

Réfection des seuils sur l'Arly (zone des barrages)

Refurbishment of weirs on the Arly river

Sébastien Derrien

Artelia Eau et Environnement – 6 rue de Lorraine 38 130 Echirolles
sebastien.derrien @arteliagroup.com

Jean-Philippe Jarrin

Géolithe – 181 Rue des Bécasses 38 920 Crolles
jp.jarrin@geolithe.com

Frédéric Clerec, Armand Cassaro

Conseil Général de Savoie – Direction des Routes – Service Ouvrages d'Art – 1 Rue des Cévennes 73 020
Chambéry
frederic.clerec@cg73.fr, armand.cassaro @cg73.fr

MOTS CLÉS

Rampe en enrochements, bassin de dissipation, modèle physique

RÉSUMÉ

Les deux seuils des gorges de l'Arly et leurs bajoyers en béton, qui contribuent à la stabilité du talus de la route départementale RD1212, ont subi des désordres structuraux importants dus aux crues et à des mouvements de versant. Afin de sécuriser cet axe routier à enjeux, le Conseil Général de Savoie a engagé un programme de réfection de ces ouvrages. Dans ce cadre, des études sont en cours, afin de définir la solution la plus pertinente au regard des contraintes et des enjeux du site.

En complément de la réfection des bajoyers endommagés, le principe d'aménagement retenu consiste à remplacer les deux seuils verticaux en béton par un coursier continu en enrochements. Ce type d'ouvrage, de comportement hydraulique similaire à celui d'un déversoir sur digue ou d'un évacuateur de crue de type seuil déversant, a fait l'objet d'essais sur modèle réduit, ce qui a permis d'en préciser les caractéristiques et le fonctionnement face aux contraintes hydrauliques et de transport solide. Les aménagements sont les suivants :

- *réalisation d'une rampe en enrochements liaisonnés au béton (15 m de large, débit unitaire de 24 m³/s/m, pente 10% sur une longueur de 175 m) avec bassin de dissipation en pied (longueur de 35 m) ;*
- *confortement du bajoyer en rive droite par clouage et béton projeté ;*
- *remplacement complet du bajoyer rive gauche.*

ABSTRACT

The two weirs of the Arly gorges and their concrete side walls, which contribute to the stability of the main road RD1212, have suffered significant structural damage due to floods and slope movements. To secure this important road, the Conseil Général of Savoie has initiated a program of rehabilitation of these structures. In this context, studies are being carried out, in order to define the most appropriate solution given the constraints and issues of the site. In addition to the repair of damaged side walls, the principle of the work is to replace the two vertical weirs by a continuous concreted riprap spillway. This type of structure, similar to a spillway structure on a levee or a dam, has been tested on a scale model, which helped to define its characteristics and functioning given the hydraulic and sediment transport constraints. The facilities are as follows:

- *completion of a concreted rockfill ramp (15 m wide, linear flow rate of 24 m³/s/m, slope 10% over a length of 175 m) with stilling basin (length 35 m);*
- *reinforcement of the right side wall by anchor bars and shotcrete protection ;*
- *complete replacement of the left side wall.*

1. INTRODUCTION

Les seuils des gorges de l'Arly, réalisés en 1964 entre Ugine et Flumet dans un secteur étroit et pentu de la rivière, consistaient, en remplacement des barrages construits en 1937-1938, en la construction de deux seuils en béton armé. De nombreuses crues ont créé des désordres structuraux importants qui ont fragilisé les ouvrages, aggravés par des mouvements de versant. La réhabilitation complète des ouvrages s'avèrent aujourd'hui nécessaire.

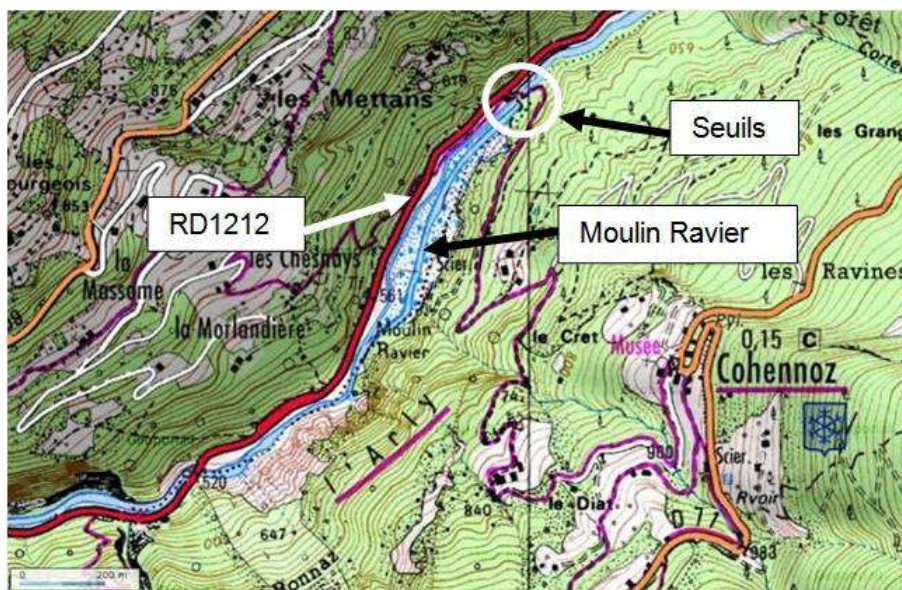
Afin de définir la solution la plus pertinente au regard des contraintes et des enjeux du site, le Maître d'Ouvrage a confié au groupement ARTELIA (ex-Sogreah) – Géolithe la réalisation d'une mission de maîtrise d'œuvre partielle (AVP avec modèle physique, PRO, ACT et VISA), dont les principaux objectifs sont les suivants :

- définir les aménagements relatifs à la réhabilitation des seuils (coursier en enrochements, fosse de dissipation, confortement des bajoyers) ;
- tester sur modèle physique le fonctionnement hydraulique de la solution retenue pour en vérifier l'intérêt et optimiser si nécessaire ses caractéristiques techniques.

2. DESCRIPTION DES OUVRAGES ET DES CONTRAINTES

2.1 Le site

Les seuils des gorges de l'Arly sont situés entre Ugine et Flumet au droit du village de Cohennoz, en amont immédiat du lieu-dit "Moulin Ravier". Sur ce tronçon, la vallée de l'Arly est étroite et encaissée, et présente une pente importante (4.5%). Ce secteur est marqué par d'importants mouvements de terre, dont les premières manifestations remontent aux années 1950, et qui ont entraîné la formation de la plage de dépôt de Moulin Ravier. Sur ce secteur, la route départementale 1212 longe l'Arly en rive droite.



Graphique 1 : Plan de situation

2.2 Contexte géologique, géotechnique et morphologique

Les seuils de l'Arly sont dominés par des versants boisés raides (~30 à 35°), qui sont le siège de mouvements de versant de grande ampleur. Sur la zone concernée par le glissement, le substratum est constitué de Micaschiste de la série satinée de Belledonne. Il apparaît fracturé et se décline en ensembles d'orientation hétérogène. Ce substratum est recouvert d'éboulis de pente, pour lesquels la carte géologique indique, sur les deux rives, une instabilité générale du versant. Deux glissements majeurs se sont produits. Le premier, rive gauche, explique la présence d'alluvions de fond en amont, suite à de probables obturations de la vallée. Des sondages effectués en rive droite, au droit du second éboulement, mettent en évidence la présence d'alluvions sous des micaschistes altérés.

L'analyse géotechnique, basée sur les sondages effectués lors d'études antérieures et complétés par un programme d'investigation complémentaire, a permis de caractériser la nature des sols de la manière suivante :

- en rive droite : présence d'éboulis à blocs métriques sur une hauteur supérieure à 10 m ;
- en rive gauche : présence d'éboulis à blocs métriques sur une hauteur de 12 m, puis rocher au-delà ;
- dans le lit : présence d'éboulis à blocs métriques sur une hauteur supérieure à 10 m.

L'Arly est un torrent à fort transport solide, capable de transporter des blocs de taille supérieure à 1 m lors des épisodes de crue. Les contraintes érosives sur les ouvrages sont très fortes et constituent un paramètre important dans le choix des aménagements.

2.3 Les ouvrages et leurs désordres

L'ouvrage est constitué de deux seuils en béton armé, reprenant une dénivelée de 13 mètres environ sur un linéaire de 110 mètres. Les seuils sont compris entre des murs bajoyers en béton, et comportent chacun une fosse de dissipation en pied de chute prolongée vers l'aval par un radier en enrochements bétonnés. Les murs bajoyers assurent un rôle de soutènement de la RD1212 qui longe l'Arly et domine les seuils.

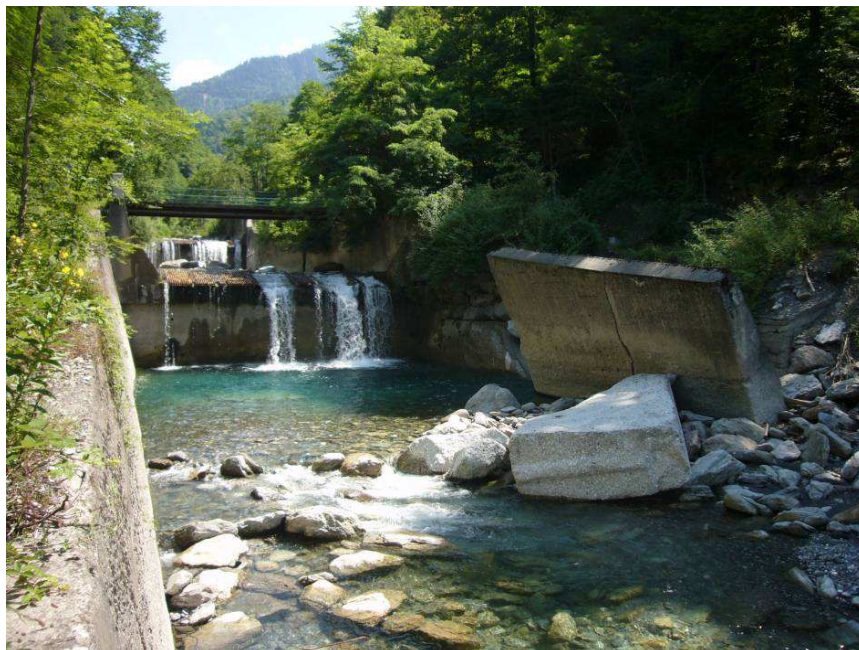
Une conduite enterrée en rive droite permet de dériver les eaux de l'Arly et de court-circuiter les seuils afin d'intervenir sur les ouvrages pour des opérations d'entretien. En amont immédiat du second seuil, une passerelle carrossable permet le franchissement de l'Arly et dessert une piste d'accès à Cohennoz (en rive gauche).

De nombreuses crues et plus particulièrement celle de 1997 ont créés des désordres structuraux importants qui ont fragilisé l'ouvrage, aggravés par des mouvements de versant, en rive gauche principalement. Les désordres les plus inquiétants intéressent les bajoyers en rive gauche, fortement érodés et fissurés, et qui ont basculé partiellement dans le lit de la rivière. Les désordres constatés s'expliquent par :

- un agencement en "boîte", système rigide composé des radiers et des bajoyers en béton armé, et constituant un espace vide soumis aux poussées du versant en glissement ;
- un mode de dissipation favorisant le choc de blocs contre les radiers et bajoyers, ce qui conduit à user le béton et à fragiliser la structure.



Graphique 2 : Seuil amont – bajoyer rive gauche fissuré et affaissé



Graphique 3 : Seuil aval – basculement du bajoyer rive gauche

3. SOLUTION DE REMPLACEMENT DES SEUILS ET DE REFECTION DES BAJOYERS

Après analyse de différentes solutions de réfection des seuils (reconstruction à l'identique, ouvrages poids, rampe en enrochements libres ou liaisonnés, rampes en enrochements artificiels), le principe de solution retenue pour le remplacement des seuils est la suivante :

- rampe en enrochements liaisonnés au béton, avec une pente de coursier de 10% ;
- confortement du bajoyer en rive droite par clouage et béton projeté ;
- confortement du bajoyer en rive gauche : le choix d'aménagement est conditionné par les résultats des investigations géotechniques complémentaires, qui doivent permettre de lever les incertitudes sur la nature et l'ampleur des mouvements de versant en rive gauche, et définir en conséquence les solutions de remplacement.

3.1 Rampe en enrochements liaisonnés et bassin de dissipation

Le principe d'aménagement est de réaliser un coursier rugueux faiblement incliné permettant une dissipation partielle de l'énergie, du fait de la rugosité obtenue par la disposition des blocs. Le coursier est constitué d'enrochements liaisonnés au béton, reposant sur une sous-couche drainante et traversé de barbacanes.

Un bassin de dissipation est prévu en pied de coursier afin de dissiper l'énergie résiduelle avant retour au lit naturel. Compte tenu des fortes contraintes de charriage et de la rusticité recherchée de l'ouvrage, le bassin de dissipation est prévu à fond plat, et sera également constitué d'enrochements liaisonnés au béton.

La crue de projet est la crue centennale, estimée à 360 m³/s. Les caractéristiques géométriques et altimétriques du seuil et du bassin sont récapitulées dans le tableau suivant :

Crête	Coursier	Bassin de dissipation
Cote : 575.65	Pente : 10 %	Cote de calage : 558.25 – fond plat
Largeur : 15 m	Largeur : 15 m	Largeur : 15 m
Longueur : 5 m	Longueur : 175 m	Longueur : 35 m
Avec bêche d'ancrage amont	Cote de pied de coursier : 558.25	Cote d'arase des bajoyers : 566.50
	Fruit des bajoyers : 1 H / 5 V	Fruit des bajoyers : 1 H / 5 V

Tableau 1 : Caractéristiques principales des ouvrages projetés

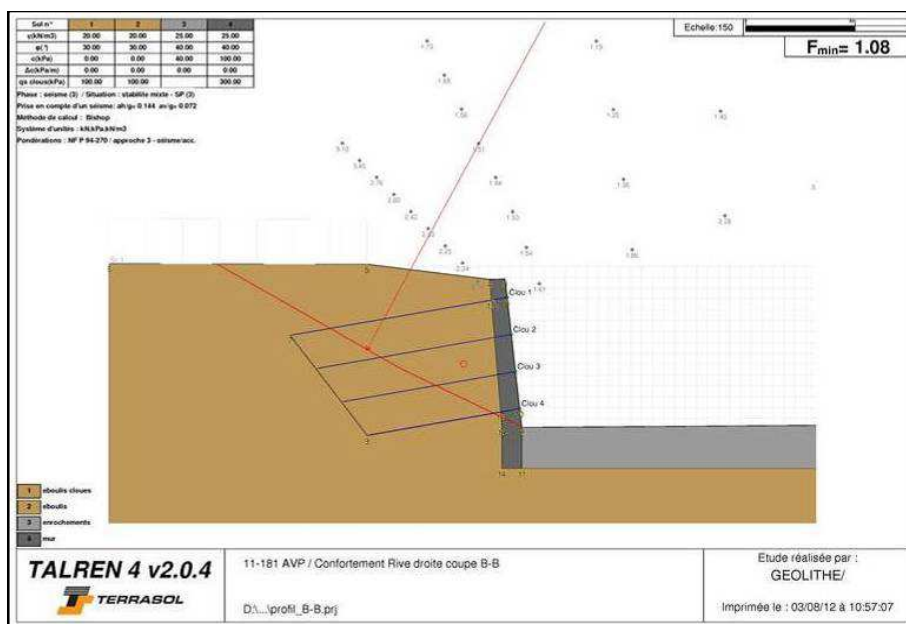
3.3 Confortement du bajoyer en rive droite par clouage

Les parois clouées sont dimensionnées pour reprendre le glissement dans leur aire d'influence : 3 H en amont et en aval du bajoyer, H étant la hauteur de terre soutenue. Trois modes de rupture ont été considérés : la rupture générale concernant le terrain en arrière des renforcements, la rupture mixte touchant au moins un des renforcements et la rupture interne touchant tous les renforcements.

Le clouage du bajoyer existant en rive droite est nécessaire sur toute sa longueur. A titre d'exemple, les caractéristiques des ancrages prévus au droit de la crête du seuil sont présentés dans le tableau et le graphique ci-dessous :

Ligne	Diamètre foration (mm)	Inclinaison (°)	Longueur (m)	Espacement vertical (m)	Espacement horizontal (m)	Type d'armature
1 à 4	90	10	7 à 10	1.7	1.5	Gewi 25

Tableau 2 : Caractéristiques principales des ouvrages projetés



Graphique 4 : Ancrages prévus dans le bajoyer rive droite au droit de la crête du seuil

4. ETUDE SUR MODELE REDUIT DE LA SOLUTION DE REMPLACEMENT DES SEUILS

4.1 Présentation du modèle physique

Le choix de l'utilisation d'un modèle physique a été motivé par la nécessité de vérifier les conditions d'écoulement sur le nouvel ouvrage, notamment vis-à-vis des conditions de dissipation d'énergie.

Le modèle des seuils de l'Arly a été construit à une échelle géométrique de 1/50^e, ce qui permet une bonne représentation des phénomènes étudiés, dans le respect de la similitude de Froude (écoulements à surface libre).

Le modèle physique représente un tronçon de 510 m de rivière, qui se décompose de la manière suivante :

- un tronçon de 150 m de long en amont du seuil ;
- le seuil en enrochements liaisonnés (prévu en remplacement des deux seuils actuellement en place), composé du coursier d'une longueur de 175 m et du bassin de dissipation d'une longueur de 35 m ;
- un tronçon de 150 m en aval de la fosse de dissipation, en matériaux affouillables.

4.2 Résultats des essais

4.2.1 Conditions d'écoulement en amont de la crête de seuil

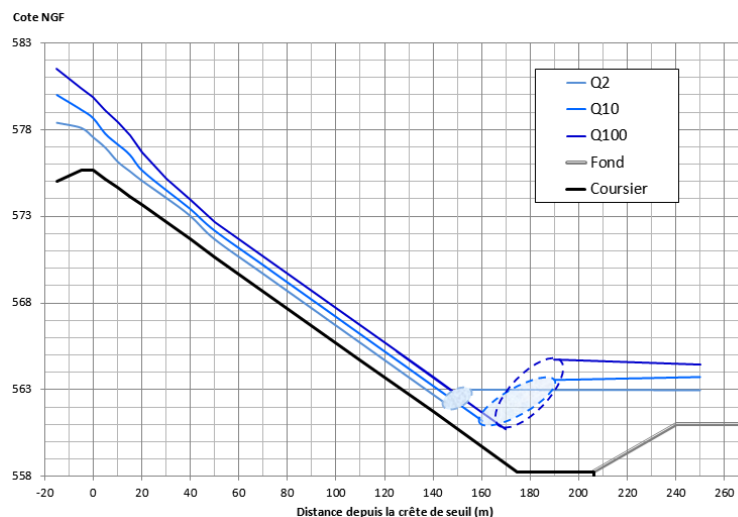
La crête du seuil est positionnée en sortie d'un coude (extrados rive droite - intrados végétalisé et aménagé pour permettre un accès sur les ouvrages), ce qui engendre des conditions d'alimentation du seuil non homogène. On observe une zone de faible vitesse (voire de recirculation) en rive gauche en amont de la crête. L'alimentation du seuil est ainsi déséquilibrée du fait de l'orientation privilégiée des écoulements en rive droite.

4.2.2 Conditions d'écoulement sur le coursier

La dissymétrie d'alimentation du seuil engendre une certaine irrégularité de l'écoulement sur les premières dizaines de mètre (de 20 à 30 m environ) du coursier. La rugosité de la rampe permet toutefois de corriger le déséquilibre d'alimentation du seuil, en répartissant de manière homogène l'écoulement sur toute la largeur du coursier, ce qui garantit une dissipation d'énergie régulière.

Des mesures de ligne d'eau ont été réalisées pour les différentes conditions de débit testées, afin de caler en conséquence les cotes d'arase des bajoyers et le positionnement du nouveau pont. Une loi hauteur-débit sur la crête de seuil a également été établie dans un objectif opérationnel de suivi courant de l'ouvrage (pose d'une échelle pour une lecture instantanée du débit).

Le coefficient de rugosité de Strickler correspondant aux lignes d'eau mesurées sur le modèle est d'environ $K = 25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, ce qui correspond à une rugosité d'environ 0.5 m.



Graphique 5 : Lignes d'eau mesurées sur l'ouvrage

4.2.3 Conditions de dissipation d'énergie en pied de coursier

Dans la première configuration testée, les bajoyers du bassin de dissipation ont un fruit de 1H/1V, la transition avec les bajoyers du coursier, plus raides, est effectuée par un élargissement progressif.

Dans cette configuration, les essais ont permis de constater que :

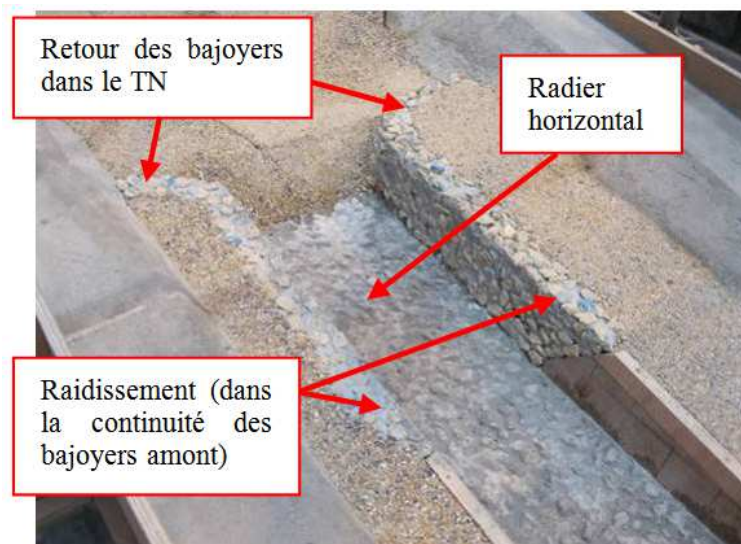
- le ressaut est positionné en pied de coursier pour les crues fortes, et un peu plus en amont sur le coursier pour les crues faibles;
- le ressaut n'est pas établi de manière franche, et présente des oscillations en surface, qui peuvent se prolonger jusqu'en sortie de bassin pour les crues les plus fortes. La dissipation d'énergie est moins efficace que pour un ressaut établi, mais elle reste toutefois importante ;
- le ressaut présente un caractère asymétrique aléatoire dirigé vers le côté gauche ou droit du bassin de dissipation. Les vitesses sont alors plus importantes le long du bajoyer vers lequel est orienté le jet, et on observe dans le même temps un courant de retour sur le côté opposé ;
- une fosse d'affouillement se forme dans le prolongement du bassin de dissipation, dans l'axe du bassin et sur toute sa largeur. Il arrive toutefois que la fosse ne soit pas parfaitement symétrique, dans les cas où le ressaut est resté orienté un long moment d'un côté donné ;
- les matériaux sont mis en mouvement dès la crue décennale, et transportés vers l'aval. Les matériaux déplacés forment un cordon (ou dune) qui se déplace progressivement vers l'aval, jusqu'à ce qu'une pente d'équilibre s'établisse. Le transport de matériaux se réduit alors, mais se produit de manière régulière ;

- à la transition entre le bassin et le fond naturel, on mesure un enfoncement maximal d'environ 1 m sous le niveau du bassin pour la crue centennale. Les points les plus bas sont mesurés quelques mètres plus en aval, où les enfoncements maximaux mesurés atteignent environ 1.5 m.



Graphique 6 : Ressaut asymétrique dans le bassin de dissipation – crue décennale

Afin d'améliorer les conditions de formation du ressaut, une seconde configuration du bassin de dissipation a été testée. Les bajoyers du bassin de dissipation ont été raidis (fruit 1H/5V) pour être dans le prolongement des bajoyers du coursier. Il n'y a ainsi plus d'élargissement en pied de coursier. Les autres caractéristiques du bassin restent inchangées (radier horizontal à la cote 558.25, longueur de bassin de 35 m, prolongation en arc de cercle dans le terrain naturel en protection contre les courants de retour).



Graphique 7 : Configuration n°2 du bassin de dissipation

Globalement, les conditions d'écoulement dans le bassin de dissipation sont peu modifiées. Malgré la suppression de l'élargissement en entrée de bassin, le ressaut n'est pas systématiquement orienté dans l'axe. Le raidissement des talus permet tout de même de mieux maîtriser le jet principal. La zone de recirculation est ainsi moins importante, et le jet principal a plus facilement tendance à se recentrer sur l'axe du bassin. Les conditions de formation de la fosse d'affouillement en aval du bassin sont peu modifiées (fosse moins large, pas d'approfondissement constaté).



Graphique 8 : Ressaut symétrique – crue centennale

4.2.4 *Charriage de gros blocs*

Les essais réalisés pour étudier le passage de gros blocs sur la structure et leur comportement dans le bassin de dissipation ont permis de constater que :

- les blocs ne franchissent la crête du seuil que pour les débits les plus forts ;
- une fois que les blocs ont passé la crête du seuil, ils sont immédiatement charriés sur le coursier, jusque dans le bassin de dissipation. La trajectoire des blocs sur le coursier est aléatoire, elle se fait au gré des chocs sur le coursier et de l'orientation locale de l'écoulement ;
- dans le bassin de dissipation, les blocs se déposent une fois qu'ils ont franchi le ressaut, et ensuite ne sont plus mis en mouvement. Pour les crues les plus fortes, les blocs peuvent être transportés au-delà du bassin de dissipation et se déposent alors sur le lit naturel.

4.2.5 *Engrèvement du bassin de dissipation*

Des essais ont été réalisés en considérant le bassin de dissipation fortement engravé, avant le passage de la crue (matériaux de même granulométrie que ceux du lit en aval, placés en fond du bassin sur une épaisseur de 3 m nature). Les essais montrent qu'en cas d'engrèvement important du bassin de dissipation, le fonctionnement de l'ouvrage n'est pas fondamentalement perturbé : le ressaut chasse (en partie ou en totalité selon le débit de crue) les matériaux du bassin, jusqu'à ce qu'un équilibre s'établisse, et la dissipation d'énergie est alors similaire aux cas où le bassin n'est pas engravé. Par ailleurs, la fosse d'affouillement qui se développe en aval du bassin est comparable aux premiers essais.

5. CONCLUSIONS

Les contraintes et les enjeux du site (faible largeur de cours d'eau, transport solide important, mouvements de versants, passage d'un axe routier important à proximité) imposent la construction d'un ouvrage rustique et robuste, en remplacement des seuils existants de l'Arly.

Une fois la solution technique définie, le modèle physique s'est avéré un outil précieux pour confirmer le dimensionnement et préciser certains points de fonctionnement non prévisibles, notamment l'orientation du ressaut, le passage de blocs charriés, et l'évolution du comportement hydraulique en cas d'engrèvement du bassin de dissipation.

L'étude et le modèle physique ont abouti à une solution technique classique mais satisfaisante, répondant à l'ensemble des contraintes.