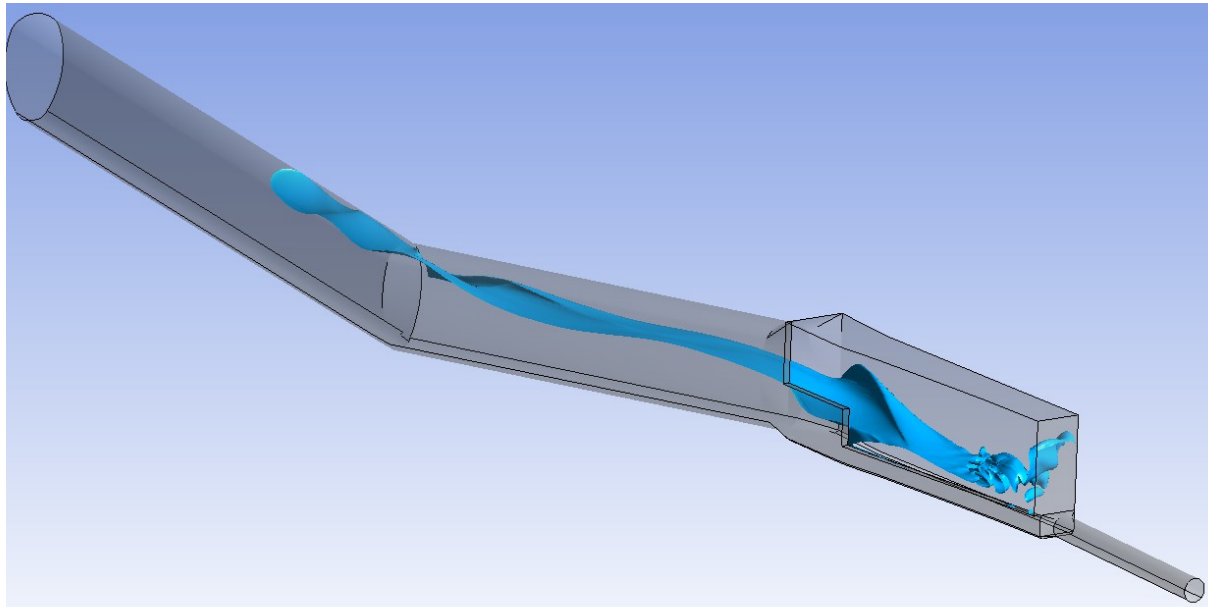
-3,000 m³.s⁻¹ :



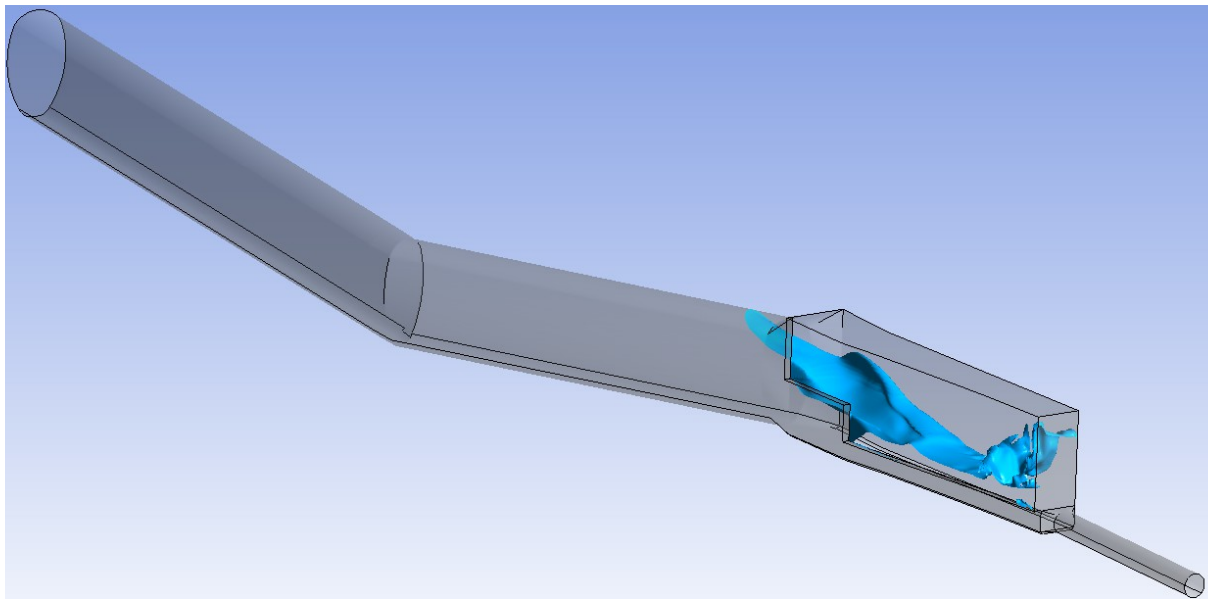
-3,250 m³.s⁻¹ :



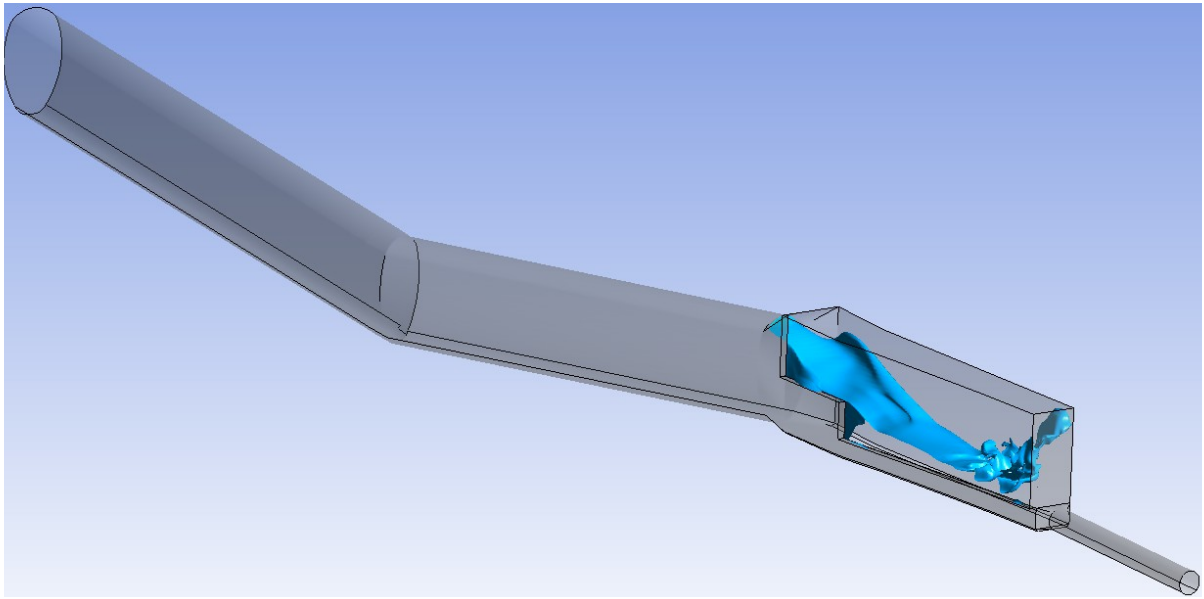
-3,500 m³.s⁻¹ :



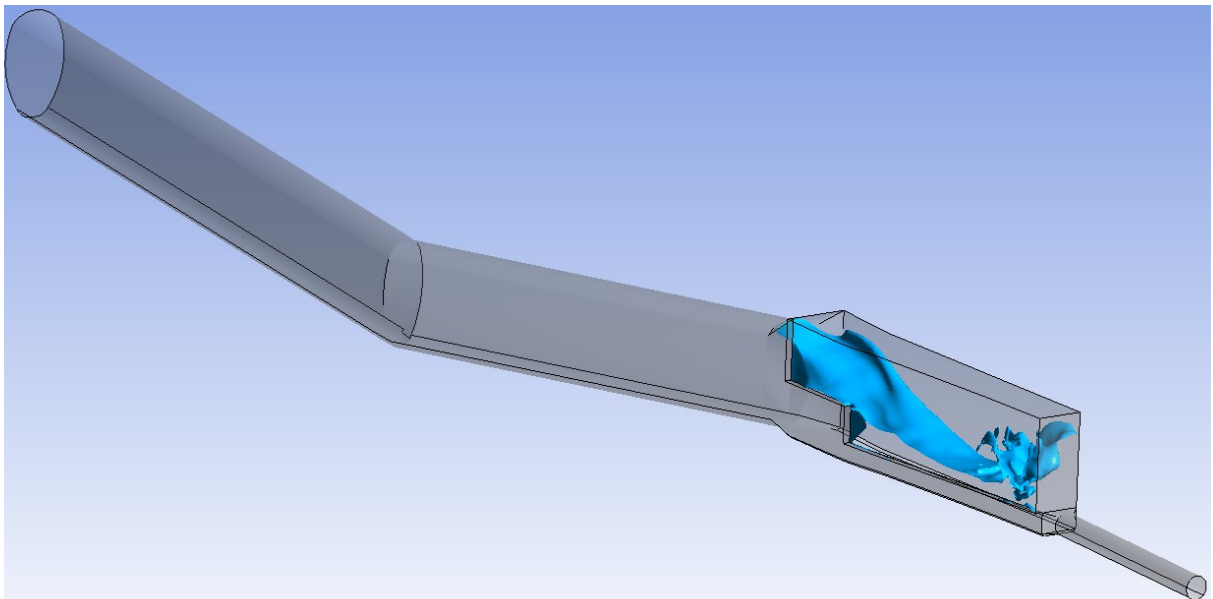
-4,000 m³.s⁻¹ :



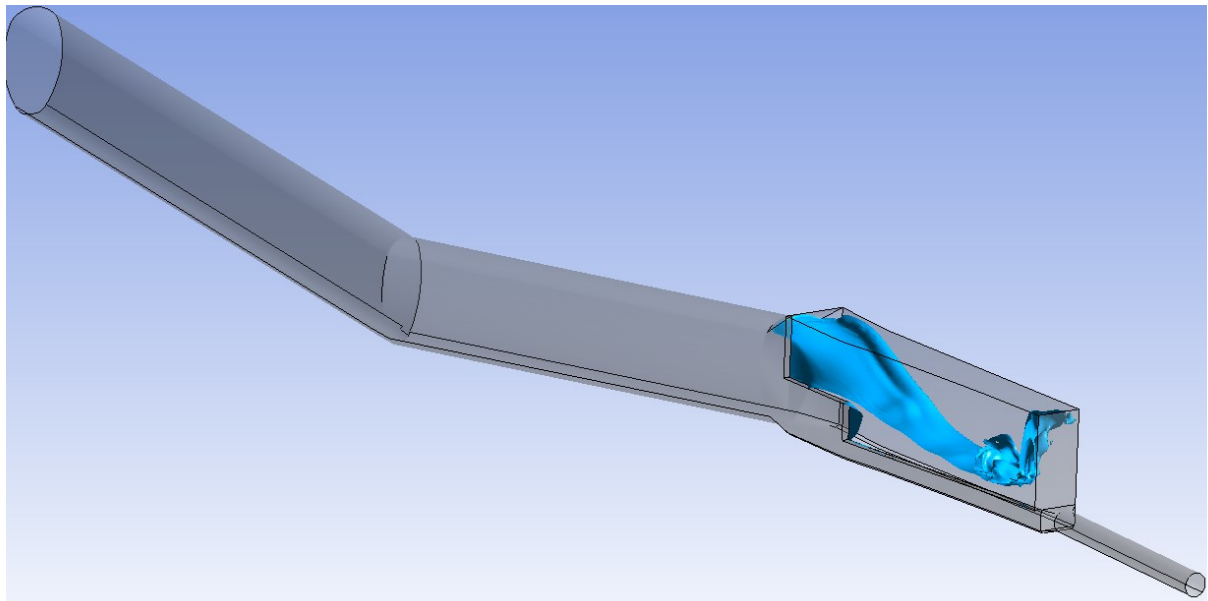
-4,500 m³.s⁻¹ :



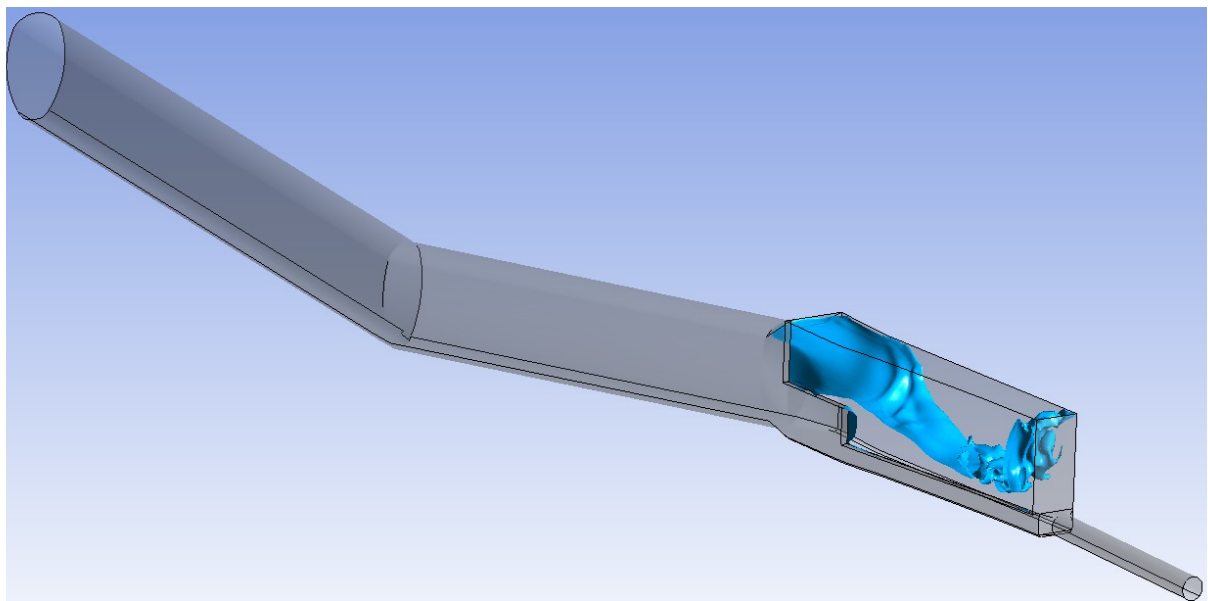
-5,000 m³.s⁻¹ :



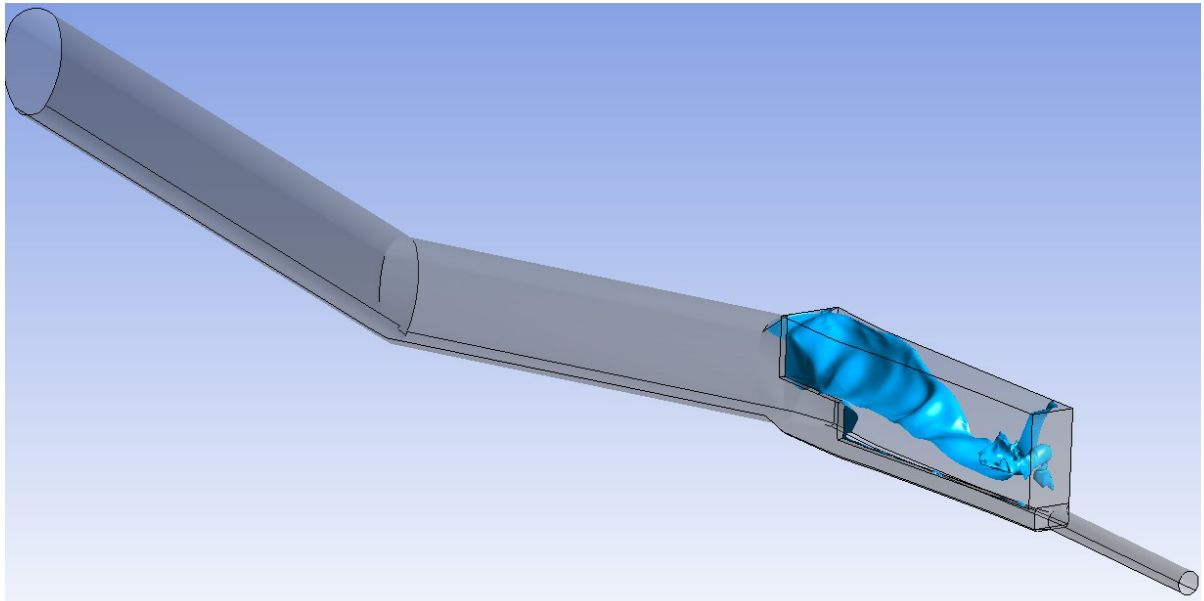
-6,000 m³.s⁻¹ :



-7,000 m³.s⁻¹ :

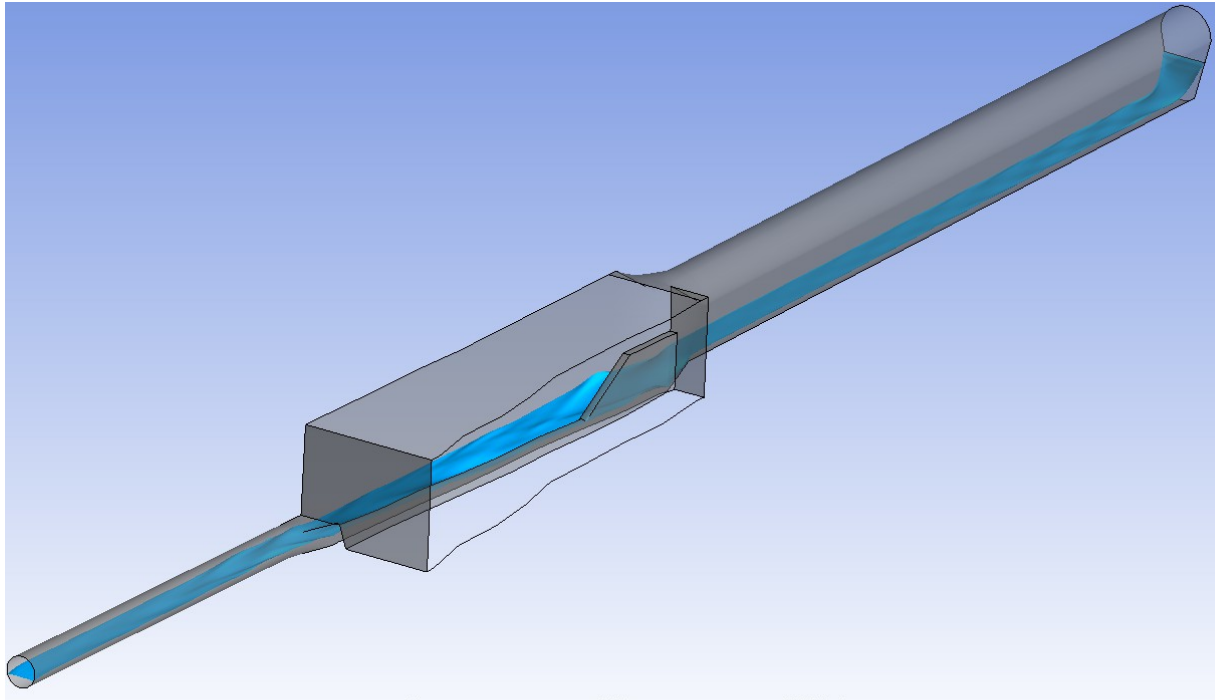


-8,000 m³.s⁻¹ :

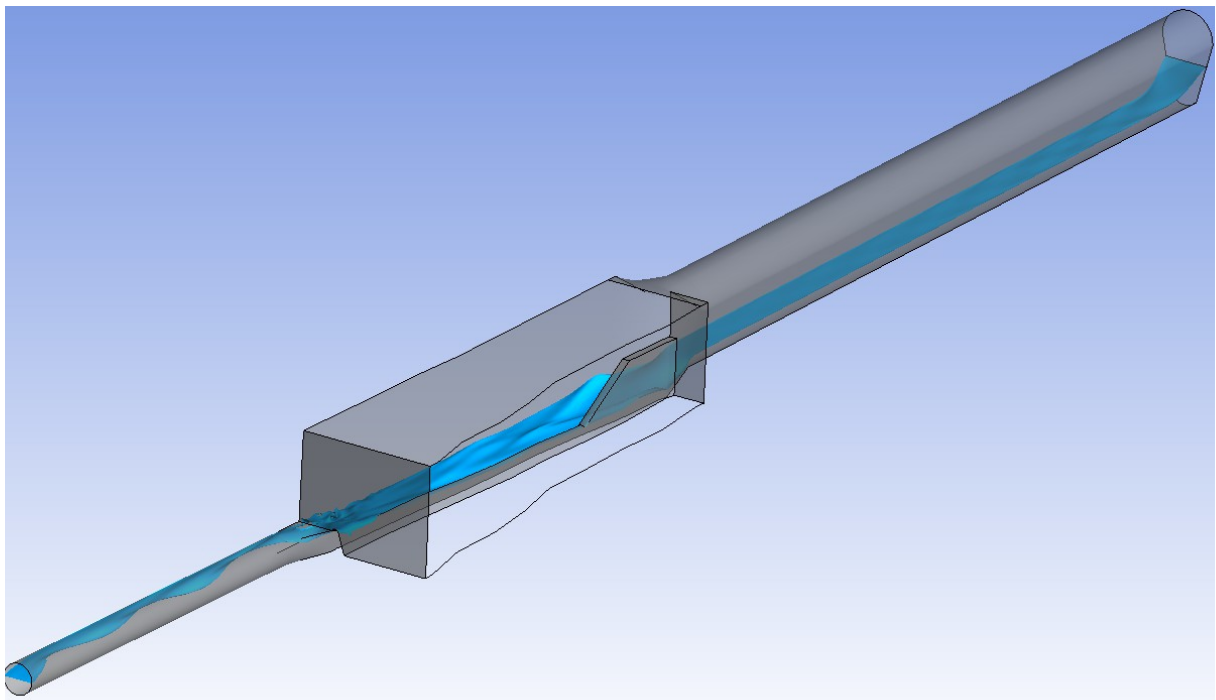


A3 - Lignes d'eau pour l'ouvrage DO4 en fonction du débit

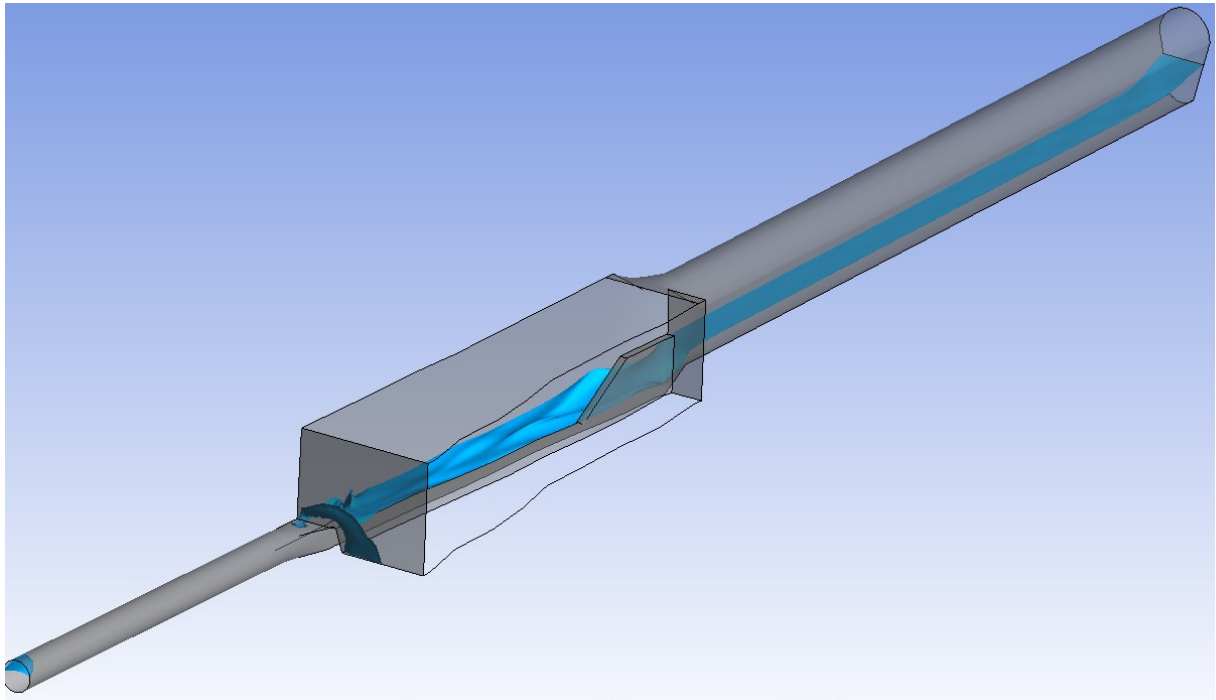
-0,184 m³.s⁻¹ :



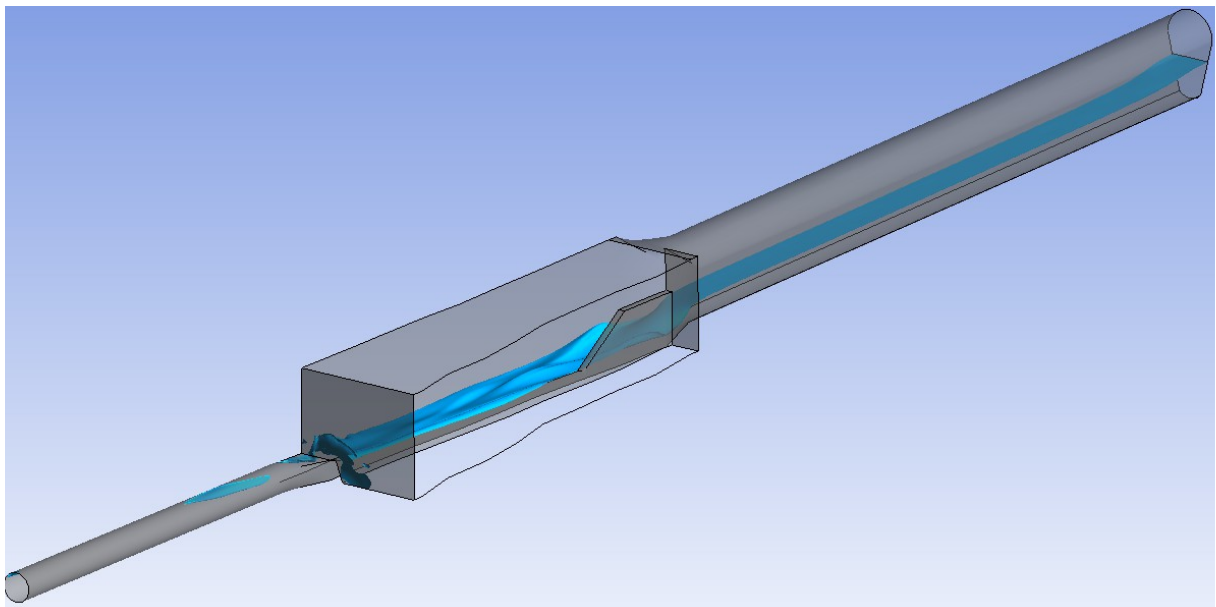
-0,298 m³.s⁻¹ :



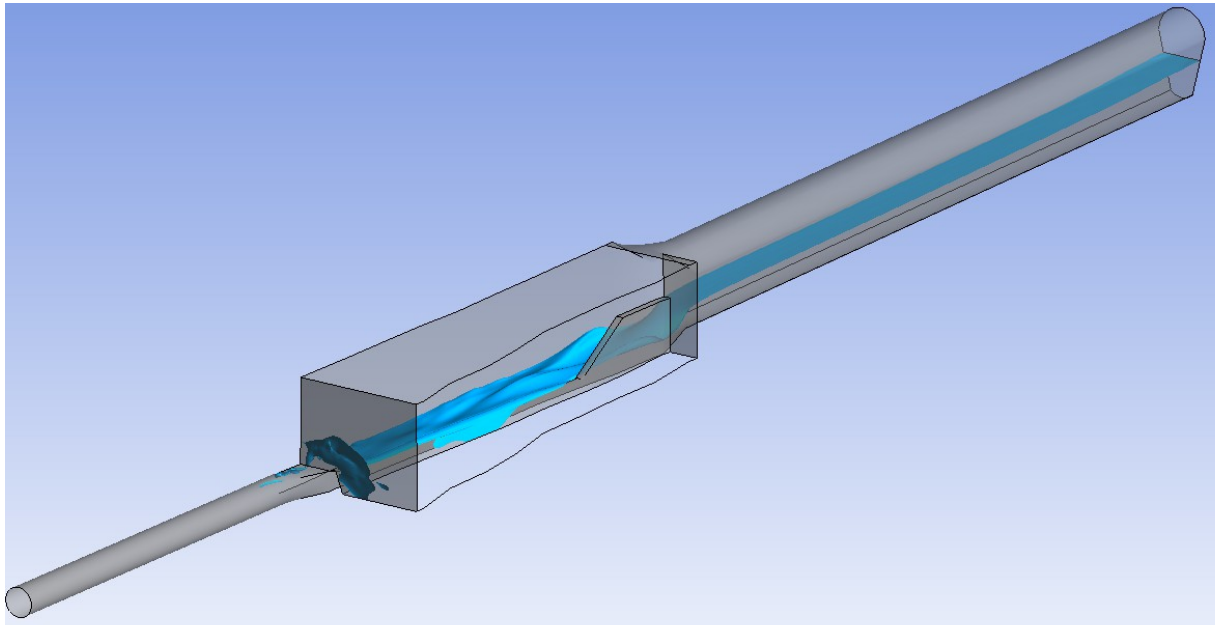
-0,450 m³.s⁻¹ :



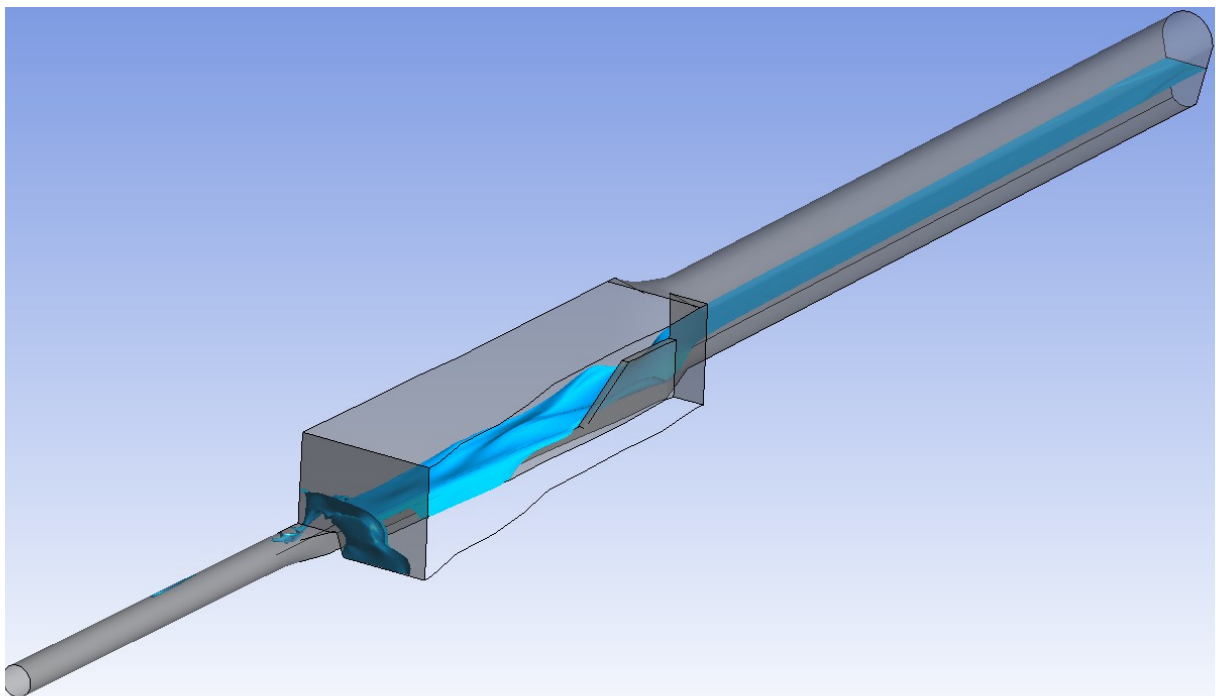
-0,650 m³.s⁻¹ :



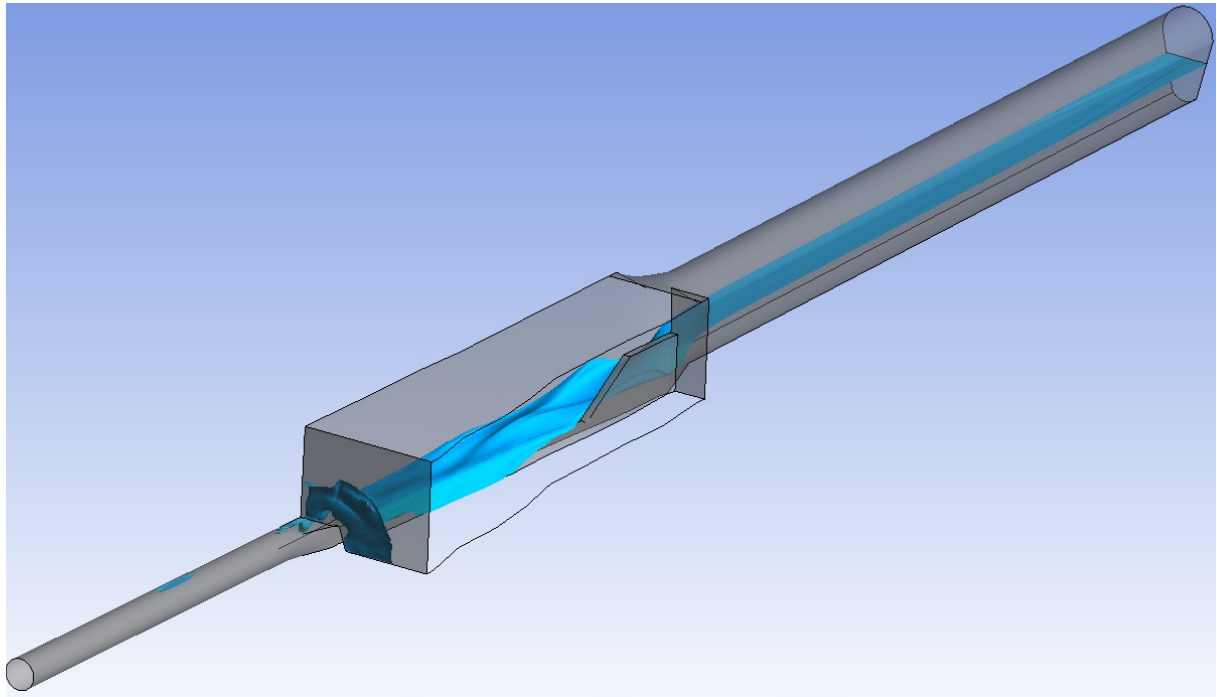
$-0,700 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$:



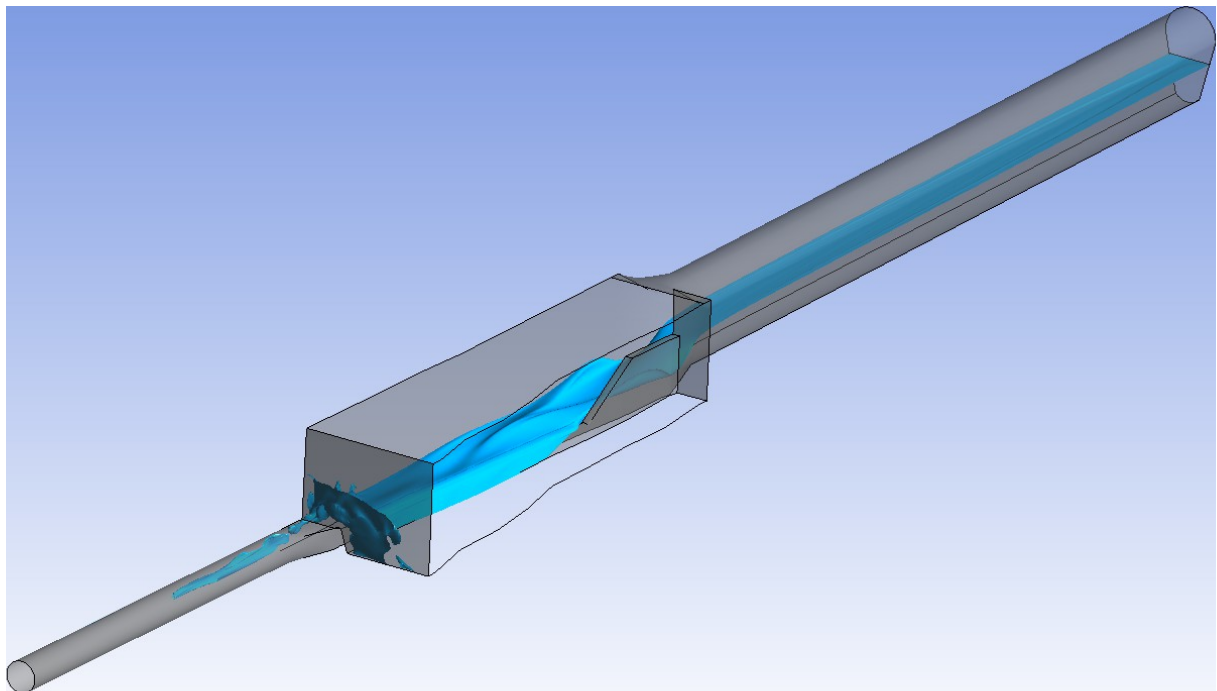
$-0,900 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$:



-1,000 m³.s⁻¹ :



-1,150 m³.s⁻¹ :



A4 - Calcul du rayon hydraulique d'une canalisation circulaire en fonction de la hauteur d'eau

Il est possible de relier le rayon hydraulique d'une canalisation circulaire à un angle θ (voir Figure A4 – 1 ci-après) grâce à la formule suivante :

$$R_h = \frac{1}{4} \left(1 - \frac{\sin \theta}{\theta} \right) D$$

Avec :

- R_h : le rayon hydraulique (m),
- θ : l'angle défini en Figure A4 -1 (rad),
- D : diamètre de la canalisation (m).

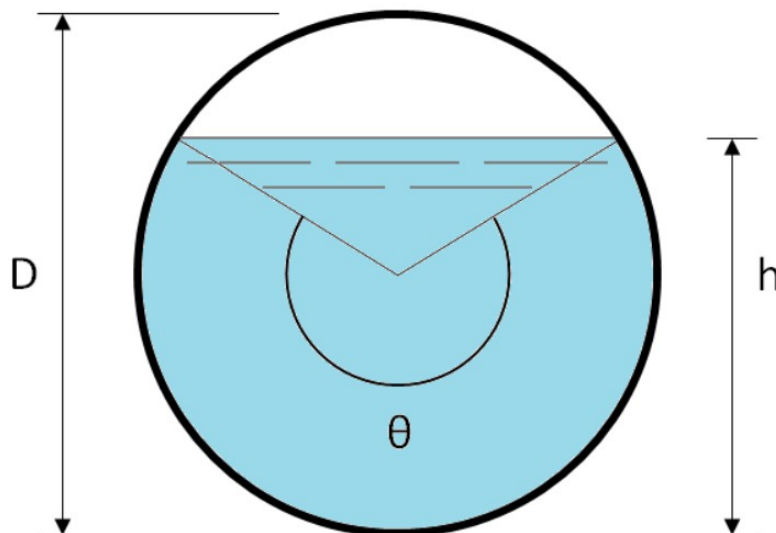


Figure A4 – 1. Définition des grandeurs nécessaires au calcul du rayon hydraulique R_h .

On cherche à relier cet angle θ à la hauteur h dans la canalisation. La Figure A4 – 2, ci-après, nous permet d'écrire la relation suivante entre θ et h .

$$h = \frac{D}{2} * \left(1 - \cos \left(\frac{\theta}{2} \right) \right)$$

Avec :

- h : la hauteur d'eau dans la canalisation (m),
- D : le diamètre de la canalisation (m),
- θ : l'angle défini en Figure A4 – 1 (rad).

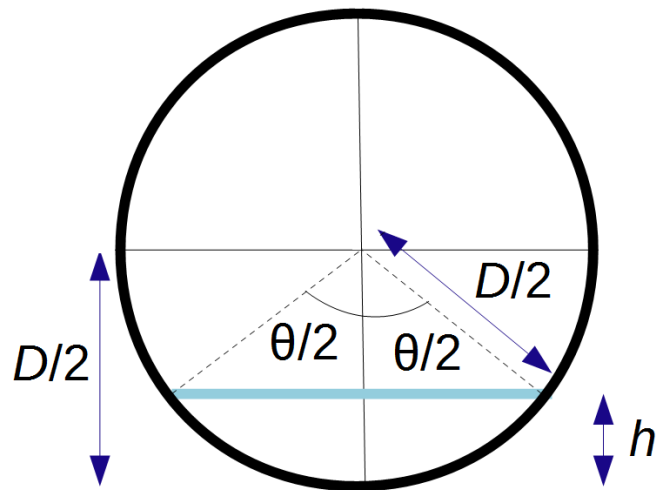


Figure A4 – 2. Explication de la relation liant l'angle ϑ et la hauteur d'eau h .

On peut donc exprimer θ en fonction de h , avec la relation suivante :

$$\theta = 2 * \arccos\left(1 - \frac{2h}{D}\right)$$

Le rayon hydraulique peut donc s'exprimer comme suit, en fonction de h :

$$R_h = \frac{1}{4} \left(1 - \frac{\sin\left(2 * \arccos\left(1 - \frac{2h}{D}\right)\right)}{2 * \arccos\left(1 - \frac{2h}{D}\right)} \right) * D$$

Avec :

- R_h : le rayon hydraulique (m),
- h : la hauteur d'eau dans la canalisation (m),
- D : diamètre de la canalisation (m).

A5 – Calcul de la surface mouillée d'une canalisation circulaire en fonction de la hauteur d'eau dans la canalisation

En s'appuyant sur la Figure A4-1, on peut également exprimer la surface mouillée comme suit :

$$S = \frac{1}{8} (\theta - \sin(\theta)) * D^2$$

Avec :

- S : la surface mouillée (m²),
- θ : l'angle défini à la Figure A4-1 (rad),
- D : le diamètre de la canalisation (m).

La relation liant θ et h définie dans l'annexe précédente est toujours valable ici, et on peut donc écrire la surface mouillée en fonction de la hauteur d'eau dans la canalisation comme suit :

$$S = \frac{1}{8} (2 \arccos(1 - \frac{2h}{D}) - \sin(2 \arccos(1 - \frac{2h}{D}))) * D^2$$

Avec :

- S : la surface mouillée (m²),
- h : la hauteur d'eau dans la canalisation (m),
- D : le diamètre de la canalisation (m).

A6 – Détail du calcul concernant les incertitudes sur les lois de fonctionnement établies

Les incertitudes sur les lois de fonctionnement établies pour le DO1 et le DO4 ont été calculées à l'aide de la loi de propagation des incertitudes. Nous avons utilisé deux types de lois : des lois linéaires (de type $y = ax + b$) ou des lois polynomiales de degré 2 (de type $y = ax^2 + bx + c$).

Pour une loi linéaire (de type $y = ax + b$), l'incertitude sur y s'écrit comme suit :

$$u(y) = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial a}\right)^2 u(a)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2 u(x)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial b}\right)^2 u(b)^2 + \frac{\partial y^2}{\partial a \partial b} \text{cov}(a, b)}$$

$$\Leftrightarrow u(y) = \sqrt{x^2 * u(a)^2 + a^2 * u(x)^2 + u(b)^2 + x * \text{cov}(a, b)}$$

Avec :

- $u(y)$: l'incertitude sur la sortie y (dimensions de y),
- $u(a)$: l'incertitude sur le coefficient directeur a (dimensions de a),
- $u(x)$: incertitude sur la variable x (dimensions de x),
- $u(b)$: incertitude sur l'ordonnée à l'origine b (dimensions de b),
- $\text{cov}(a, b)$: covariance entre a et b .

Pour une loi polynomiale de degré 2 (de type $y = ax^2 + bx + c$), l'incertitude sur y s'écrit comme suit :

$$u(y) = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial a}\right)^2 u(a)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2 u(x)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial b}\right)^2 u(b)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial c}\right)^2 u(c)^2 + \frac{\partial y^2}{\partial a \partial b} \text{cov}(a, b) + \frac{\partial y^2}{\partial a \partial c} \text{cov}(a, c) + \frac{\partial y^2}{\partial b \partial c} \text{cov}(b, c)}$$

$$\Leftrightarrow u(y) = \sqrt{x^4 * u(a)^2 + 4 * a^2 * x^2 * u(x)^2 + x^2 * u(b)^2 + u(c)^2 + x^3 * \text{cov}(a, b) + x^2 * \text{cov}(a, c) + x * \text{cov}(b, c)}$$

Avec :

- $u(y)$: l'incertitude sur la sortie y (dimensions de y),
- $u(a)$: l'incertitude sur le coefficient a (dimensions de a),
- $u(x)$: incertitude sur la variable x (dimensions de x),
- $u(b)$: incertitude sur le coefficient b (dimensions de b),
- $u(c)$: incertitude sur le coefficient c (dimensions de c),
- $\text{cov}(a, b)$: covariance entre a et b ,
- $\text{cov}(a, c)$: covariance entre a et c ,
- $\text{cov}(b, c)$: covariance entre b et c .

L'incertitude $u(x)$ est estimée à partir des données constructeurs concernant les mesures de capteur de hauteur d'eau par temps de pluie. Nous avons retenu une valeur pour $u(x)$ égale à 1,5 cm. Les incertitudes $u(a)$ et $u(b)$ ainsi que la covariance $\text{cov}(a, b)$ sont estimées à l'aide de la méthode de régression linéaire proposée par le logiciel Evohe pour les lois concernant les débits entrants et à l'aide de la méthode de Williamson, également proposée par Evohe, pour les autres lois en

s'appuyant sur les résultats des simulations et sur la valeur de $u(x)$. Les tableaux suivants regroupent les valeurs de a , $u(a)$, b et $u(b)$ utilisées pour nos calculs d'incertitudes.

DO1 - Loi de fonctionnement pour le débit entrant :

Régression linéaire			
a	9,6187	b	-1,4014
u(a)	0,093981	u(b)	0,05209
cov(a,b)	-0,0046022		

DO1 – Loi de fonctionnement pour le débit conservé :

Williamson			
a	0,92071	b	1,0417
u(a)	0,9163	u(b)	0,34846
cov(a,b)	-0,31495		

DO1 – Loi de fonctionnement pour le débit déversé par la première zone de déversement :

Williamson			
a	6,8966	b	-2,3809
u(a)	0,52419	u(b)	0,26521
cov(a,b)	-0,13634		

DO1 – Loi de fonctionnement pour le débit déversé par la deuxième zone de déversement :

Williamson			
a	0,62502	b	-0,29468
u(a)	0,14911	u(b)	0,085777
cov(a,b)	-0,012756		

DO3 – Loi de fonctionnement pour le débit entrant pour le capteur dans la canalisation amont :

Régression linéaire					
a	2,5903	b	0,78662	c	0
u(a)	0,023934	u(b)	0,020011	u(c)	0
cov(a,b)	-0,00046359				

DO3 – Loi de fonctionnement pour le débit conservé pour le capteur dans la canalisation amont :

Williamson			
a	-1,0545	b	1,5407
u(a)	0,50372	u(b)	0,18697
cov(a,b)	-0,093125		

DO3 – Loi de fonctionnement pour le débit déversé pour le capteur dans la canalisation amont :

Williamson			
a	2,6319	b	0,36196
u(a)	0,30832	u(b)	0,35216
cov(a,b)	-0,10517	cov(a,c)	0,023502
		cov(b,c)	-0,029607

DO3 – Loi de fonctionnement pour le débit entrant pour le capteur dans la chambre du déversoir :

Régression linéaire			
a	5,1308	b	2,0451
u(a)	0,16066	u(b)	0,10859
cov(a,b)	-0,016836		

DO3 – Loi de fonctionnement pour le débit conservé pour le capteur dans la chambre du déversoir :

Williamson			
a	-3,6863	b	3,0176
u(a)	0,21841	u(b)	0,038043
cov(a,b)	-0,007987		

DO3 – Loi de fonctionnement pour le débit déversé pour le capteur dans la chambre du déversoir :

Williamson			
a	7,6707	b	-0,88517
u(a)	0,36314	u(b)	0,35142
cov(a,b)	-0,1243	cov(a,c)	0,022531
		cov(b,c)	0,023167

DO4 – Loi de fonctionnement pour le débit entrant :

Régression linéaire			
a	1,57	b	0,63947
u(a)	0,029575	u(b)	0,015977
cov(a,b)	-0,00045		

DO4 – Loi de fonctionnement pour le débit conservé :

Williamson			
a	0,64184	b	0,70402
u(a)	0,31609	u(b)	0,12612
cov(a,b)	-0,038166		

DO4 – Loi de fonctionnement pour le débit déversé :

Williamson			
a	1,0901	b	-0,2354
u(a)	0,14917	u(b)	0,061701
cov(a,b)	-0,008436		