

**Syndicat Intercommunal des cours d'eau
du bassin Chambérien**

**Direction Départementale de l'Équipement
de la Savoie**

**Bras de décharge de la Leysse
Modélisation numérique de
l'ouvrage de prise**

RAPPORT

HydroCosmos SA

Modélisation numérique en ingénierie hydraulique

Grand'Rue

1904 Vernayaz

www.hydrocosmos.ch

Tél : 027/764 34 20

Fax : 027/764 34 21

e-mail : info@hydrocosmos.ch



Vernayaz, le 23.05.2003

N° RP-M02-032-001

TABLE DES MATIERES

1	Préambule	3
2	Présentation du projet	4
	2.1 Conception générale	4
	2.2 L'ouvrage de dérivation sur la Leysse	5
3	Objectifs de l'étude	7
4	Présentation générale de la méthodologie de calcul	7
	4.1 L'hydraulique	8
	4.2 La numérique	9
5	Construction du modèle numérique	10
	5.1 Données à disposition	10
	5.2 Génération du modèle numérique de terrain	11
	5.3 Conditions limites	12
	5.4 Conditions initiales	14
6	Exploitation du modèle numérique	15
	6.1 Bien-fondé de l'élargissement de la Leysse	15
	6.2 Choix de la position de l'ouvrage	18
	6.3 Optimisation de la géométrie pour Q_{100}	21
	6.4 Validation pour Q_{20}	26
7	Synthèse et recommandations	29

1 PREAMBULE

Le Syndicat Intercommunal des cours d'eau du bassin Chambérien (SICEC) prévoit la réalisation d'un bras de décharge de crue dans la plaine de la Leysse, à l'amont du Lac du Bourget. Une étude hydrologique a fixé à 370 m³/s le débit centennal de la Leysse, alors que cette rivière présente une capacité hydraulique d'environ 240 m³/s dans sa plaine, à l'amont du Lac. Cette zone, qui accueille en particulier l'aéroport de Chambéry – Aix-Les-Bains, subit un fort développement économique et exige un objectif de protection à 100 ans.

La solution retenue consiste en la réalisation d'un bras de décharge, c'est-à-dire d'un deuxième lit de la rivière, en parallèle du lit naturel. Un ouvrage de prise garantira la séparation des débits.



Figure 1.1 : Situation générale du projet et position des divers éléments.

Suite à un concours, le groupement composé des bureaux Stucky à Nîmes, CIDEE Ingénieurs conseils à Cran Gevrier et Pierre Mourey Conseil à Aix les Bains est en charge d'élaborer le projet de ce système de protection contre les crues.

En ce qui concerne directement l'ouvrage de prise, le SICEC, suivant les conseils du groupement d'ingénieurs, a décidé de mandater le bureau HydroCosmos pour effectuer une étude hydraulique de détail par simulation numérique. Le présent rapport concerne cette étude particulière.

2 PRESENTATION DU PROJET

Ce chapitre cite essentiellement le texte du document d'avant-projet du bureau Stucky. Il présente les bases du dimensionnement, disponibles au début de l'étude par simulation numérique.

2.1 Conception générale

Le chenal de décharge des crues de la Leysse constitue un aménagement essentiel du dispositif de protection contre les inondations de la plaine de La Motte Servolex, du pôle Savoie-Technolac et de l'aérodrome de Chambéry – Aix Les Bains.

Le bras de décharge de crue de la Leysse a pour but de rejeter directement au Lac du Bourget les débits excédentaires de crue, sur la base de $130 \text{ m}^3/\text{s}$ pour la crue centennale et d'environ $30 \text{ m}^3/\text{s}$ pour une crue de période de retour 20 ans.

La conception hydraulique de l'aménagement repose sur les principes suivants :

- En situation de crue, réguler dans la Leysse aval un débit compatible avec sa capacité maximale de transit de l'ordre de $240 \text{ m}^3/\text{s}$, par décharge latérale des excédents ;
- Garantir la sécurité de fonctionnement du système de décharge ;
- Développer et pérenniser une culture de la fonction de base de l'ouvrage, par une utilisation régulière en tant que décharge de débit, y compris pour les crues courantes (crue annuelle ou bi-annuelle) ;
- Permettre l'évacuation des crues dans le chenal sans débordement dans des conditions hydrauliques tolérables par les mesures de mise en valeur et les usages implantés dans le chenal ;
- Respecter l'environnement général de l'aménagement ; le cours d'eau de la Leysse, les secteurs boisés de qualité, les zones humides en périphérie du lac.

Sur ces principes, la conception hydraulique de l'aménagement consiste en :

- La mise en place d'une prise d'eau sur la Leysse, implantée en rive droite en aval du pont du Tremblay, équipée de deux clapets déversants en position haute dès les crues courantes, et qui réguleront par abaissement progressif le débit dans la Leysse aval lors de fortes crues ;
- L'aménagement d'un large chenal de décharge, endigué dans la traversée de la plaine, à même de transiter le débit maximal de $130 \text{ m}^3/\text{s}$. Le chenal est traité comme une succession de milieux humides lents, plus ou moins ouverts et en eau, auxquels sont attachées des fonctionnalités particulières cohérentes longitudinalement et transversalement avec leur environnement immédiat, et toujours compatibles avec l'évacuation des crues ;

- La réalisation d'un ouvrage de restitution des eaux dans le Lac du Bourget en aval de la RN 211, d'emprise limitée dans la zone humide, qui assurera la dissipation de l'énergie avant rejet dans le milieu naturel.

2.2 L'ouvrage de dérivation sur la Leysse

La décharge des débits de crue est assurée par déversement sur deux clapets de 7.5 m de longueur et 1.5 m de hauteur. Les dispositifs de contrôle-commande intégrés dans la culée centrale conduisent à un génie civil compact totalement intégré aux endiguements.

2.2.1 Calage de l'ouvrage

Les clapets sont calés en fonction des lignes d'eau dans la Leysse en considérant les critères suivants :

- La décharge de 130 m³/s, clapets abaissés pour la crue centennale ;
- La décharge d'environ 30 m³/s pour la crue de période de retour 20 ans, clapets en position levée ;
- Le début du déversement sur les clapets pour la crue biennale.

Un modèle mathématique des écoulements de la Leysse aval a été bâti, entre le pont de l'université, à l'aval, et le pont du Tremblay à l'amont, sur la base de profils en travers levés en 2001.

Le calage de ce modèle s'est appuyé sur les résultats des conditions d'écoulement actuelles de la Leysse, fournis dans l'étude du schéma général de gestion du risque d'inondation sur l'agglomération chambérienne, réalisée par Hydrolac en février 2000, et qui sont pris comme valeurs de référence.

L'étude menée au cours de cette phase de calage amène les remarques suivantes :

- L'étude antérieure s'étant basée sur des profils en travers levés il y a une dizaine d'années, les profils en long de la Leysse ont été comparés. Seule la partie aval (environ 600 m) présente des écarts de cotes, le fond levés en 2001 étant plus élevé d'une vingtaine de centimètres en moyenne ;
- Le calage de la ligne d'eau centennale a conduit à retenir des coefficients de Strickler assez élevés, $K = 32$, mais qui restent cohérents avec la faible rugosité du lit calibré et l'absence de sinuosité importante du lit.

L'exploitation du modèle permet de reconstituer la loi hauteur/débit au droit de la prise du chenal de décharge. Cette loi permet de définir les cotes du radier de l'ouvrage. Celles-ci sont fixées de manière à satisfaire l'objectif de décharge de 130 m³/s pour la crue centennale, clapets abaissés. En considérant les deux seuils déversants de 7.5 m de largeur, la cote de radier sera calée à 237.30 NGF.

A partir de ce calage, la hauteur des clapets est fixée de manière à satisfaire les autres conditions : début de déversement pour la crue biennale et décharge de 30 m³/s pour la crue vingtennale, clapets en position haute. Toujours en considérant une largeur de déversement de 7.5 mètres, la hauteur des clapets est fixée à 1.5 mètres.

Les résultats de simulation hydraulique des conditions d'écoulement dans le chenal de décharge permettent de vérifier que les déversements au droit de l'ouvrage ne sont pas influencés par la ligne d'eau aval, y compris pour la crue décennale. En effet, à 130 m³/s, la lame d'eau sur le seuil atteint 2.98 m. La différence entre l'arase du seuil et le niveau aval atteint $H_1 = 1.78$ m. Pour ce type d'ouvrage, les conditions de fonctionnement hydraulique du seuil non influencé sont respectées ($H_1 < 2/3H$)

2.2.2 Gestion des clapets et partage des débits

A partir des caractéristiques de l'ouvrage définies précédemment, la loi de partage des débits au droit de la prise peut alors être calculée. En gardant un objectif de contrôle du débit maximum sur la Leysse aval limité à 240 m³/s, les plages de gestion de l'abaissement des clapets peuvent être déterminées pour les différentes occurrences de crue.

Période de retour indicative	Débit de la Leysse amont	Débit dans le chenal de décharge	Débit de la Leysse aval	Niveau Leysse amont de la prise d'eau	Niveau Leysse aval de la prise d'eau	Niveau supérieur des clapets
(ans)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(NGF)	(NGF)	(NGF)
2	110	0.5	110	238.88	238.87	238.80
5	160	11	149	239.46	239.34	238.80
10	190	18	172	239.77	239.58	238.80
20	230	30	200	240.16	239.88	238.80
30	260	39	221	240.42	240.08	238.80
40	280	45	235	240.61	240.21	238.80
50	300	60	240	240.79	240.25	238.53
75	340	100	240	241.12	240.25	237.83
100	370	133	237	241.37	240.22	237.30

Les clapets en position levée (déversement à la cote 238.80 NGF) garantissent la sécurité contre les débordements pour les crues de période de retour jusqu'à 40 ans environ ; les déversements dans le chenal conduisant à écrêter les débits dans la Leysse aval à des valeurs inférieures à 240 m³/s. Pour cette gamme de crues, le débit déchargé pourra être augmenté volontairement par abaissement des clapets.

Pour les crues rares de périodes de retour allant de 40 ans à 100 ans, l'abaissement progressif des clapets sera réglé automatiquement de manière à contrôler le débit de la Leysse aval. Le principe retenu consiste à réguler le débit dans la Leysse aval à la valeur maximale de 240 m³/s.

2.2.3 Prise d'eau associée à l'ouvrage de dérivation

Cet ouvrage permet d'assurer le prélèvement d'un débit dans la Leysse destiné à permettre la réalimentation de la partie aval du fossé du Baron recoupé par le chenal de décharge et à maintenir les conditions nécessaires au maintien des zones humides et à la salubrité du chenal de décharge.

La dérivation des eaux sera réalisée uniquement en fonction des besoins et occasionnellement, lorsque l'hydraulicité sera suffisante pour la préservation des milieux et de la vie piscicole sur la Leysse aval.

Le dimensionnement proposé pour l'ouvrage permettra la dérivation d'un débit variable de 0 à 150 l/s en écoulement normal de la Leysse.

3 OBJECTIFS DE L'ETUDE

L'objectif de l'étude est d'optimiser la conception de l'ouvrage et d'évaluer les possibilités de déplacement vers l'aval d'une quinzaine de mètres par rapport à l'implantation de l'Avant Projet élaboré par le bureau Stucky.

La méthodologie d'étude s'appuie essentiellement sur un modèle numérique à même de simuler les écoulements bi-dimensionnels (selon les directions X et Y en plan) dans la Leysse et dans l'ouvrage à clapets. La modélisation très détaillée reste limitée à un tronçon long d'environ 150 m au voisinage de la prise d'eau.

Les simulations sont menées en considérant le débit de la crue centennale et la décharge maximale de débit par les clapets abaissés, et le débit vingtenal pour lequel une décharge de 30 m³/s est prévue sur les clapets en position haute.

4 PRESENTATION GENERALE DE LA METODOLOGIE DE CALCUL

L'analyse hydraulique détaillée et l'optimisation de l'ouvrage de prise sur la Leysse se sont effectuées à l'aide d'un modèle numérique bidimensionnel.

HydroCosmos SA a développé le logiciel Dunamic 2D qui résout les équations complètes de St-Venant par la méthode des volumes finis. Les plus récents développements de l'hydraulique numérique y sont intégrés. Les flux aux interfaces des éléments sont résolus avec l'algorithme HLL (Harten, Laax, van Leer) modifié par Toro. Les termes sources sont traités de manière particulière pour permettre une simulation sur topographie réelle. Ce logiciel autorise l'analyse non-stationnaire de tous les écoulements bidimensionnels. La numérique utilisée permet évidemment l'étude des écoulements en régime mixte (fluvial, torrentiel) et le positionnement automatique des ressauts, mais également l'analyse de la propagation de fronts sur un terrain sec

Dunamic 2D fait partie des codes 2D non-stationnaires. Les autres codes faisant partie de cette même catégorie de programmes hydrauliques sont, par exemple, Telemac-2D du Laboratoire d'Hydraulique de EDF, Mike 21 du Danisch Hydraulic Institut, SMS de Boss International ou encore Wolf 2D de l'université de Liège.

4.1 L'hydraulique

Dunamic 2D résout les équations de St-Venant sous la forme :

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} - S &= 0 \\ \frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x^2}{h} + \frac{1}{2} gh^2 \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_y q_x}{h} \right) + gh \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\tau_{bx}}{\rho} &= 0 \\ \frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_y^2}{h} + \frac{1}{2} gh^2 \right) + gh \frac{\partial z}{\partial y} + \frac{\tau_{by}}{\rho} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

où h est la hauteur d'eau, q_x le débit unitaire en x , q_y le débit unitaire en y , S un terme source positif en cas d'apport et négatif en cas de perte, t le temps, z l'altitude du fond, τ_b la contrainte de frottement sur le fond et ρ la masse volumique du fluide.

Il faut noter que les termes convectifs ne contiennent pas les tensions turbulentes, supposées ici négligeables par rapport aux frottements externes.

Sous forme vectorielle, le système d'équation (1) s'écrit :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} + S = 0 \quad (2)$$

Les frottements sont calculés selon la relation de Bathurst :

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = 5.62 \log \left(\frac{R_h}{D_{84}} \right) + 4 \quad (3)$$

où f est le coefficient de frottement, R_h le rayon hydraulique et D_{84} la dimension caractéristique des aspérités. Exprimée en fonction de la contrainte de frottement, cette expression devient :

$$\begin{aligned} \frac{\tau_{bx}}{\rho} &= \frac{V_x |V|}{c_{fx}^2} \\ \frac{\tau_{by}}{\rho} &= \frac{V_y |V|}{c_{fy}^2} \end{aligned} \quad (4)$$

où V_x et V_y sont les composante de la vitesse et V sa norme. Le coefficient c_f se calcul selon (3) :

$$c_f = 5.62 \log\left(\frac{R_h}{D_{84}}\right) + 4 \quad (5)$$

4.2 La numérique

Dunamic 2D résout l'équation (2) à l'aide de la méthode des volumes finis. Sous forme discrétisée de manière structurée dans l'espace et avec un schéma d'intégration temporelle du premier ordre, cette équation devient :

$$U_{i,j}^{n+1} = U_{i,j}^n - \lambda(\tilde{F}_{i+1/2,j} - \tilde{F}_{i-1/2,j}) - \lambda(\tilde{G}_{i,j+1/2} - \tilde{G}_{i,j-1/2}) + \Delta t S_{i,j}^n \quad (6)$$

avec :

$$\lambda = \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (7)$$

\tilde{F} et \tilde{G} sont les flux numériques et approximent le flux moyen sur le pas de temps à travers les bords des volumes finis.

4.2.1 Le solveur de Riemann

Les flux numériques sont calculés en résolvant un problème de Riemann sur chaque bord des volumes finis. Ce problème se résout en 1D à travers chaque bord. Dunamic utilise ici une méthode de fractionnement des flux HLL (Harten, Lax, van Leer) avec un calcul des célérités proposé par E.F. Toro en 1995.

Le solveur HLL permet de calculer l'état moyen durant le pas de temps, en fonction de l'état et des flux à gauche (L) et à droite (R) du bord :

$$\tilde{U} = \frac{F_R - F_L - s_L U_L + s_R U_R}{s_R - s_L} \quad (8)$$

Dès lors, le flux numérique se détermine par :

$$\tilde{F} = \begin{cases} F_L & \text{si } s_L > 0 \\ F_R & \text{si } s_R < 0 \\ \frac{s_R F_L - s_L F_R + s_L s_R (U_R - U_L)}{s_R - s_L} & \text{sinon} \end{cases} \quad (9)$$

L'apport de Toro est de proposer des expressions simples pour le calcul des célérités :

$$s_L = \min(a_L; V^* - c^*) \quad (10)$$

$$s_R = \max(a_R; V^* + c^*) \quad (11)$$

où :

$$a_L = V_L - \sqrt{gh_L} \quad (12)$$

$$a_R = V_R + \sqrt{gh_R} \quad (13)$$

$$V^* = \frac{V_L + V_R}{2} + a_L - a_R \quad (14)$$

$$h^* = \frac{(V_L + 2a_L - V_R - 2a_R)^2}{16g} \quad (15)$$

$$c^* = \sqrt{gh^*} \quad (16)$$

Les équations (8) et (9) font l'hypothèse qu'une hauteur d'eau finie existe de chaque côté du bord. Dans le cas d'une propagation sur un fond sec, les deux valeurs propres de la matrice convective deviennent identiques et le système d'équations n'est plus strictement hyperbolique. Dans ce cas, les équations (10) et (11) deviennent :

$$\begin{aligned} s_L &= V_R - 2\sqrt{gh_R} \\ s_R &= V_R + \sqrt{gh_R} \end{aligned} \quad (17)$$

si l'élément sec est à gauche, et :

$$\begin{aligned} s_L &= V_L - \sqrt{gh_L} \\ s_R &= V_L + 2\sqrt{gh_L} \end{aligned} \quad (18)$$

si l'élément sec est à droite.

5 CONSTRUCTION DU MODELE NUMERIQUE

Comme c'est le cas pour un modèle réduit de laboratoire, un modèle numérique doit être construit, en respectant un certain nombre d'étapes.

5.1 Données à disposition

Les données topographiques et l'implantation de l'ouvrage de prise ont été fournies par le bureau Stucky Ingénieurs Conseils SA sous la forme d'un plan informatique No 03, affaire FR 2320, décembre 2002. Ce document contient un semis de points cotés en XYZ dans la Leysse et ses environs immédiat, les courbes de niveaux et l'ouvrage de prise lui-même.

Les conditions hydrauliques dans la Leysse à l'aval du modèle sont issues des études antérieures HYDROLAC-CNR. La relation de référence hauteur-débit en limite aval du modèle a été fournie par HYDROLAC le 26/02/2003.

Les conditions hydrologiques de la Leysse ont également été reprises de l'avant projet du bras de décharge.

5.2 Génération du modèle numérique de terrain

A partir du plan numérique cité ci-dessus, les points cotés et les lignes de ruptures ont été extraits et complétés dans le préprocesseur intégré au logiciel Dunamic 2D. Ces points et ces segments sont ensuite triangulés pour obtenir un *Irregular Triangulated Network* (TIN). La figure 5.1 montre la densité de cette information topographique de base ainsi que le TIN généré.

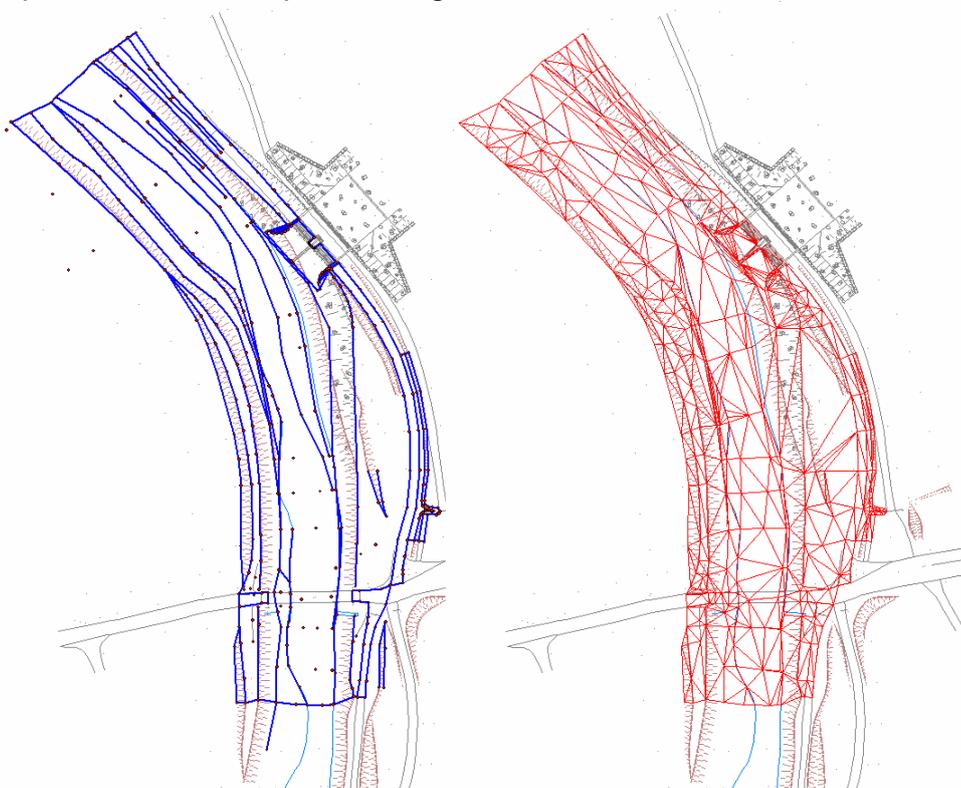


Figure 5.1 : Points cotés et lignes de rupture ; TIN.

Sur la base du TIN, un modèle numérique de terrain (MNT) a ensuite été calculé avec une résolution spatiale de 25 cm en x et y. L'ensemble du domaine d'étude est ainsi décrit par 175'302 points d'altitudes. Ce MNT est représenté sur la figure 5.2, coloré selon l'altitude et ombré.

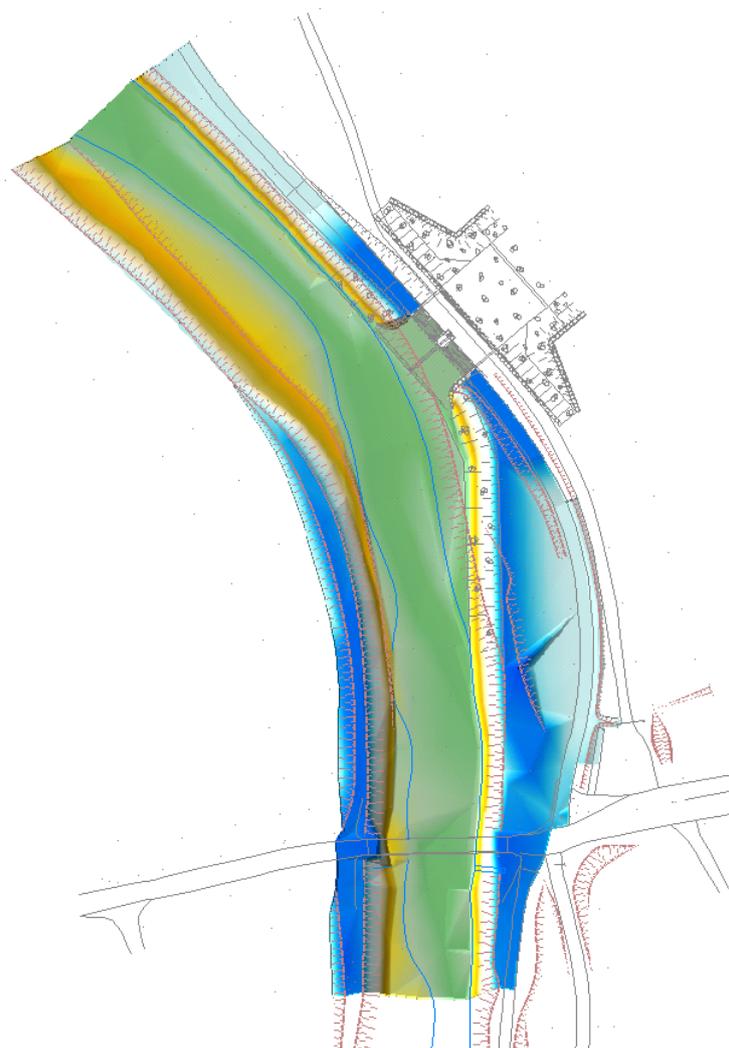


Figure 5.2 : Modèle numérique de terrain (MNT) de la Leysse et de l'ouvrage de prise selon l'avant-projet.

5.3 Conditions limites

Une bonne imposition de conditions limites est indispensable à l'obtention d'une solution de qualité et stable. Pour des modèles bidimensionnels non-stationnaires, le nombre de conditions à imposer dépend du régime d'écoulement (fluvial/torrentiel) et du sens de l'écoulement (entrant/sortant).

Dans le cas de la Leysse, la condition limite amont est simplement une condition de débit. Les clapets sont simulés par une condition limite aval en écoulement critique. Un nombre de Froude de 1 y est donc imposé. Par contre, la condition limite aval sur la Leysse est plus délicate à définir, mais fondamentale pour tout le domaine analysé.

Normalement, une condition limite aval en niveau d'eau est imposée dans ce genre de situation. A chaque débit correspond une hauteur d'eau, calculée par un modèle 1D depuis le lac par exemple. La présence de la prise d'eau rend cette

solution difficilement applicable puisque le débit dérivé, et donc le débit restant dans la Leysse ne sont pas connus a priori.

Pour contourner cette difficulté, il peut être remarqué que le nombre de Froude demeure très constant dans un profil en travers, et ceci pour une large gamme de débits. L'idée consiste donc à imposer un nombre de Froude à l'aval.

Pour le déterminer, les résultats d'une étude précédente effectuée par HydroLac nous ont été transmis par M. Abrassart. La figure 5.3 présente la relation hauteur-débit du profil 5140 ainsi que le nombre de Froude en fonction du débit.

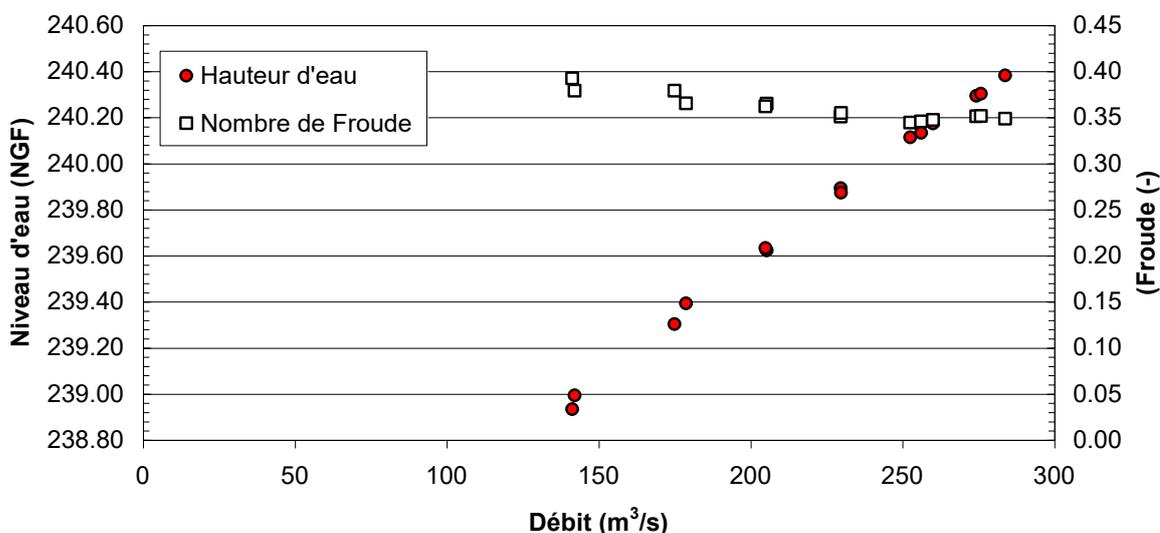


Figure 5.3 : Relation hauteur-débit et Froude-débit du profil 5140 à l'aval du modèle 2D.

A nouveau, cette caractéristique originale des cours d'eau (la constance du Nombre de Froude pour différents débits) se vérifie dans la Leysse. Une valeur moyenne de Froude de 0.35 est obtenue et imposée à l'aval du modèle.

La figure 5.4 résume les conditions limites imposées pour les différentes simulations numériques.

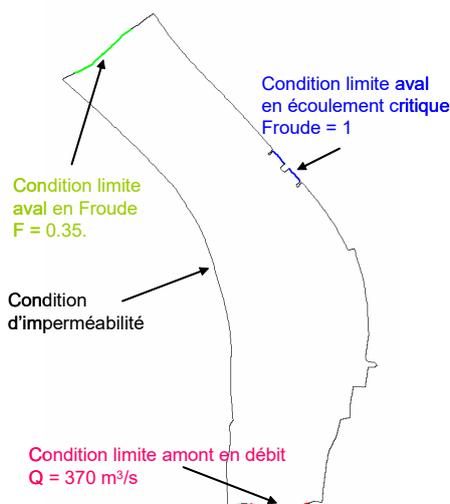


Figure 5.4 : Conditions limites du modèle numérique.

5.4 Conditions initiales

La connaissance d'une solution initiale est indispensable au démarrage d'une simulation numérique. Dans le cas de la Leysse, seules les solutions stationnaires stabilisées sont intéressantes. L'évolution temporelle pour y arriver ne présente aucun intérêt. La condition initiale peut alors être quelconque.

Toutes les simulations démarrent donc avec une situation simple à générer, soit un plan d'eau horizontal et un champ de vitesses nulles.

La figure 5.5 présente un exemple de contrôle de convergence vers une solution stabilisée. Il y est constaté que l'écoulement de la Leysse est stabilisé après une durée de 6 minutes, qui a été retenue pour toutes les simulations. Les paramètres qui permettent de juger la convergence sont, entre autres, le volume d'eau total contenu dans le modèle et l'énergie cinétique moyenne dans le domaine.

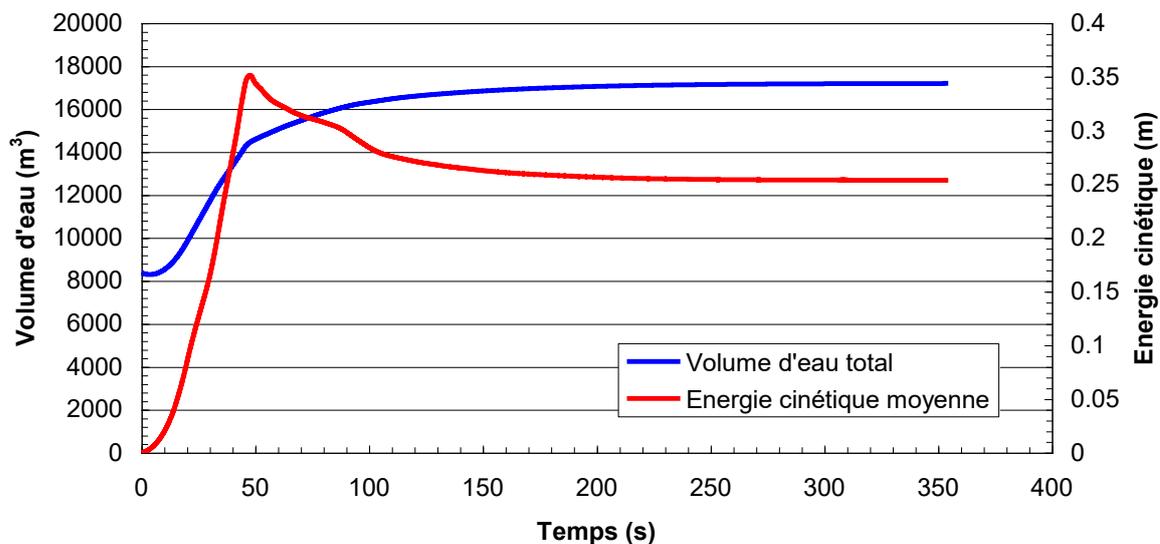


Figure 5.5 : Exemple de courbes de convergence temporelle entre la solution initiale et la solution stationnaire recherchée.

D'un point de vue scientifique, la cassure de comportement visible à environ 50 s après le début du calcul correspond au temps nécessaire pour que la caractéristique provenant de la condition limite amont atteigne l'aval du modèle. A partir de cet instant, la condition limite aval exerce son influence sur l'ensemble du domaine jusqu'à la convergence.

6 EXPLOITATION DU MODELE NUMERIQUE

6.1 Bien-fondé de l'élargissement de la Leysse

L'avant projet de l'ouvrage de prise sur la Leysse prévoit un élargissement du cours d'eau en rive droite. Un des objectifs de la présente étude est d'analyser le bien-fondé de cette mesure d'un point de vue hydraulique.

Une première simulation a été entreprise avec la configuration proposée dans l'avant projet et pour le débit centennal. La figure 6.1 présente une vue générale du modèle coloré selon le module du débit unitaire et ombré par rapport à la surface du plan d'eau. La figure 6.2 se concentre sur la zone de l'ouvrage en présentant le module du débit unitaire ($m^3/s/m$) ainsi que les vecteurs vitesses.

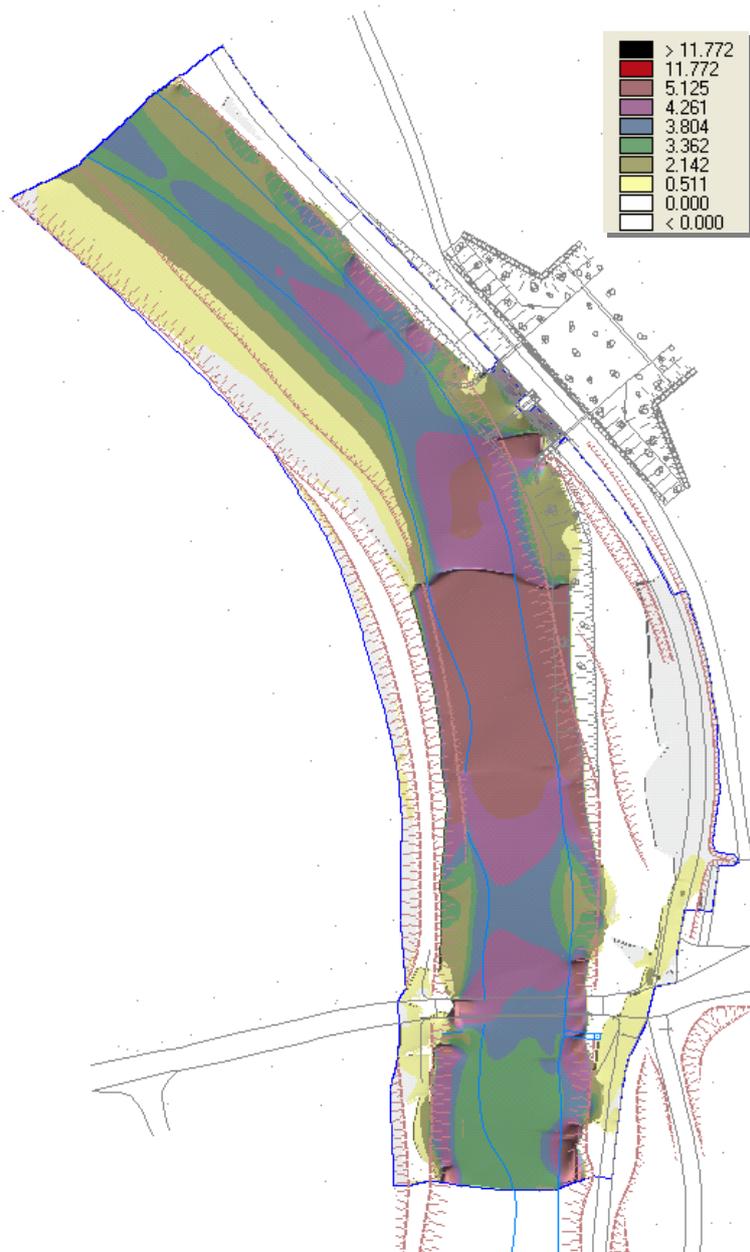


Figure 6.1 : Aspect des écoulements pour la variante d'avant projet, coloré selon le module du débit unitaire.

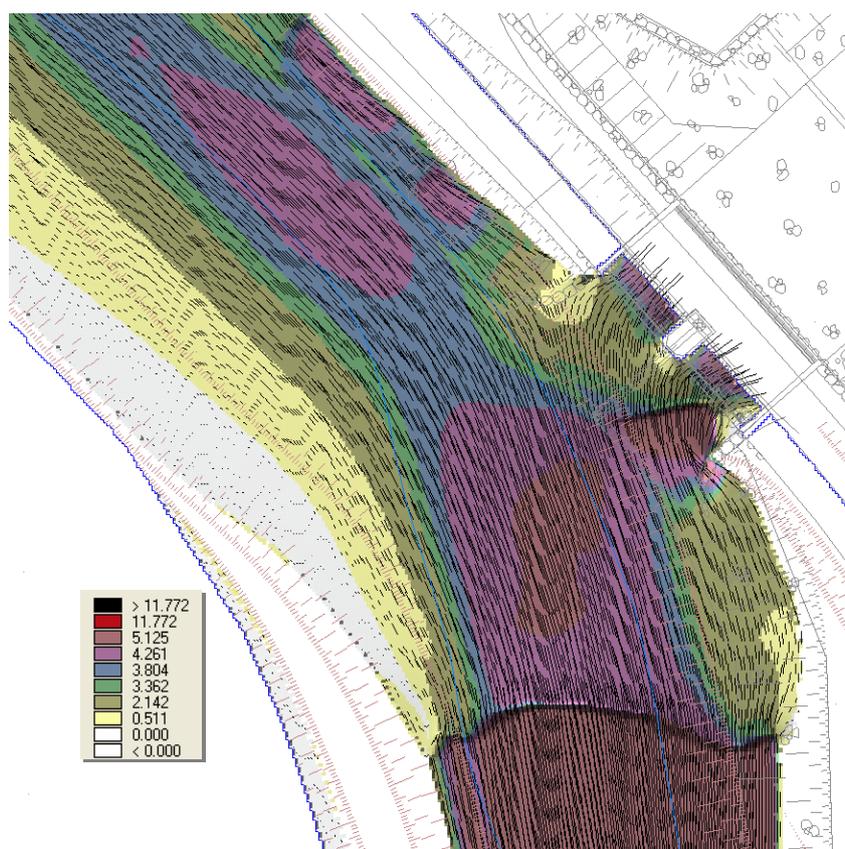


Figure 6.2 : Module de débit unitaire et vecteurs vitesse dans la zone de l'ouvrage pour la variante d'avant projet.

La première caractéristique hydraulique surprenante qui ressort de ces images est bien entendu la présence d'un ressaut hydraulique à l'amont de l'ouvrage de prise. Ce phénomène gênant sera abondamment discuté plus bas lors du choix de la position de l'ouvrage et de son optimisation hydraulique.

En ce qui concerne l'élargissement prévu en rive droite, il apparaît qu'il est défavorable à un bon entonnement dans les passes. L'eau dans cette zone est dirigée vers le centre de la rivière par le mur d'aile (effet de déversement), puis doit brusquement revenir à droite pour entrer dans la première passe. Ce phénomène s'accompagne de la formation d'un ressaut local dans la passe amont.

Cet élargissement n'est donc pas favorable à de bonnes conditions d'écoulements. Il faut garder la rive droite dans sa situation actuelle, de manière à éviter le « gauche-droite » juste à l'entrée de l'ouvrage.

La figure 6.3 présente la répartition du débit dans chacune des passes de l'ouvrage tel que prévu dans l'avant projet. Le débit dérivé par la passe amont est de $39.9 \text{ m}^3/\text{s}$, tandis que la passe aval dérive $73.1 \text{ m}^3/\text{s}$. Le débit dérivé par l'ouvrage est donc de $113.0 \text{ m}^3/\text{s}$, valeur sensiblement inférieure aux $130 \text{ m}^3/\text{s}$ souhaités.

Il ressort de cette figure qu'une optimisation de la géométrie de l'ouvrage est encore nécessaire.

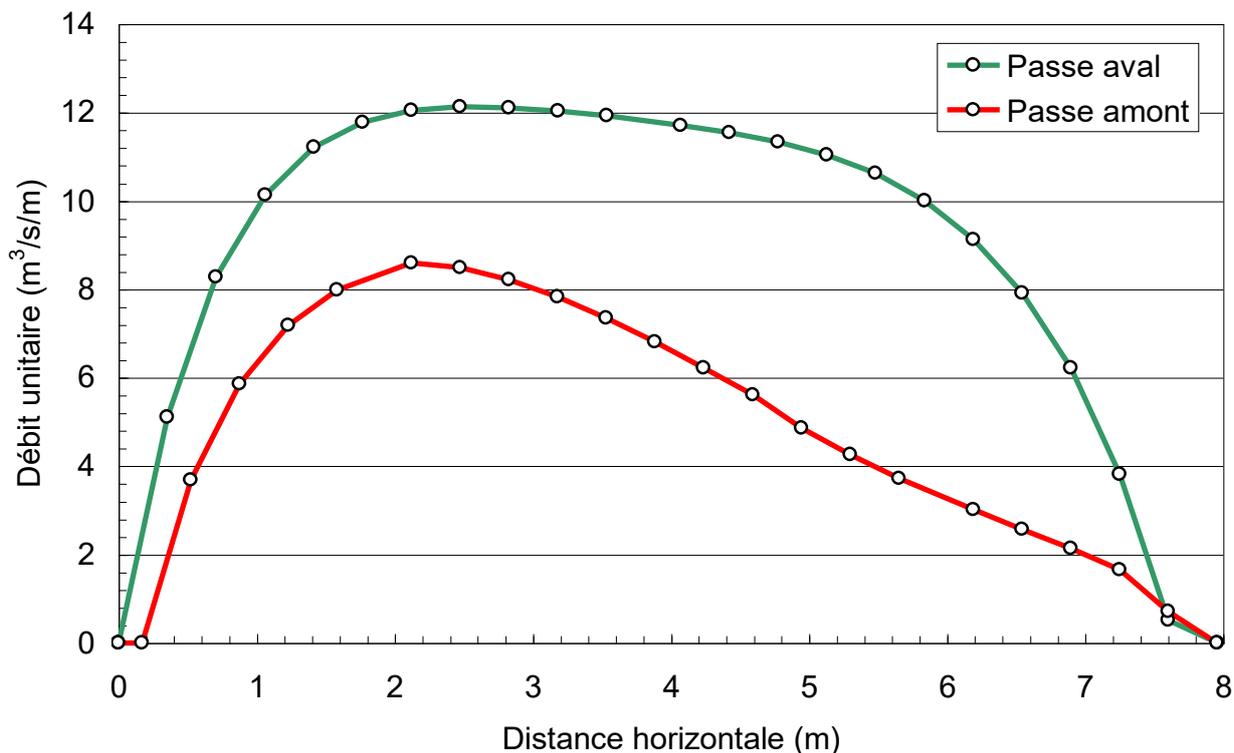


Figure 6.3 : répartition des débits sur les deux passes de l'ouvrage prévu dans l'avant projet et pour le débit centennal.

6.2 Choix de la position de l'ouvrage

Un des objectifs principaux de cette étude hydraulique détaillée de l'ouvrage de prise est le choix de sa position le long de la Leysse. Par rapport à l'avant projet, une proposition a été faite de le positionner à environ 15 m plus en aval. Ces deux variantes ont été testées numériquement pour le débit centennal et sont présentées sur les figures 6.4 et 6.5.

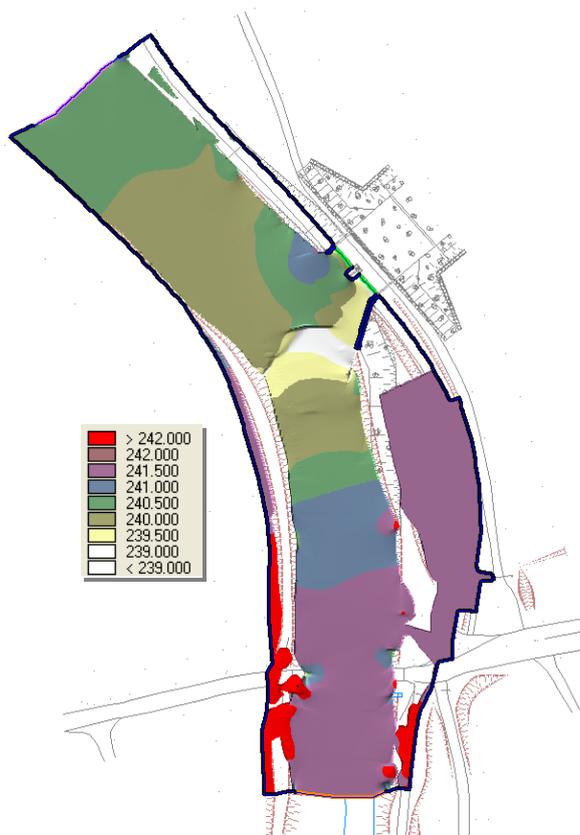


Figure 6.4 : Altitude du plan d'eau pour la variante amont (avant projet) et le débit centennial.

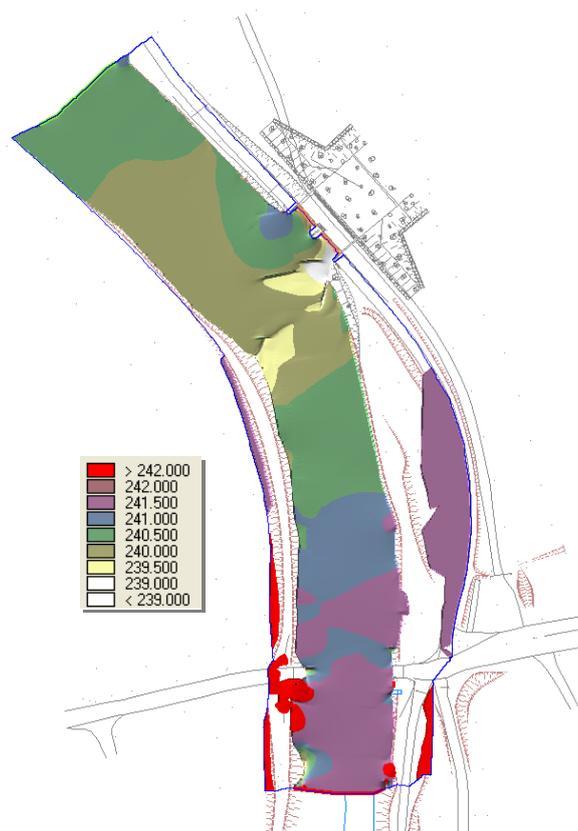


Figure 6.5 : Altitude du plan d'eau pour la variante aval et le débit centennal.

Les « lacs » visibles dans les bords du modèle ne doivent pas être considérés. Leur origine provient de légers débordements qui se produisent au droit du pont du Tremblay. Comme les bords du modèle numérique sont considérés imperméables, l'eau ne peut pas s'étaler dans la plaine et reste enfermée dans le domaine de calcul.

Comme déjà mentionné plus haut, et contre toute attente, un ressaut hydraulique se développe dans la zone de l'ouvrage. Ce phénomène est plutôt surprenant dans une rivière qui coule dans sa plaine alluviale juste à l'amont d'un lac. Des renseignements ont donc été pris auprès de M. Abrassart, qui possède une grande expérience de l'hydraulique de la Leysse et qui a confirmé la présence de ressauts hydrauliques à plusieurs endroits de ce cours d'eau.

Dans la zone modélisée, la Leysse présente un rétrécissement dans le secteur du pont du Tremblay, suivi d'un important élargissement dans la courbe à gauche, devant l'ouvrage de prise. D'un point de vue hydraulique, ce rétrécissement est suffisamment marqué pour forcer un écoulement critique suivi d'un ressaut. L'hydraulicien connaît bien ce cas d'école du rétrécissement en écoulement fluvial qui nécessite une surélévation du plan d'eau amont, suivi d'une accélération en hauteur critique et d'un ressaut pour revenir en régime fluvial.

Dans la situation géométrique concrète de ce secteur de la Leysse, le phénomène est globalement le même que ce cas d'école, mais présente quelques particularités bien locales accentuées par le soutirage latéral du débit dérivé.

Un ressaut hydraulique juste au droit d'une prise d'eau est à éviter absolument. Il génère de grandes variations du niveau du plan d'eau et ne permet plus le contrôle du débit dérivé. La position de ce ressaut devient donc le critère du choix de la position de l'ouvrage.

La figure 6.5, qui présente l'aspect du plan d'eau pour la variante aval, montre clairement la présence du ressaut juste devant la passe amont de l'ouvrage de prise. Pour la variante amont d'avant projet, ce ressaut est toujours présent, mais situé plus à l'amont, dans le cours d'eau.

D'un point de vue hydraulique, la variante amont est donc plus favorable car elle permet de confiner le ressaut hydraulique dans la Leysse, et non pas dans l'ouvrage de prise lui-même.

6.3 Optimisation de la géométrie pour Q_{100}

A partir du moment où l'endroit de la prise d'eau est choisi, une optimisation de la géométrie demeure nécessaire afin de maximiser les performances hydrauliques de l'ouvrage de prise.

Au cours de cette étude, il est apparu rapidement que les deux murs d'aile prévus en enrochements bétonnés n'offraient pas une ouverture suffisante sur le cours d'eau pour permettre un entonnement satisfaisant. Le mur d'aile amont doit être ouvert pour permettre à l'écoulement de rentrer plus directement dans la passe amont. Cette mesure est associée avec le maintien de la rive droite dans sa situation actuelle. Le mur d'aile aval a été ouvert au maximum pour éviter un effet de butée de l'écoulement qui entraîne une surélévation du plan d'eau près de la passe aval ainsi qu'une asymétrie du débit dérivé. Ces modifications sont déjà implémentées dans la simulation visible sur la figure 6.4.

Cette première phase d'optimisation n'a cependant pas amélioré la situation du ressaut hydraulique présent juste à l'amont de l'ouvrage. Il serait souhaitable de pouvoir le pousser au maximum possible vers l'amont. Pour atteindre cet objectif, il a été imaginé de réaliser un épi en rive gauche, à l'intérieur de la courbe en aval de l'ouvrage. L'idée est que cet épi entraîne une surélévation du plan d'eau au niveau de l'ouvrage, et repousse donc le ressaut hydraulique vers l'amont. La figure 6.6 présente les niveaux d'eau simulés dans cette configuration pour le débit centennal.

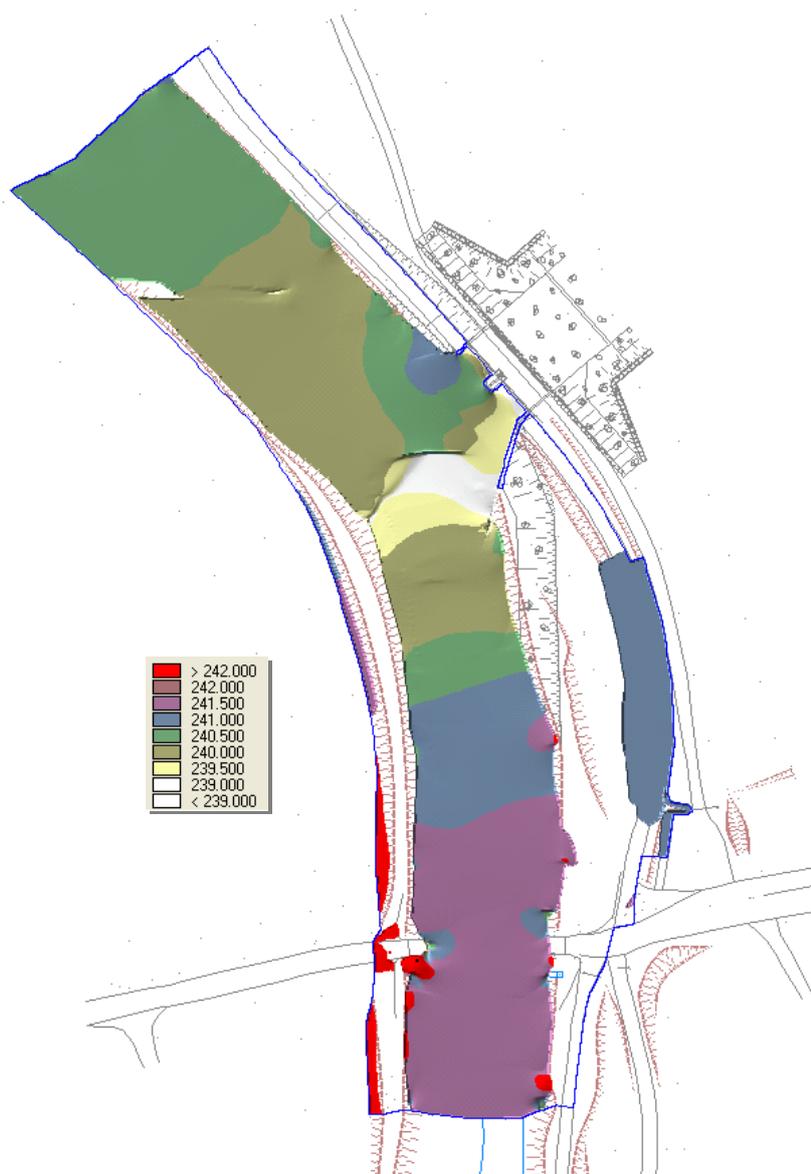


Figure 6.6 : Altitude du plan d'eau avec présence d'un épi en rive gauche et pour le débit centennal.

Aucune différence sensible ne peut être observée entre la figure 6.4 et la figure 6.6. L'épi se situe dans une zone d'écoulement tranquille et ne produit pas de perte de charge singulière suffisante pour rehausser de manière significative le plan d'eau. Une analyse détaillée de ces simulations permet de constater que le ressaut s'est déplacé d'un mètre environ vers l'amont. Cet effet n'est pas en mesure avec la réalisation de l'épi.

La construction d'un épi à l'aval de l'ouvrage de prise n'apporte donc pas l'efficacité recherchée et n'est donc pas recommandée.

Un autre problème hydraulique de l'ouvrage de prise est l'asymétrie de la répartition des débits dérivés entre les deux passes. La passe amont dérive un plus faible débit que la passe aval. Afin de répartir au mieux les flux, il a été décidé de prolonger le mur qui sépare les deux passes en direction du cours d'eau. Cette mesure doit générer un plan d'eau plus régulier à l'amont de la prise, et par conséquent un débit mieux réparti. La figure 6.7 présente le résultat obtenu.

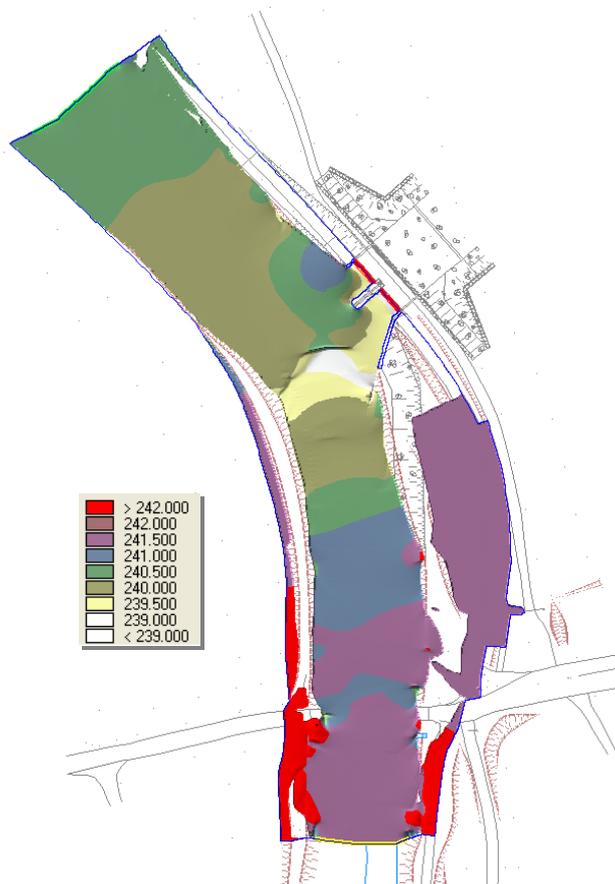


Figure 6.7 : Altitude du plan d'eau pour la variante proposée et pour le débit centennal.

Le mur qui s'avance vers la Leysse exerce bien un effet de butée qui permet de mieux alimenter la passe amont et qui « protège » la passe aval. La figure 6.8 présente une vue plus détaillée de la zone de l'ouvrage, avec également l'indication des vecteurs vitesse.



Figure 6.8 : Détail de la zone de l'ouvrage de prise avec l'altitude du plan d'eau et les vecteurs vitesse pour le débit centennal.

Il est clair que le plan d'eau demeure plus haut devant la passe aval, mais la situation s'est passablement améliorée grâce au mur central. Le ressaut s'est également légèrement déplacé vers l'amont.

Cette variante optimisée est recommandée pour la réalisation.

La figure 6.9 présente la répartition transversale détaillée du débit unitaire au droit de chacune des passes. L'asymétrie entre les clapets est toujours présente, mais demeure maintenant dans des proportions acceptables. Le tableau suivant résume les débits dérivés dans cette configuration proposée et lors de la crue centennale.

Débit dérivé par la passe amont	56.9 m ³ /s
Débit dérivé par la passe aval	76.6 m ³ /s
Débit dérivé par l'ouvrage	133.5 m ³ /s

L'objectif est de dériver 130 m³/s lors de la crue centennale. Le résultat obtenu pour cette variante optimisée est tout à fait acceptable et confirme le dimensionnement des clapets effectué lors de l'avant projet.

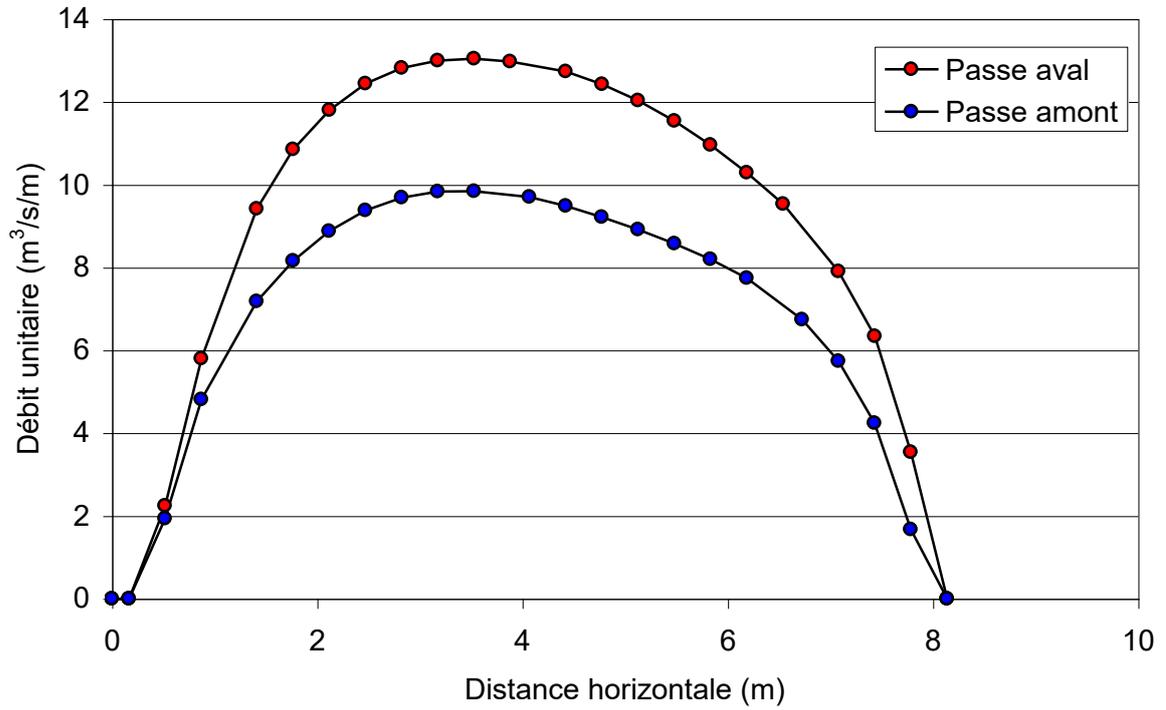


Figure 6.9 : Répartition des débits entre les deux passes de l'ouvrage pour la crue centennale.

Suite à cette proposition d'aménagement de l'ouvrage de prise, le bureau Stucky a généré une variante constructive esquissée sur la figure 6.10.

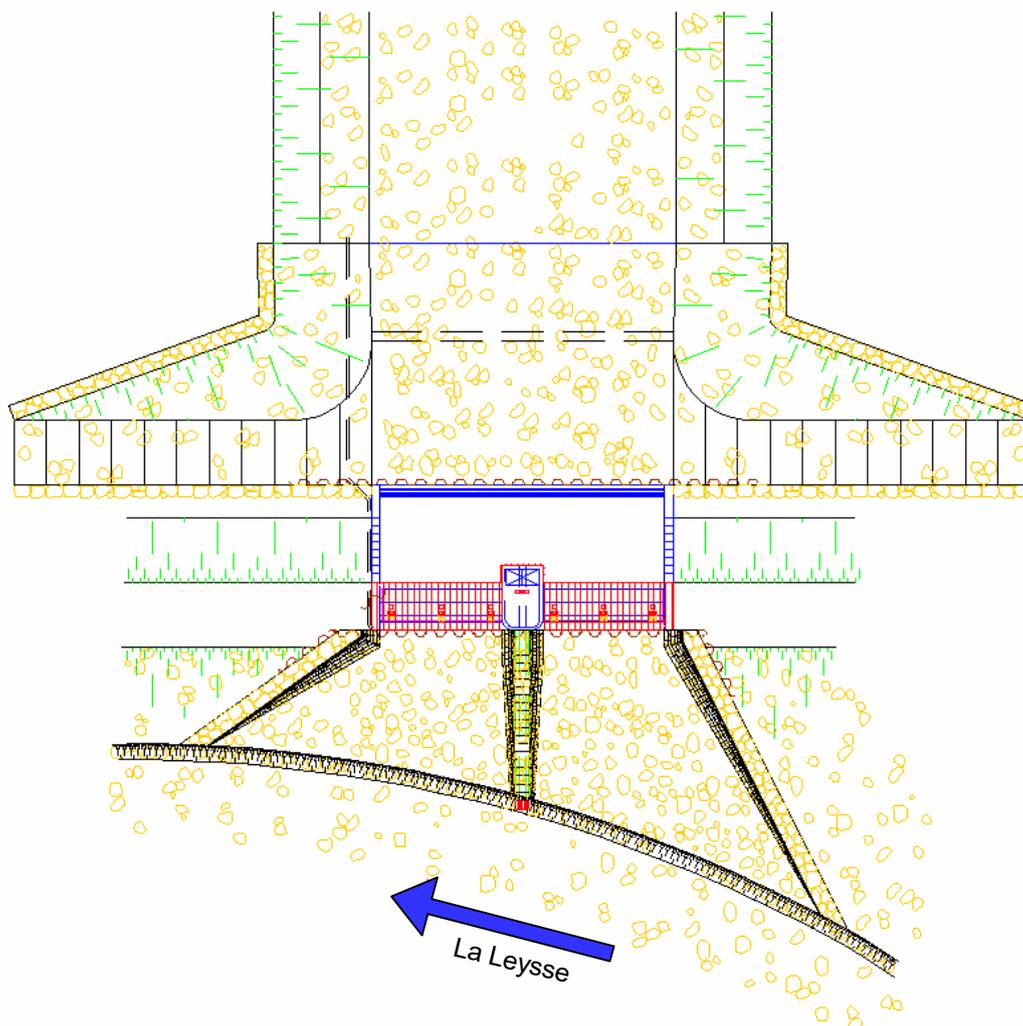


Figure 6.10 : Variante constructive proposée.

Tous les éléments optimisés durant cette étude hydraulique de détail ont été intégrés dans ce projet. La seule légère différence concerne le mur proposé entre les deux passes en direction de la Leysse. Pour des questions constructives et paysagères évidentes, ce mur est maintenant constitué d'enrochements inclinés en direction de l'écoulement. D'un point de vue hydraulique, il ne fait pas de doute que le comportement de cet ouvrage est le même que la variante « théorique » modélisée numériquement.

6.4 Validation pour Q_{20}

L'optimisation hydraulique de l'ouvrage de prise s'est essentiellement concentrée sur le débit centennal, qui représente le cas de charge le plus sévère de cet ouvrage. L'autre comportement souhaité de cet ouvrage est la dérivation de $30 \text{ m}^3/\text{s}$ pour la

crue de période de retour 20 ans de $230 \text{ m}^3/\text{s}$. Dans cette situation, les clapets sont en position haute.

Cette situation a été simulée numériquement et est présentée sur la figure 6.10. Il apparaît que le ressaut qui se produit pour la crue centennale disparaît, l'écoulement laissant juste entrevoir une légère ondulation de surface.

Les débits dérivés dans cette situation sont

- $23.4 \text{ m}^3/\text{s}$ pour la passe aval
- $19.4 \text{ m}^3/\text{s}$ pour la passe amont
- soit $42.8 \text{ m}^3/\text{s}$ pour l'ouvrage de dérivation.

Cette valeur est sensiblement supérieure à l'objectif des $30 \text{ m}^3/\text{s}$ dérivé pour Q_{20} . Un calcul inverse du déversement nous indique qu'il faudrait surélever de 29 cm le niveau supérieur des clapets pour dériver le débit voulu.

Il faut cependant relativiser ce calcul puisqu'il est très sensible à la condition limite aval du modèle. Pour un même débit, le niveau d'eau de la Leysse varie certainement en fonction des saisons et du degré de croissance de la végétation. Cette variation possible du niveau aval est du même ordre de grandeur que ces 29 cm de surélévation théorique du sommet des clapets et correspond également à une marge d'incertitude sur les résultats du calcul. Et comme sur un déversoir, une faible variation du niveau d'eau entraîne une importante variation du débit, cette petite incertitude sur le niveau aval génère une sensible augmentation du débit, passant de 30 à $42 \text{ m}^3/\text{s}$.

En considérant les remarques ci-dessus, il est recommandé de ne pas modifier le calage altimétrique du sommet des clapets, tel que prévu lors de l'avant projet.

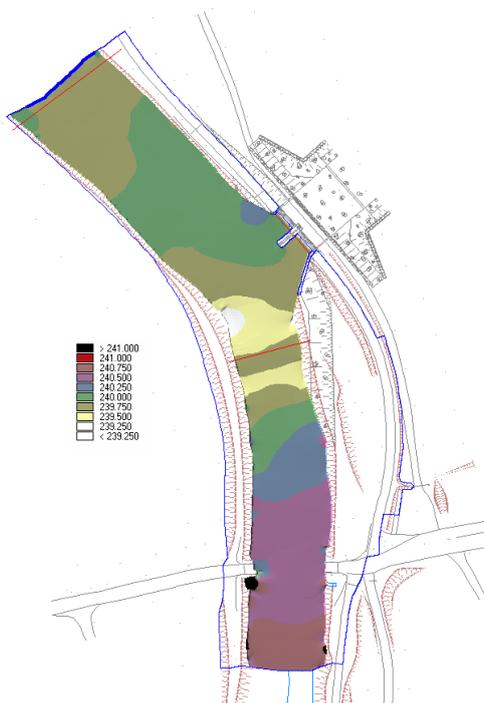


Figure 6.10 : Altitude du plan d'eau pour la variante proposée et pour Q₂₀.

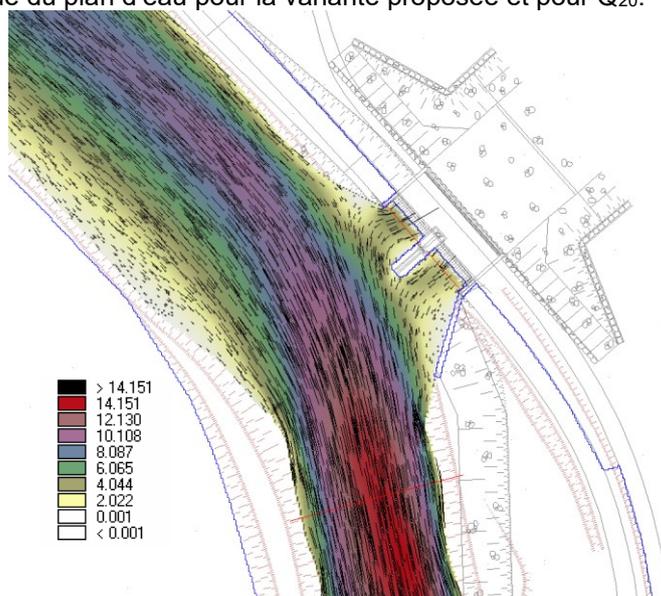


Figure 6.11 : Détail de la zone de l'ouvrage de prise pour Q₂₀ coloré selon le module du débit unitaire (m³/s/m) et avec les vecteurs vitesse.

7 SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS

L'étude hydraulique de détail de l'ouvrage de prise sur la Leysse a permis de valider et d'optimiser les choix entrepris lors de l'élaboration de l'avant projet. D'un point de vue global, l'ouvrage proposé est à même de remplir sa fonction stratégique au sein du système de protection contre les crues de la Leysse, dans la plaine à l'amont du lac du Bourget. La dérivation de 130 m³/s est assurée lors de la crue centennale, même en présence d'un ressaut hydraulique entre le pont du Tremblay et l'ouvrage de prise.

Entre autres, cette étude conclu à :

- Maintenir dans son état actuel la berge en rive droite à l'amont de l'ouvrage, et de ne pas l'élargir comme cela avait été imaginé ;
- Positionner l'ouvrage de prise selon la proposition de l'avant projet, et non pas 15 m plus en aval, pour éviter la présence d'un ressaut hydraulique dans l'ouvrage lui-même ;
- Ouvrir les murs d'aile de l'ouvrage de prise afin d'améliorer les conditions d'entonnement ;
- Réaliser un mur de séparation plus important entre les deux passes, afin de répartir au mieux les débits.

Au stade du projet, même une analyse hydraulique poussée ne permet pas de lever toutes les incertitudes. Il est donc recommandé, après la mise en eau de l'ouvrage, de procéder à une phase d'observation et de calage, notamment en ce qui concerne les niveaux d'eau « seuils » qui commandent les manœuvres des clapets. Ce système à la fois simple et très souple est également un garant du bon comportement de l'ouvrage.



Jérôme Dubois

Vernayaz, le 30.01.2022

HydroCosmos/RP-M02-032-001