



Agence de l'Eau
Adour Garonne



GUIDE TECHNIQUE

pour la CONCEPTION des PASSES «NATURELLES»

Rapport GHAAPPE RA.06.05-V1

Décembre 2006

M. LARINIER, D. COURRET, P. GOMES



Groupe d'Hydraulique Appliquée aux Aménagements Piscicoles
et à la Protection de l'Environnement

CSP - CEMAGREF - GHAAPPE Institut de Mécanique des Fluides

Avenue du professeur Camille Soula, 31400 Toulouse ; Tél. : 05 61 28 58 69 ; Télécopie : 05 61 28 58 97

GUIDE TECHNIQUE

pour la CONCEPTION des PASSES «NATURELLES»

M. LARINIER, D. COURRET, P. GOMES

Rapport GHAAPPE RA.06.05

RESUME :

Ce guide est la synthèse du retour d'expérience d'un certain nombre de réalisations en France et à l'étranger et de plusieurs études en laboratoire portant sur les écoulements à fortes pentes au-dessus de macro-rugosités en vue de la mise au point de passes « naturelles ». On présente tout d'abord le concept de passe « naturelle » et on en propose une typologie, en fonction de la manière dont sont réduites les vitesses et de leur implantation au niveau des obstacles. Après un bref rappel sur l'état des connaissances sur les capacités de nages des poissons, on présente les caractéristiques géométriques et hydrauliques des différents types de passes « naturelles » (dimensions caractéristiques, concentration et arrangement des blocs, pente, tirant d'eau moyens, débits unitaires, vitesses maximales et débitantes), ainsi que leurs critères de dimensionnement en fonction des espèces-cibles : salmonidés grands migrateurs, lamproie, alose, truite, ombre et cyprinidés d'eau vive, petites espèces... Les dispositifs comportant des gros blocs régulièrement répartis peuvent être installés avec des pentes variant de 3-4% à 7% suivant les espèces considérées. Les dispositifs comportant des rangées de blocs créant des pseudo-bassins peuvent accepter des pentes de 1 à 2% supérieures. Les rampes à blocs jointifs sont beaucoup plus sélectives et ne conviennent qu'aux espèces ayant des capacités de nage importantes et aux chutes très limitées. Les différents modes d'implantation des passes « naturelles » au niveau des ouvrages (rampes couvrant la totalité ou une partie des ouvrages, rivières de contournement) sont ensuite commentés et des exemples de réalisations en France et à l'étranger sont présentés. On aborde succinctement dans une dernière partie les dispositions constructives. L'annexe hydraulique présente les éléments permettant le dimensionnement des passes « naturelles ».

MOTS CLES : *passes à poissons, passes naturelles, rampe, poissons, migration.*

TABLE DES MATIERES

1	Introduction.....	5
2	Définition et typologie des passes «naturelles».....	6
3	Passes à poissons et capacités de nage.....	8
3.1	Capacités de nage.....	8
3.2	Les vitesses dans les dispositifs de franchissement.....	9
3.3	L'influence de la turbulence.....	9
4	Les différents modes d'organisation des enrochements.....	11
4.1	Enrochements régulièrement répartis.....	11
4.1.1	Aspects hydrauliques.....	11
4.1.2	Dimensionnement piscicole.....	13
4.2	Enrochements en rangées périodiques.....	16
4.2.1	Aspects hydrauliques.....	17
4.2.2	Dimensionnement piscicole.....	18
4.3	Les rampes en enrochements jointifs.....	20
4.3.1	Aspects hydrauliques.....	21
4.3.2	Dimensionnement piscicole.....	22
4.4	Démarche générale de dimensionnement des passes «naturelles».....	24
4.5	Conclusion.....	25
5	L'implantation des passes naturelles sur les obstacles.....	26
5.1	Les rampes installées sur toute la largeur de l'obstacle.....	26
5.2	Les rampes installées sur une partie d'un obstacle.....	30
5.3	Les rivières de contournement.....	37
5.4	Entretien des ouvrages.....	43
6	Dispositions constructives.....	44
6.1	Qualité des enrochements.....	44
6.2	Les rampes en enrochements jointifs.....	44
6.3	Les ouvrages à blocs isolés.....	45
6.4	Dispositions particulières de chantier.....	47
6.5	Coût des passes «naturelles».....	47
7	Bibliographie.....	48
	Annexe hydraulique.....	49

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Les trois principaux modes de disposition des blocs	6
Figure 2 : Schémas d'une rivière de contournement et de rampes installées sur tout ou partie de la largeur d'un obstacle.	7
Figure 3 : Schéma d'une disposition régulière des enrochements et notations.....	11
Figure 4 : Ecoulements fluvial à 3% et « en cascade » à 9%	12
Figure 5 : Exemples de profils de vitesses au sein de blocs régulièrement répartis en fonction du débit, pour une pente de 5% et une concentration de 0.13.	13
Figure 6 : Schéma d'une disposition d'enrochements en rangées périodiques avec seuils.....	17
Figure 7 : Ecoulement au travers d'enrochements en rangées périodiques.....	18
Figure 8 : Coupe transversale schématique d'une rampe en enrochements jointifs.	21
Figure 9 : Ecoulement sur une rampe en enrochements jointifs de pente 10% (modèle échelle 1/22) ..	21
Figure 10 : Exemple de profils de vitesse sur une rampe en enrochements jointifs (D_{65} de 0.85 m) à une pente de 10%.	22
Figure 11 : Ancien seuils de stabilisation sur les Usses	26
Figure 12 : Seuil en enrochements jointifs de Lescar, a) vue générale, b) vue de la partie basse, c) vue de la partie haute.....	27
Figure 13 : Seuil en enrochements jointifs sur l'Ille.....	28
Figure 14 : Rampe en rangées de blocs sur l'Ahr.....	29
Figure 15 : Seuil de Dampierre sur la Loire équipé sur chaque rive de prébarrages constitués de rampes en enrochements jointifs	30
Figure 16 : Rampe en enrochements de Carennac (Dordogne).....	31
Figure 17 : Rampe en enrochements régulièrement répartis au seuil de Dattenfeld sur la Sieg	32
Figure 18 : Rampe en enrochements au seuil de Buisdorf sur la Sieg.....	33
Figure 19 : Rampe en enrochements jointifs au seuil de Toulouzette	34
Figure 20 : Rampe en enrochements périodiques à Kolbsheim	35
Figure 21 : Pré barrage en enrochements jointifs au seuil de Belleville (Loire).....	36
Figure 22 : Rivière de contournement au seuil de Beauregard sur la Garonne.....	37
Figure 23 : Rivière de contournement du Bras des Arméniers	38
Figure 24 : Rivière de contournement de Biron : sortie, entrée, vue de l'amont, vue à sec.	39
Figure 25 : Rivière de contournement de Chatillon sur Lison (Loue) : vue générale, vue vers l'amont, vue vers l'aval	40
Figure 26 : Rivière de contournement du Lac des Gaves (Gave de Pau) : vue générale, vue de la rivière, vue du clapet amont et de la passe à bassins, vue de l'entrée au niveau de la centrale aval.....	41
Figure 27 : Rivière de contournement sur l'Aare (Allemagne)	42
Figure 28 : Exemple d'embâcles au sein de dispositifs.	43
Figure 29 : Organisation des couches de matériaux pour une rampe en enrochements jointifs.....	45
Figure 30 : Organisation des couches de matériaux dans les ouvrages à blocs isolés.	46
Figure 31 : Mise en place de pieux métalliques pour stabiliser les blocs.	46
Figure 32 : Disposition de cordons de raccordement entre les gros blocs régulièrement répartis.	47

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Correspondance entre espacements relatifs et concentration des blocs.	12
Tableau 2 : Critères hydrauliques à respecter selon les groupes d'espèces pour les enrochements régulièrement répartis.	14
Tableau 3 : Franchissabilité des enrochements régulièrement répartis pour les différents groupes d'espèce pour une concentration de 13% (en gras la valeur du paramètre limitant).....	16
Tableau 4 : Critères hydrauliques à respecter selon les groupes d'espèces pour les enrochements en rangées périodiques avec seuil.....	19
Tableau 5 : Franchissabilité des enrochements en rangées périodiques avec des seuils d'une hauteur de 0.4 m pour les différents groupes d'espèces. (en gras la valeur du paramètre limitant).....	20
Tableau 6 : Critères hydrauliques à respecter selon les groupes d'espèces pour les enrochements jointifs.	22

Crédit photographique :

Figures 1, 2, 9, 11, 12, 15, 16, 17, 18, 19, 22, 24, 25, 26, 28 : M. Larinier. Figures 7, 13, 14, 27, 31 : R. Gebler. Figure 21 : P. Steinbach. Figure 28 : U. Dumond M. Larinier. Figure 20 : A. Stein, B. Barthélémy. Figure 23 : G. Collillieux, M. Larinier. Figure 4 : P. Gomes.

AVANT PROPOS

Ce guide a été réalisé dans le cadre du programme R&D de l'Equipe de Recherche Technologique «Restauration de la continuité écologique des cours d'Eau» associant l'INP Toulouse, l'Université de Poitiers (laboratoire du LEA), le Cemagref, EDF R&D et le Conseil Supérieur de la Pêche. Il est la synthèse de plusieurs études portant sur les écoulements à fortes pentes au-dessus de macrorugosités en vue de la mise au point de passes à poissons multi-espèces et du retour d'expérience de plusieurs aménagements en France et à l'étranger.

Cette étude a fait l'objet d'un co-financement de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne, de la Compagnie Nationale du Rhône, de l'INP Toulouse, et du Conseil Supérieur de la Pêche. Ce guide constitue le rapport définitif destiné à L'Agence de l'Eau Adour Garonne et à la Compagnie Nationale du Rhône.

Les essais sur modèle réduit physique sur lesquels sont basés certains des critères de dimensionnement des ouvrages ont été réalisés à l'IMFT par Zéphyre Thinus et Dominique Courret dans le cadre de stages de l'ENGEES, Peggy Gomes, biologiste et Stéphane Vighetti, technicien de l'environnement au CSP. L'exploitation des résultats a été effectuée par Dominique Courret, Peggy Gomes et Michel Larinier.

De nombreux échanges ont eu lieu lors de cette étude avec nos collègues allemands travaillant sur la même thématique, plus particulièrement Rolf-Jürgen Gebler, coordonnateur du groupe technique « rampes naturelles » de la DWA (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall) ainsi que Beate Adam, Ulrich Schwevers, Marq Redeker et Ulrich Dumont du groupe technique « continuité écologique pour les organismes aquatiques » de cette même association.

L'étude a été réalisée sous la responsabilité scientifique de Michel Larinier (responsable du GHAAPPE, directeur de l'ERT).

Ce guide est appelé à évoluer, notamment pour intégrer progressivement le retour d'expérience.

1 INTRODUCTION

Depuis une vingtaine d'années, les cours d'eau français font l'objet de plans de restauration des populations de certaines espèces de poissons. L'une des actions consiste à rétablir la libre circulation des grands migrateurs (saumon, truite de mer, alose, lamproie...) ainsi que d'espèces dites « d'intérêt halieutique fort » (truite, ombre commun...), conformément notamment à la loi pêche de 1984. Mises à part les passes très spécifiques destinées aux anguilles, les ouvrages de franchissement ont été le plus souvent dimensionnés pour des espèces ayant de bonnes capacités de nage.

La problématique de la libre circulation piscicole, ou plus généralement de la « continuité écologique » des cours d'eau a été récemment élargie, suite à la parution de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau. L'un des objectifs pour les états membres est de rendre opérationnels des programmes de mesures destinés à atteindre, dans la mesure du possible et dans un délai de quinze ans, un objectif général de bon état écologique des eaux superficielles (ou de bon potentiel écologique dans le cas de masses d'eau fortement modifiées et artificielles). Parmi les paramètres de la qualité hydromorphologique, la continuité écologique apparaît comme l'un des évaluateurs fondamentaux des masses d'eau de surface. Ce terme englobe plus particulièrement la possibilité d'assurer, dans des limites économiques acceptables, non seulement la migration des espèces diadromes, mais également celle de l'ensemble de la faune piscicole. Un milieu en bon état écologique, vis-à-vis du paramètre continuité, doit permettre une migration non perturbée des organismes aquatiques, tant sur le plan longitudinal que transversal (accès aux affluents et aux zones humides).

Le seul moyen de restaurer effectivement la continuité écologique pour l'ensemble des invertébrés aquatiques et des poissons à tous les stades est de supprimer l'obstacle. Certains dispositifs permettent toutefois de rétablir partiellement cette continuité pour la majorité des espèces de poissons, au moins au stade adulte et pour les juvéniles à partir d'une certaine taille. Les passes « naturelles » (par opposition aux passes plus « techniques » comme les passes à bassins et les passes à ralentisseurs), dans la mesure où elles sont susceptibles d'offrir une plus grande hétérogénéité de conditions d'écoulements, peuvent dans certaines conditions convenir à la plupart des espèces de poisson effectuant des déplacements au sein des masses d'eau.

Cet aspect naturel n'est cependant pas une garantie d'efficacité et il convient de ne pas confondre aspect esthétique de l'écoulement et efficacité biologique. Comme pour les passes plus classiques, les conditions hydrauliques dans ce type d'ouvrage, en termes de vitesses, de hauteurs d'eau, de niveau de turbulence, doivent être adaptées aux espèces-cibles et aux cours d'eau qui les accueillent. La grande difficulté avec ce type de dispositif est la caractérisation hydraulique des écoulements de par leur hétérogénéité, conséquence d'une géométrie beaucoup plus complexe que les passes dites techniques comme les passes à bassins successifs.

Si les passes naturelles commencent à être très répandues à travers le monde, en particulier en Allemagne (Gebler, 1991; 1998 ; DVWK, 2002 ; LUBW, 2006), en Autriche (Parasiewicz et al., 1998) et en Suisse, il n'existe pas de critères de dimensionnement très formalisés comme il en existe par exemple pour les passes à bassins successifs ou les passes à ralentisseurs. La conception de tels ouvrages demeure encore très empirique et subjective ; le retour d'expérience est encore très limité, en particulier à cause de la difficulté à contrôler leur efficacité.

On présente tout d'abord le concept de passe « naturelle » et on en propose une typologie. Après un bref rappel sur l'état des connaissances sur les capacités de nages des poissons, on présente les caractéristiques hydrauliques des différents types de passes « naturelles » ainsi que leurs critères de dimensionnement. Leurs différents modes d'implantation au niveau des ouvrages sont ensuite présentés et accompagnés d'exemples. On aborde enfin le problème des dispositions constructives. L'annexe hydraulique est destinée à fournir tous les éléments permettant le dimensionnement de tels ouvrages.

2 DEFINITION ET TYPOLOGIE DES PASSES «NATURELLES»

Les passes «naturelles» ou rustiques consistent à relier biefs amont et aval par un chenal plus ou moins large (qui peut faire de quelques mètres à toute la largeur du cours d'eau) dans lequel l'énergie est dissipée et les vitesses sont réduites par la rugosité du fond et des parois, et/ou par une succession de singularités plus ou moins régulièrement réparties.

Cette dénomination regroupe des dispositifs dont la conception est très variable. Il suffit pour s'en convaincre de lister la diversité des appellations consacrées à de tels dispositifs en langue anglo-saxonne (Wildmann et al, 2000) : *natural fishways*, *nature-mimicking fishways*, *naturalized-fishways*, *stone fishways*, *bypass channels*, *step-pools fishways*, *riffle-pools fishways*, *stream-like fishways*, *rock ramp fishways*, *rocky ramp*, *roughened ramps*, *riprap fishways*...

En fait, cette appellation recouvre des dispositifs reproduisant de plus ou moins près les caractéristiques des cours d'eau naturels à fortes pentes et faisant appel pour la dissipation d'énergie et la réduction des vitesses à des matériaux «naturels» (plus particulièrement blocs en enrochements), contrairement aux passes dites «techniques» construites pour la plupart en en béton armé.

On peut proposer une double classification, selon la manière dont est dissipée l'énergie et selon l'implantation du dispositif sur l'ouvrage.

Une première classification peut se faire suivant la manière dont est dissipée l'énergie, c'est-à-dire suivant le mode d'organisation des rugosités ou des singularités (figure 1). L'énergie peut être dissipée (1) par la mise en place d'**enrochements régulièrement répartis** sur un lit plus ou moins rugueux, (2) dans des pseudo-bassins formés par des **enrochements disposés en rangées périodiques** ou par une série de seuils ou d'épis disposés à intervalles réguliers, (3) par des **enrochements jointifs**, disposés les uns contre les autres de manière compacte et formant un tapis « rugueux ».

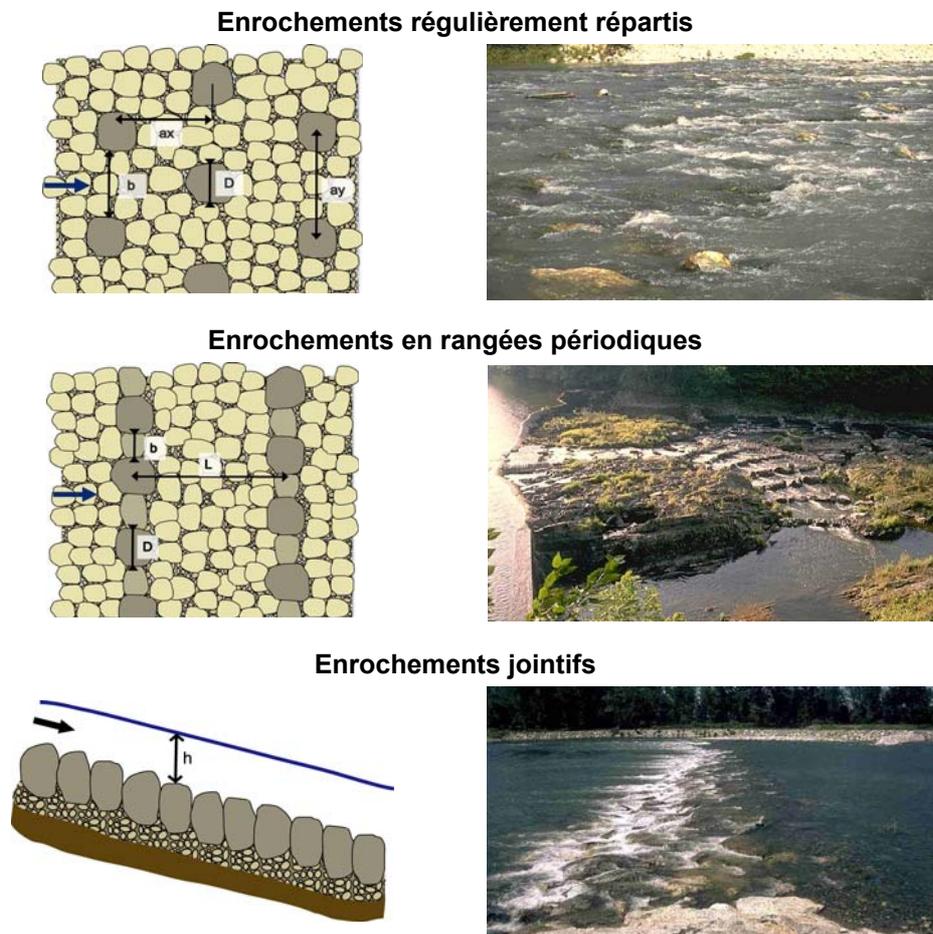


Figure 1 : Les trois principaux modes de disposition des blocs

Une autre classification peut être effectuée, non plus suivant l'organisation des blocs et des structures dissipant l'énergie, mais suivant l'implantation du dispositif au niveau de l'ouvrage : on distinguera les rampes installées sur toute la largeur de l'obstacle, celles installées sur une partie seulement et enfin les rivières de contournement de largeur limitée installées en rive (figure 2). Cette classification ne préjuge pas de la manière dont est dissipée l'énergie et sont réduites les vitesses dans le dispositif.

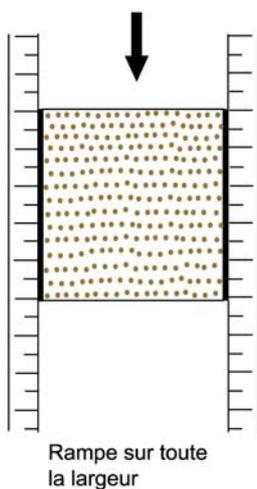
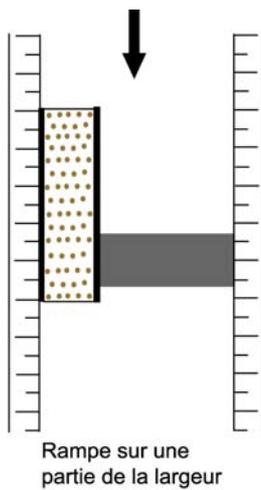
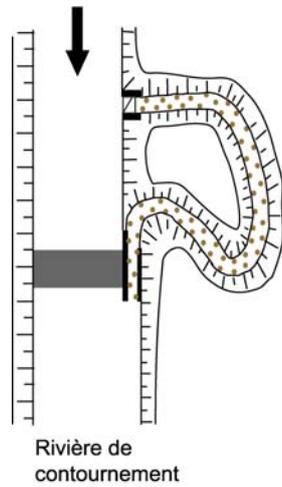


Figure 2 : Schémas d'une rivière de contournement et de rampes installées sur tout ou partie de la largeur d'un obstacle.

3 PASSES A POISSONS ET CAPACITES DE NAGE

3.1 Capacités de nage

Les critères de dimensionnement d'un dispositif de franchissement sont étroitement liés au comportement migratoire et aux capacités de nage des espèces migratrices considérées. La capacité de nage des migrateurs peut s'exprimer en terme de vitesse de nage et d'endurance, temps pendant lequel le poisson peut soutenir cette vitesse de nage. Plusieurs niveaux d'activité de nage sont distingués chez les poissons :

- l'activité de sprint ou de pointe, résultant d'un effort intense et ne pouvant être maintenue au-delà d'un certain temps, de quelques secondes à quelques dizaines de secondes suivant l'espèce et la taille de l'individu,
- l'activité soutenue, activité de nage pouvant être maintenue pendant plusieurs minutes, mais entraînant à terme la fatigue du poisson,
- l'activité de croisière, susceptible d'être maintenue pendant des heures sans engendrer des modifications physiologiques profondes de l'organisme du poisson.

Les capacités de nage sont fonction de nombreux facteurs, en particulier de l'espèce considérée, de la taille de l'individu, de son état physiologique ainsi que de la température de l'eau (Beach, 1984 ; Larinier et al, 1994, 2002).

a. Vitesses maximales

Les vitesses maximales de nage sont de 6 m/s à plus de 8 m/s pour le saumon, de 3 m/s à 4 m/s pour la truite, de 4 m/s à 5 m/s pour l'aloise, dans des conditions thermiques favorables. Ces vitesses maximales de nage peuvent varier significativement suivant la température de l'eau. Pour des poissons de tailles inférieures à 50 cm, Videler (1993) propose une équation basée sur la compilation de résultats expérimentaux donnant la vitesse maximale de nage U_{max} (en m/s) en fonction de la longueur L (en m) :

$$U_{max} = 0.4 + 7.4 \times L$$

Pour des individus de longueur voisine de 10 et 15 cm, les vitesses maximales de nage seraient respectivement de l'ordre de 1.15 et 1.5 m/s. Ces valeurs sont relativement proches de celles obtenues expérimentalement par Clough et Turnpenney (2001) sur des individus de plusieurs espèces de cyprinidés (vandoises, gardon, chevesne) de 15 cm de longueur moyenne (vitesses maximales de l'ordre de 1.35 m/s). Les espèces de petites tailles ont des vitesses de pointe limitées et elles ne peuvent soutenir ces vitesses qu'un très bref instant (quelques secondes à une vingtaine de secondes).

b. Vitesse de croisière

La limite supérieure de la vitesse de croisière U_{cr} (en m/s) augmente rapidement avec la taille du poisson. Videler (1993) propose la relation suivante :

$$U_{cr} = 0.15 + 2.4 \times L$$

Cette limite correspond un peu arbitrairement à la vitesse que peuvent soutenir les poissons pendant 200 min.

Les limites supérieures des vitesses de croisière seraient de l'ordre de 1.7 à 2.5 m/s pour le saumon et de 0.6 à 1.3 m/s pour la truite en fonction de leur taille. Pour des individus de longueur voisine de 10 et 15 cm, les limites supérieures de la vitesse de croisière seraient respectivement de l'ordre de 0.40 et 0.50 m/s.

3.2 Les vitesses dans les dispositifs de franchissement

D'un point de vue pratique, il est difficile de limiter les vitesses maximales dans les passes à poissons à des niveaux bien inférieurs à 1.20-1.50 m/s. Ceci implique que les petites espèces devront soit éviter les zones à vitesses maximales, soit faire appel à leur vitesse de pointe qu'elles ne peuvent soutenir que quelques secondes, ou à des vitesses soutenues proches de leur vitesse de pointe. Elles devront trouver des zones calmes et assez proches les unes des autres pour qu'elles puissent se reposer, alors que les espèces de grandes tailles pourront franchir plusieurs dizaines de mètres sans difficulté dans le même écoulement.

L'utilisation de la vitesse moyenne d'un écoulement (par exemple la vitesse débitante, rapport du débit à la section de l'écoulement) comme seul critère de « franchissabilité » pour un obstacle ou de dimensionnement pour un dispositif de franchissement est peu pertinente. En effet l'observation a permis de montrer que (Larinier et al, 1994, 2002) :

- d'une part les champs de vitesses dans les écoulements sont souvent très hétérogènes : les poissons sont capables de percevoir de très faibles variations de vitesses de l'écoulement et peuvent utiliser les zones les plus favorables à leur progression (voisinage des parois, zones de décollement derrière un obstacle...),
- d'autre part, lorsque dans un écoulement les variations spatio-temporelles de vitesses deviennent importantes (écoulements très turbulents ou tourbillonnaires par exemple), l'énergie nécessaire au poisson pour franchir une certaine distance peut devenir beaucoup plus importante que celle requise pour parcourir la même distance dans un écoulement plus régulier à filets parallèles ayant même vitesse moyenne, et cela d'autant plus que les vitesses maximales de l'écoulement se rapprochent de la vitesse de pointe du poisson,
- enfin pour les passes naturelles, la vitesse moyenne que l'on pourrait estimer à partir d'un coefficient de rugosité de type Manning ou Strickler, ou un coefficient de perte de charge, n'a généralement pas de grande signification physique.

3.3 L'influence de la turbulence

Jusqu'à une période très récente, il n'existait aucune méthode de mesure permettant de quantifier la turbulence. Un bon indicateur du niveau d'agitation et d'aération dans une passe à bassins, mais très empirique, est la puissance volumique dissipée (Larinier et al, 1994, 2002)). L'utilisation de ce critère pour le dimensionnement des passes à bassins est devenue classique, en Amérique du Nord comme en Europe. On considère par exemple que dans une passe à bassins dimensionnée pour une puissance dissipée volumique de 200 watts/m³, la turbulence et l'agitation sont suffisamment faibles pour permettre au poisson de trouver des zones de repos dans chaque bassin.

Cette puissance volumique dissipée est identique à la puissance spécifique («unit stream power») $pgVS$ (produit de la vitesse par pente de la ligne d'énergie) utilisée en dynamique fluviale et qui est un bon indicateur de la mise en mouvement des matériaux dans le lit d'un cours d'eau et de la capacité de transport solide (Yang, 1984,1996). Les valeurs de la puissance spécifique peuvent varier de quelques watts/m³ dans la partie basse des cours d'eau à des valeurs de l'ordre de 500 watts/m³ localement dans la partie supérieure des cours d'eau à truite.

Les valeurs de puissance dissipée admises dans les dispositifs de franchissement dimensionnées pour une espèce donnée sont généralement supérieures à celles des valeurs moyennes rencontrées dans son habitat : le dispositif de franchissement ne peut généralement pas être considéré comme un habitat particulier du poisson, mais uniquement comme une zone de passage, possédant le plus souvent, pour des raisons économiques évidentes, des pentes significativement plus élevées que les pentes du cours d'eau rencontrées dans le secteur considéré.

Il est important de noter que la puissance dissipée n'est qu'un indicateur du niveau de la turbulence et de l'agitation dans un écoulement. C'est en fait l'énergie cinétique turbulente (ECT) qui semble être le paramètre le plus adapté pour quantifier l'agitation et l'importance des

fluctuations de vitesses que subit un organisme aquatique, car il intègre les trois composantes des fluctuations de la vitesse instantanée.

Certaines expérimentations récentes ont essayé de relier puissance dissipée volumique et énergie cinétique moyenne dans des passes à poissons (Puertas et al, 2004 ; Gomes et al, 2005 ; Tarrade et al, 2006). Les quelques résultats semblent indiquer qu'il existe une relation entre ces deux paramètres mais que cette relation n'est pas univoque et dépend du type d'écoulement. Aucune étude expérimentale n'a encore permis de déterminer de façon très claire les valeurs-seuils ou critiques de ce paramètre pour qu'une zone d'écoulement puisse être considéré comme une zone de repos pour le poisson.

Ainsi, dans l'état actuel des connaissances, la puissance dissipée volumique constitue toujours le seul paramètre quantifiant les conditions d'agitation dans un dispositif de franchissement. Les limites de son utilisation viennent du fait qu'il s'agit d'un paramètre global issu du calcul ne pouvant rendre compte de l'hétérogénéité des écoulements et que ses valeurs-seuils pour le poisson dépendent du type d'écoulement. En particulier les valeurs maximales admises pour les passes à bassins ne sont pas systématiquement extrapolables aux passes «naturelles».

4 LES DIFFERENTS MODES D'ORGANISATION DES ENROCHEMENTS

4.1 Enrochements régulièrement répartis

Dans cette configuration, l'énergie est dissipée par des singularités constituées de blocs isolés plus ou moins régulièrement répartis sur un coursier rugueux (figure 3). Les espacements longitudinaux et transversaux entre les blocs sont voisins, l'espacement longitudinal étant généralement légèrement supérieur au transversal. Le raisonnement sous-jacent à la disposition régulière des blocs est l'obtention d'un écoulement pseudo-uniforme dans tout le dispositif sans apparition de singularités hydrauliques marquées (chute locale, ressaut hydraulique trop prononcé, hauteur d'eau insuffisante) susceptibles de constituer des points de blocage à la remontée du poisson. La ligne d'eau est globalement parallèle au coursier. Chaque bloc génère un sillage qui doit pouvoir constituer une zone de repos pour le poisson.

L'existence d'une rugosité de fond importante (petits blocs) permet de diminuer les vitesses d'écoulement à proximité du fond et offre des zones de repos et des repères aux petites espèces rhéophiles, facilitant leur franchissement.

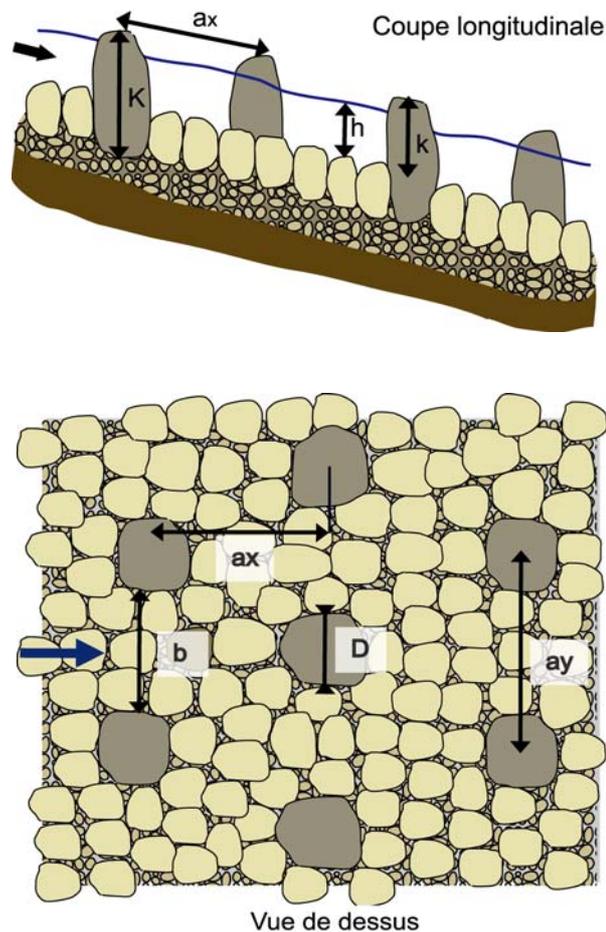


Figure 3 : Schéma d'une disposition régulière des enrochements et notations

4.1.1 Aspects hydrauliques

Les paramètres qui déterminent les caractéristiques de l'écoulement sont la pente I de la rampe, les dimensions caractéristiques des blocs : hauteur utile k (hauteur de la partie des blocs située au-dessus du fond moyen), largeur face à l'écoulement D , les espacements transversaux (d'axe à axe) ay et longitudinaux ax des blocs ainsi que la forme de la face opposée à l'écoulement (plus ou moins plane ou arrondie). On définit la concentration par $C = D^2/(ax \cdot ay)$, la concentration maximale correspondant à des blocs jointifs étant égale à 1. Le

tableau 1 donne la concentration pour différentes valeurs d'espacement relatif ax/D et ay/D . Un paramètre important pour le poisson est le passage libre entre blocs b ($b = ay - D$).

Espacement relatif $ax/D \approx ay/D$	1.5	2.0	2.5	2.8	3.0	3.5	4.0	4.5	5
Concentration C	0.44	0.25	0.16	0.13	0.11	0.08	0.06	0.05	0.04

Tableau 1 : Correspondance entre espacements relatifs et concentration des blocs.

Pour obtenir un écoulement suffisamment uniforme, la concentration doit être d'autant plus forte que la pente est élevée. A pente et hauteur d'eau données, le débit et les vitesses au sein de l'écoulement sont d'autant plus faibles que la concentration est forte.

On aura donc intérêt, d'un point de vue strictement piscicole, de travailler à des concentrations importantes. Par contre, pour des questions de maintenance et d'entretien, on aura intérêt à travailler au contraire à la concentration minimale demeurant compatible avec le passage du poisson.

Les concentrations les plus courantes se situent entre 0.06 ($ax/D \approx ay/D \approx 4$) et 0.16 ($ax/D \approx ay/D \approx 2.5$).

On peut distinguer trois configurations d'écoulement différentes (fluvial, en cascade, torrentiel) suivant les valeurs de la pente et la submersion relative des blocs (rapport hauteur d'eau moyenne sur hauteur utile des blocs h/k).

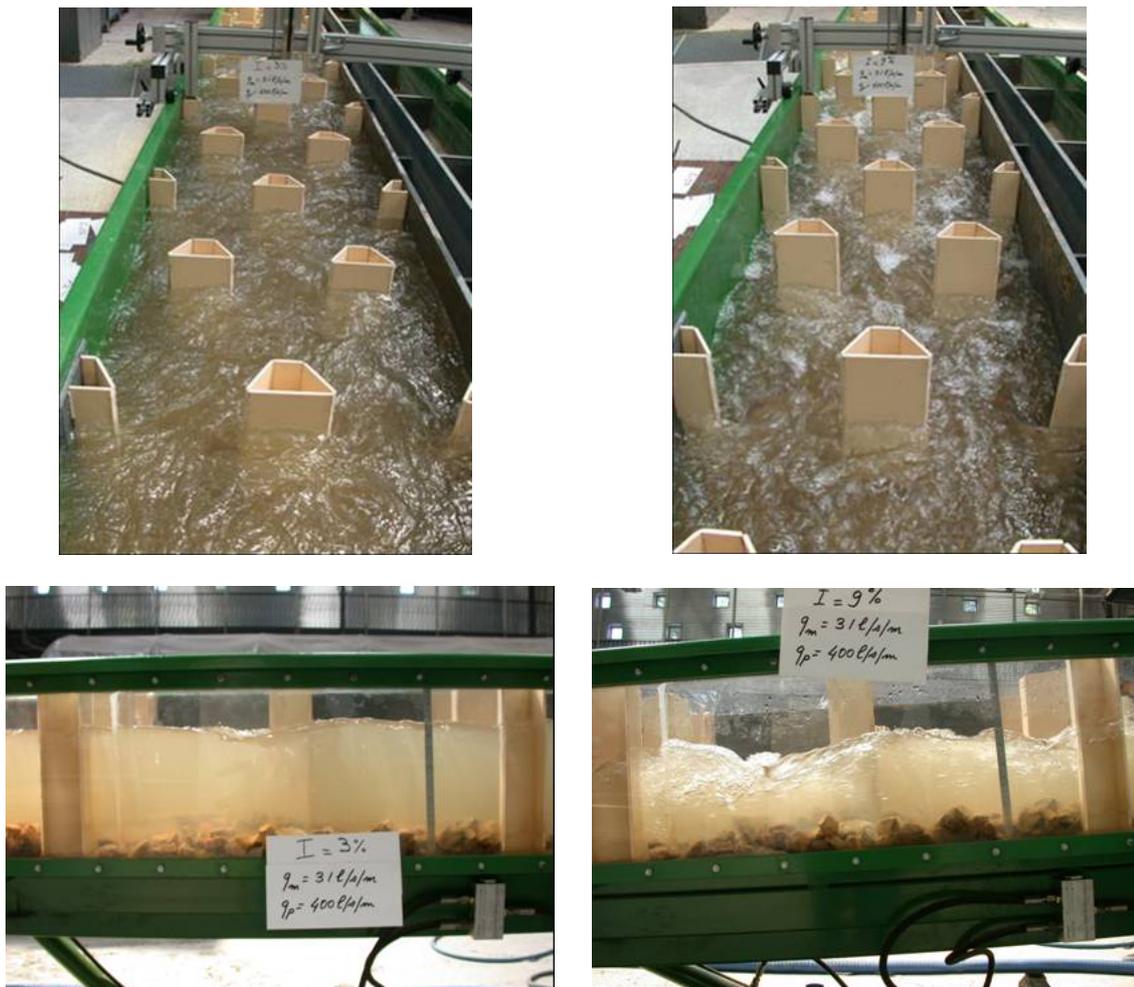


Figure 4 : Ecoulements fluvial à 3% et « en cascade » à 9%

Lorsque la submersion relative est inférieure à 1, l'écoulement restant inscrit entre les blocs, la configuration d'écoulement varie avec la pente. Pour les pentes les plus faibles (1-3%), l'écoulement est fluvial ; pour les pentes supérieures à 4-5%, l'écoulement est « en cascade » (« tumbling flow ») (Peterson et Mohanty, 1960). Cet écoulement est caractérisé par un passage en régime torrentiel au niveau de chaque espace inter-blocs d'une même ligne, immédiatement suivi par un ressaut hydraulique faisant la transition vers une zone fluviale. L'aspect « tumbling », c'est-à-dire l'importance du ressaut, est d'autant plus marqué que la pente est importante. Il reste cependant possible de limiter l'abaissement de la ligne d'eau lors du passage en torrentiel et l'importance du ressaut lors du retour en fluvial en augmentant la concentration des blocs et la rugosité de fond.

Lorsque la submersion relative est supérieure à 1.3, l'écoulement peut être considéré comme la superposition de deux couches en interaction, une couche inférieure jusqu'à la hauteur des blocs à vitesse modérée et une couche de surface au-dessus à forte vitesse. Cette dernière zone, qui peut passer à partir d'une certaine pente en torrentiel, a pour effet d'augmenter par cisaillement les vitesses dans la couche sous-jacente. A mesure que le débit augmente et que le degré de submersion se fait plus important, les blocs voient alors progressivement leur « efficacité hydraulique » diminuer, et ce d'autant plus rapidement que leur hauteur est réduite.

Lorsque la submersion relative est comprise entre 1 et 1.3 environ, on a un écoulement de transition entre les deux configurations précédentes. La ligne d'eau présente des ondulations réparties selon la position des blocs.

La figure ci dessous représente pour différents débits unitaires (débit par mètre de largeur) des profils de vitesses pour des blocs de 0.3 m de largeur disposés à une concentration de 0.13 pour une pente de 5% et pour différents débits. Le facteur de forme k/D est égal à 2, soit une hauteur de bloc de 0.6 m. Tant que l'écoulement reste confiné entre les blocs (blocs émergents), les profils sont relativement uniformes et plats et dépendent relativement peu du débit. Lorsque les blocs sont submergés, la couche supérieure de l'écoulement présente de fortes vitesses. Par cisaillement, cela a pour effet d'augmenter significativement les vitesses de la couche inférieure et ce jusqu'au fond (perte d'efficacité des blocs).

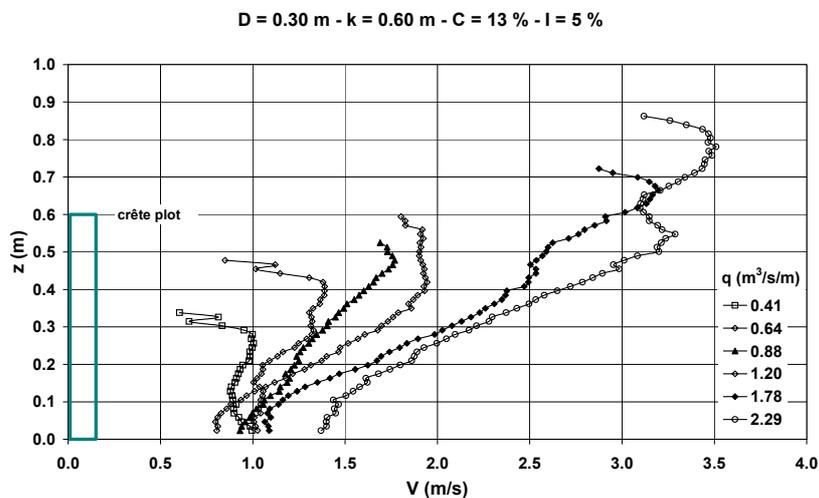


Figure 5 : Exemples de profils de vitesses au sein de blocs régulièrement répartis en fonction du débit, pour une pente de 5% et une concentration de 0.13.

4.1.2 Dimensionnement piscicole

Critères de dimensionnement

Dans ce type d'écoulement, les vitesses dans les jets entre les blocs augmentent avec la pente et diminuent avec la concentration mais il existe toujours dans les sillages derrière les blocs des zones à vitesses modérées voire nulles dans lesquelles le poisson est susceptible de trouver un abri. Par contre, lorsque la pente augmente, les gradients de vitesse entre ces zones à faibles vitesses et les jets deviennent de plus en plus intenses, les zones à l'abri des blocs deviennent de plus en plus agitées et ne peuvent plus constituer des zones de repos pour le poisson.

a. Hauteur d'eau minimale

La hauteur d'eau minimale de l'écoulement doit permettre la nage du poisson. Suivant les espèces-cibles considérées, on adoptera une hauteur d'eau minimale de 0.2 m à 0.4 m (voir tableau 2). La hauteur d'eau est déterminée avant tout par le débit unitaire, la pente et les caractéristiques des blocs (concentration, forme de la section horizontale).

b. Vitesse ponctuelle maximale et vitesse débitante.

Les champs de vitesses dans ce type d'écoulement sont très hétérogènes. On peut caractériser ces champs de vitesses par la vitesse maximale observée dans l'écoulement, et par la vitesse débitante calculée à partir de la section totale d'écoulement ou à partir de la section minimale d'écoulement (passage libre entre les blocs), zone de passage obligée du poisson. Ces vitesses sont fonction de la pente, de la concentration et du débit unitaire. Les valeurs maximales admissibles sont fonction des capacités de nage des espèces-cibles (voir tableau 2).

c. Puissance dissipée maximale

Les poissons, en particulier les petites espèces, doivent pouvoir s'abriter et se reposer derrière les blocs. Cela implique que le niveau de turbulence reste limité. Comme on l'a vu plus haut, la puissance dissipée volumique constitue un paramètre facilement accessible quantifiant les conditions d'agitation dans un dispositif de franchissement. Elle est proportionnelle à la pente et à la vitesse débitante. La puissance dissipée maximale admissible est fonction des espèces-cibles. Le processus de dissipation de l'énergie est plus uniformément réparti au sein d'enrochements régulièrement répartis que dans le cas des passes à bassins, le ratio entre vitesse maximale et vitesse débitante étant beaucoup plus faible (de l'ordre de 1.5 à 3 au lieu de 7 à 11). On peut admettre des puissances dissipées maximales de l'ordre de grandeur du double de ce qui est admis dans une passe à bassins successifs classique, c'est-à-dire grosso-modo de 200 à 600 watts/m³ suivant les espèces (voir tableau 2).

En pratique, c'est le plus souvent la puissance dissipée maximale admissible (et non la vitesse maximale admissible) qui détermine la limite de fonctionnement des dispositifs en termes de pente et de débit.

Les critères hydrauliques que l'on conseille de respecter en fonction des espèces ou groupes d'espèces sont les suivants :

Groupe d'espèces	Vitesses maximales dans les jets (m/s)	Hauteur d'eau minimale (m)	Puissances dissipées maximales (W/m ³)
Saumons, truites de mer, lamproies	2.5	0.4	500-600
Aloses	2.0	0.4	300-450
Truites fario	2.0	0.3	500-600
Ombres, cyprinidés rhéophiles	2.0	0.3	300-450
Petites espèces	1.5	0.2	200-300

Tableau 2 : Critères hydrauliques à respecter selon les groupes d'espèces pour les enrochements régulièrement répartis.

Caractéristiques géométriques des enrochements

a. Caractéristiques des blocs (D, k)

On adopte généralement pour les blocs des largeurs face à l'écoulement **D** compris 0.3 m et 0.6 m. Le compromis entre « l'efficacité hydraulique » et les problèmes

d'entretien et de stabilité amène à adopter des hauteurs utiles k de 0.50 à 0.8 m, et des rapports de forme k/D de l'ordre de 1.0 à 2 au maximum.

Plus la hauteur des blocs est importante, plus le dispositif est hydrauliquement efficace mais plus il est sujet au colmatage et à la formation d'embâcles. Si le dispositif n'est pas protégé au niveau de sa prise d'eau, il est préférable que les blocs soient rapidement submergés lors des crues pour ne pas retenir trop fréquemment les corps flottants.

On orientera les blocs la face la plus plate et large face à l'écoulement, ceci dans le but, pour une concentration et une hauteur d'eau données, de réduire au maximum le débit transitant dans l'ouvrage, les vitesses et surtout les puissances dissipées.

b. Concentration des blocs

D'une manière générale, plus la pente est élevée, plus la concentration doit être élevée. Pour des questions d'entretien, on limitera cependant la concentration à des valeurs de l'ordre de 0.16, c'est-à-dire à des espacements latéraux et longitudinaux relatifs de l'ordre de 2.5, soit des espaces libres entre blocs de 1.5 fois la largeur de ces blocs.

Principe de dimensionnement

Le dimensionnement consiste à déterminer, pour une espèce-cible, la gamme de débit acceptable pour une géométrie (concentration et dimensions des blocs) et une pente données.

Le choix de l'espèce-cible dicte les critères hydrauliques à respecter. Dans le cas de plusieurs espèce-cibles, les critères les plus pénalisants, à la fois sur la hauteur minimale, la vitesse maximale et la puissance dissipée maximale, doivent être pris en compte

Pour une pente et une géométrie données, le débit unitaire minimal est déterminé tout d'abord par la hauteur d'eau minimale à respecter. Le débit unitaire minimal peut varier de 100-150 l/s/m pour les petites espèces et les faibles pentes (quelques %) à plus de 300-350 l/s/m pour les grosses espèces et les fortes pentes (voir tableau 3).

Le débit unitaire maximal acceptable est ensuite déterminé soit par la vitesse maximale, soit par la puissance dissipée maximale, soit par la hauteur des blocs, elle même limitée par des questions de stabilité et d'entretien. En effet, lorsque les blocs sont submergés, ils perdent progressivement leur efficacité hydraulique. La franchissabilité devient plus aléatoire, notamment pour les petites espèces.

La plage de débit unitaire (et de hauteur d'eau) acceptable ainsi définie a tendance à se réduire progressivement lorsque la pente augmente. La pente maximale admissible du dispositif est la pente au-delà de laquelle cette gamme devient trop restreinte, voire nulle.

Une augmentation de la concentration a pour effet de diminuer les débits unitaires minimal et maximal et surtout de diminuer la vitesse et la puissance dissipée maximales. Pour une concentration donnée, la taille des blocs n'a pas beaucoup d'influence.

L'annexe hydraulique fournit tous les éléments permettant le dimensionnement des dispositifs en enrochements régulièrement répartis. Les abaques présentés permettent de bien visualiser l'influence de la pente de l'ouvrage sur le fonctionnement hydraulique et sur la gamme de débits unitaires admissibles.

Exemple de franchissabilité par groupe d'espèces

À titre d'exemple, le tableau 3 donne suivant le groupe d'espèces considéré la gamme de débits unitaires acceptables en fonction de la pente, pour des blocs de hauteur utile $k = 0.80$ m, la face opposée à l'écoulement plutôt plane, de largeur $D = 0.5$ m et disposés avec une concentration $C = 0.13$.

Les abaques ayant permis d'établir ce tableau, c'est-à-dire donnant le débit unitaire, la vitesse maximale et la puissance dissipée au sein de l'écoulement en fonction de la pente et la hauteur

d'eau, **pour une concentration de 0.13 et des blocs de forme plane et de largeur 0.5 m face à l'écoulement** sont donnés dans l'annexe hydraulique.

On remarquera que c'est avant tout la pente qui détermine la puissance dissipée : les valeurs dépassent 400 watts/m³ dès que la pente devient supérieure à 5%.

Dans l'exemple du tableau 3, la plage de fonctionnement moyenne en terme de hauteur d'eau est de l'ordre de 40 cm, et correspond à la différence entre la profondeur minimale acceptable pour l'espèce considérée et la hauteur utile des blocs. La hauteur utile des blocs de 0.80 m est un maximum : compte tenu de la nécessité d'ancrer les blocs dans le radier d'une hauteur de l'ordre de la moitié leur hauteur totale, cette hauteur utile correspond à des blocs de hauteur totale de 1.6 m. Si on limite, pour des problèmes d'entretien, la hauteur utile des blocs à une soixantaine de cm, la plage de fonctionnement sera plus réduite, de l'ordre d'une vingtaine à une trentaine de cm.

Groupe d'espèces	Pente	Débit unitaire minimal et maximal (m ³ /s/m)	Hauteur d'eau (m)	Vitesse débitante maximale (m/s)	Vitesse maximale (m/s)	Puissance dissipée (W/m ³)
Saumons, truites de mer, lamproies	7% (max)	0.35-0.70	0.40- 0.80	1.35-1.45	1.70-2.10	550- 600
	6%	0.30-0.65	0.40- 0.80	1.20-1.30	1.60-1.90	450-500
	5%	0.25-0.60	0.40- 0.80	1.10-1.20	1.40-1.70	300-350
Alose	6% (max)	0.30-0.45	0.40-0.60	1.20-1.30	1.60-1.80	450-450
	5%	0.30-0.60	0.40- 0.80	1.10-1.20	1.40-1.70	300-350
	4%	0.25-0.50	0.40-0.80	0.90-1.00	1.30-1.60	200-250
Truite fario	7% (max)	0.25-0.60	0.30-0.70	1.30-1.40	1.60- 2.00	550- 600
	6%	0.20-0.65	0.30- 0.80	1.20-1.30	1.40-1.90	400-500
	5%	0.20-0.60	0.30- 0.80	1.00-1.20	1.30-1.70	300-350
Ombre, cyprinidés rhéophiles	6% (max)	0.20-0.45	0.30-0.60	1.10-1.30	1.40-1.80	400- 450
	5%	0.20-0.60	0.30- 0.80	1.00-1.20	1.30-1.70	300-350
	4%	0.20-0.50	0.30- 0.80	0.90-1.00	1.20-1.60	200-250
Petites espèces	4% (max)	0.10-0.45	0.20-0.70	0.90-1.00	1.00- 1.50	200-250
	3%	0.10-0.45	0.20- 0.80	0.80-0.90	0.90-1.30	150-150
Toutes les espèces	4%	0.25-0.45	0.40-0.70	0.80-1.0	1.30- 1.50	200-250
	3%	0.20-0.45	0.40- 0.80	0.80-0.90	1.10-1.30	150-150

Tableau 3 : Franchissabilité des enrochements régulièrement répartis pour les différents groupes d'espèces pour une concentration de 13% (en gras la valeur valeur du paramètre limitant).

4.2 Enrochements en rangées périodiques

Dans le cas d'enrochements régulièrement répartis – sauf pour des pentes très faibles –, la gamme des débits acceptables pour les petites espèces est limitée et devient incompatible avec celle par les espèces de grande taille, les hauteurs d'eau étant trop faibles. Un moyen de conserver des hauteurs d'eau suffisantes pour les espèces de grande taille tout en limitant les débits est de disposer les blocs en rangées à intervalles réguliers, les espacements longitudinaux entre les rangées étant plusieurs fois supérieurs aux espacements transversaux entre les blocs. Les blocs d'une rangée doivent être suffisamment proches les uns des autres pour que les chutes soient localisées au niveau de ces rangées (figure 7). La mise en place de seuils au niveau des rangées permet de garantir une hauteur d'eau suffisante au pied des chutes et de réduire les puissances dissipées volumiques. On obtient ainsi des pseudo-bassins où les poissons sont susceptibles de trouver des zones de repos. On veillera à aménager une échancrure se prolongeant jusqu'au radier au niveau de chaque seuil de manière à faciliter le passage des espèces benthiques.

Ce type de dispositif est très voisin d'une passe à bassins classique. Les critères de dimensionnement sont identiques à ceux des passes à bassins.

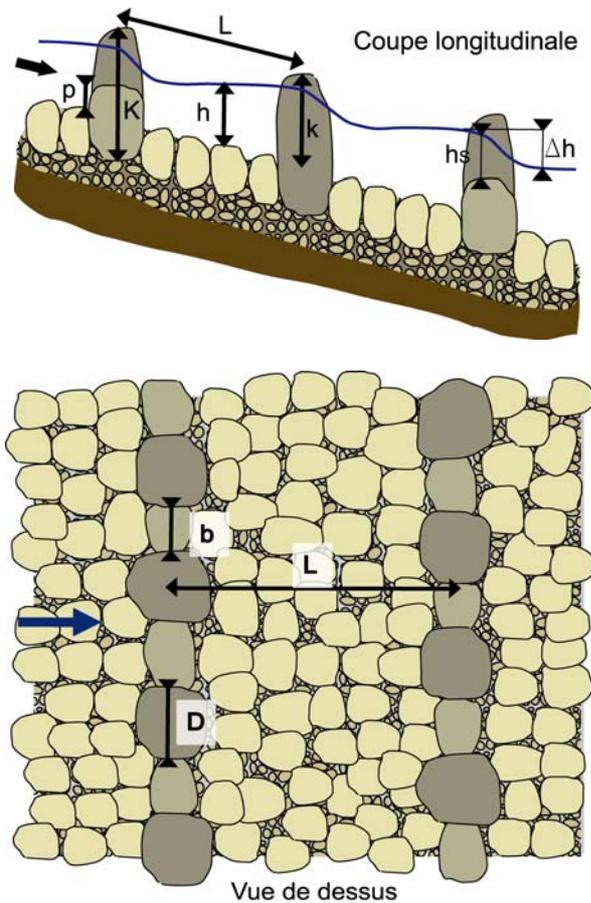


Figure 6 : Schéma d'une disposition d'enrochements en rangées périodiques avec seuils

4.2.1 Aspects hydrauliques

Les paramètres qui déterminent les caractéristiques de l'écoulement sont la pente de la rampe (I), les dimensions caractéristiques des blocs (hauteur utile k , largeur face à l'écoulement D), la largeur de passage libre entre les blocs b , l'espacement longitudinal des rangées L et la hauteur du seuil p . On définit la porosité des rangées de blocs par $\theta \approx b/(b+D)$ (largeur de passage libre rapportée à la largeur totale de la passe). Les chutes Δh localisées au niveau des rangées sont de l'ordre de $I \times L$.

Pour les faibles débits, tant que les blocs ne sont pas submergés, l'écoulement est caractérisé par une succession de chutes au niveau des rangées de blocs, les jets formés au niveau de chaque espace inter-blocs se dissipant dans les pseudo-bassins. Pour les valeurs élevées du débit, lorsque les blocs sont submergés, le régime passe en torrentiel avec formation d'un écoulement à forte vitesse en surface, ayant un effet important d'entraînement des vitesses de la couche sous-jacente. Les rangées de blocs perdent alors progressivement leur efficacité hydraulique, et ce d'autant plus rapidement que leur hauteur est réduite. Le passage en régime torrentiel intervient pour des submersions relatives h/k de l'ordre de 1.2. Lorsque l'écoulement est dans la zone de transition, le conflit entre les jets plongeants et les jets de surface est susceptible d'entraîner la formation d'ondes déferlantes caractérisées par un fort balancement latéral qui s'amplifie vers l'aval.



Figure 7 : Ecoulement au travers d'enrochements en rangées périodiques

Lorsque les blocs ne sont pas submergés, le débit transite entièrement par les espaces inter-blocs par-dessus les seuils. Ces seuils constitués également d'enrochements fonctionnent comme des déversoirs épais.

4.2.2 Dimensionnement piscicole

Critères de dimensionnement

a. Hauteur d'eau minimale sur les seuils

La hauteur d'eau sur les seuils, zone la moins profonde de l'écoulement, doit être suffisante pour permettre le passage du poisson. Les charges minimales sur les seuils selon les groupes d'espèces sont quelque peu inférieures aux hauteurs d'eau minimales adoptées pour les enrochements régulièrement répartis : 0.3 m pour le saumon, la truite de mer et la lamproie, 0.4 m pour l'aloise, et 0.2 m pour la truite fario, les grands cyprinidés et les petites espèces.

b. Chute et vitesse maximale

La vitesse maximale dépend de la chute au niveau de chaque rangée et est de l'ordre de $(2g \cdot \Delta h)^{0.5}$. On limitera la chute à 0.30 m (soit une vitesse maximale de 2.4 m/s) pour les saumons, truites de mer et lamproies, à 0.20 m (soit 2 m/s) pour les aloses, truites fario, ombres et grands cyprinidés et à 0.10-0.15 m (soit 1.5-1.7 m/s) pour les petites espèces. Les chutes Δh localisées au niveau des rangées étant voisines du produit de la pente I par l'espacement longitudinal L , cet espacement sera d'autant plus faible que la pente est importante.

c. Puissance dissipée maximale

La puissance dissipée maximale admissible est fonction des espèces considérées. On peut admettre des puissances dissipées maximales identiques à celles admises pour les passe à bassins successifs classiques, de 150 à 300 watts/m³.

Pour les grosses espèces ayant des endurance importantes et susceptibles de franchir la rampe sans s'arrêter, on peut admettre des puissances dissipées significativement plus fortes comme dans les passes à bassins.

Les critères hydrauliques conseillés en fonction des espèces ou groupes d'espèces sont les suivants :

Groupe d'espèces	Chute maximale (m)	Hauteur d'eau minimale sur le seuil (m)	Puissances dissipées maximales (Watts/m ³)
Saumons, truites de mer, lamproies	0.30	0.3	300
Aloses	0.20	0.4	200
Truites fario	0.20	0.2	300
Ombres, cyprinidés rhéophiles	0.20	0.2	200
Petites espèces	0.10-0.15	0.2	150

Tableau 4 : Critères hydrauliques à respecter selon les groupes d'espèces pour les enrochements en rangées périodiques avec seuil.

Caractéristiques géométriques

a. Caractéristiques des blocs (D,k)

Concernant la forme des blocs, on adopte généralement des largeurs face à l'écoulement **D** entre 0.3 et 0.6 m. Le compromis entre « l'efficacité hydraulique » et les problèmes d'entretien et de stabilité amène à adopter des hauteurs utiles **k** de 0.50 à 0.8 m, et des rapports de forme **k/D** de l'ordre de 1.0 à 2 au maximum.

b. Porosité et espacement des blocs

Les porosités θ sont généralement de l'ordre de 0.40 à 0.50. La largeur de passage libre **b** doit être au minimum de l'ordre de 0.30-0.40 m pour permettre le passage des poissons et limiter les risques de colmatage.

c. Espacement des rangées de blocs

Les espacements des rangées **L** peuvent varier de 2 m environ au minimum à plus de 4 mètres pour les plus faibles pentes.

d. Hauteur des seuils

On adopte généralement des seuils d'une hauteur (**p**) de 0.30 à 0.50 m.

Principe de dimensionnement

Le dimensionnement consiste à déterminer, pour une espèce-cible la gamme de débit acceptable pour une géométrie (porosité des rangées et hauteur des seuils) et une pente données.

Le choix de l'espèce-cible dicte les critères hydrauliques à respecter. Dans le cas de plusieurs espèce-cibles, les critères les plus pénalisants à la fois sur la hauteur minimale sur le seuil, la chute maximale et la puissance dissipée maximale doivent être considérées.

Pour une pente et une géométrie données, l'espacement longitudinal des rangées est tout d'abord déterminé par la chute maximale. Pour que le poisson ne rencontre pas de difficultés de passage au niveau des rangées, il faut également veiller à la condition de non formation d'un ressaut trop prononcé (voir annexe hydraulique). L'espacement longitudinal est d'autant plus faible que la pente est forte.

Le débit unitaire minimal est ensuite déterminé par la charge minimale sur les seuils au niveau des rangées de blocs. Le débit unitaire minimal peut varier de 60-70 l/s/m pour les petites espèces à 100-150 l/s/m pour les grosses espèces (voir tableau 5).

Le débit unitaire maximal acceptable est déterminé soit par la puissance dissipée maximale, soit par la hauteur des blocs, elle même limitée par des questions de stabilité et d'entretien. En effet, lorsque les blocs sont submergés et perdent leur efficacité hydraulique, la franchissabilité devient plus aléatoire, notamment pour les petites espèces.

La gamme de débit unitaire (et de hauteur d'eau) franchissable ainsi définie a tendance à se restreindre vers les fortes pentes. La pente maximale admissible du dispositif est la pente au-delà de laquelle cette gamme devient trop restreinte, voire nulle.

Une augmentation de la hauteur du seuil augmente le volume des bassins et permet ainsi de diminuer la puissance dissipée. Une diminution de la porosité a pour effet de diminuer quelque peu les débits unitaires minimal et maximal et la puissance dissipée.

L'annexe hydraulique fournit tous les éléments permettant le dimensionnement des dispositifs en enrochements en rangées périodiques avec seuils.

Exemple de franchissabilité par groupe d'espèces

Le tableau ci-dessous donne à titre d'exemple un dimensionnement d'enrochements en rangées périodiques avec **des seuils d'une hauteur de 0.4 m**, selon les groupes d'espèces. La chute maximale admissible fixe le couple pente – espacement longitudinal des rangées. Le couple charge sur le seuil – porosité détermine le débit et la puissance dissipée et par conséquent la plage de fonctionnement. L'optimisation d'un dimensionnement se fait par itération en jouant sur la géométrie du dispositif.

Groupes d'espèces	Pente	Espacement longitudinal (m)	Porosité	Chute (m)	Vitesse maximale (m/s)	Débits unitaires min et max (m ³ /s/m)	Charges min et max sur le seuil (m)	Puissances dissipées min et max (W/m ³)
Saumons, truites de mer, et lamproies	9% (max)	2.5	0.4	0.23	2.1	0.10-0.36	0.30-0.70	130- 300
	7%	3.0	0.5	0.21	2.0	0.13-0.50	0.30-0.75	125- 300
Alose	7% (max)	3.0	0.4	0.21	2.0	0.16-0.29	0.40-0.60	135- 200
	5%	4.0	0.5	0.20	2.0	0.20-0.45	0.40-0.70	120- 200
Truite fario	8% (max)	2.0	0.4	0.16	1.8	0.06-0.45	0.20- 0.80	70-290
	6%	3.0	0.5	0.18	1.9	0.07-0.55	0.20- 0.80	70-270
Ombre, cyprinidés rhéophiles	7% (max)	2.5	0.4	0.18	1.9	0.06-0.29	0.20-0.60	60- 200
	5%	3.5	0.5	0.18	1.9	0.07-0.45	0.20-0.70	60- 200
Petites espèces	6% (max)	2.5	0.4	0.15	1.7	0.06-0.25	0.20-0.55	55- 150
	4%	3.5	0.5	0.14	1.7	0.07-0.40	0.20-0.65	45- 150
Toutes espèces	5% (max)	3.0	0.4	0.15	1.7	0.16-0.32	0.40-0.65	95- 150
	4%	3.5	0.5	0.14	1.7	0.20-0.40	0.40-0.65	95- 150

Tableau 5 : Franchissabilité des enrochements en rangées périodiques avec des seuils d'une hauteur de 0.4 m pour les différents groupes d'espèces. (en gras la valeur du paramètre limitant)

4.3 Les rampes en enrochements jointifs

Les extractions massives de matériaux alluvionnaires dans les lits des cours d'eau en France dans les années 1965-1975 se sont traduites par un impact considérable sur l'équilibre des cours d'eau : abaissement des lits, érosion des berges, destruction des protections de berges, déstabilisation des fondations d'ouvrages d'art, abaissement des niveaux des nappes. Un grand nombre de seuils de stabilisation ont été installés pour limiter l'incision des cours d'eau, seuils dont les hauteurs variaient de moins de 1.50 m à plus de 8 m. Ces seuils, avec des pentes de coursiers de l'ordre de 25%, constituaient le plus souvent des obstacles infranchissables pour le poisson. Plutôt que de construire des passes à poissons plus ou moins efficaces en berge, dont la maintenance constituait le plus souvent un problème, il a semblé préférable de modifier la conception des seuils pour les rendre franchissables sans dispositif particulier, tout au moins

par les espèces-cibles comme les grands salmonidés migrateurs et la truite. Ce sont les critères de conception issus de l'étude Larinier et *al.* (1995) qui sont présentés dans la suite. On insiste sur le fait que l'on ne peut pas considérer les rampes en enrochements jointifs comme des dispositifs de franchissement à proprement parler, mais plutôt comme des seuils de stabilisation dont on a cherché à minimiser l'impact sur la connectivité longitudinale des cours d'eau.

Ces rampes sont constituées de blocs de dimensions relativement uniformes disposés les uns contre les autres et formant un coursier de pente plus ou moins importante (figure 9).

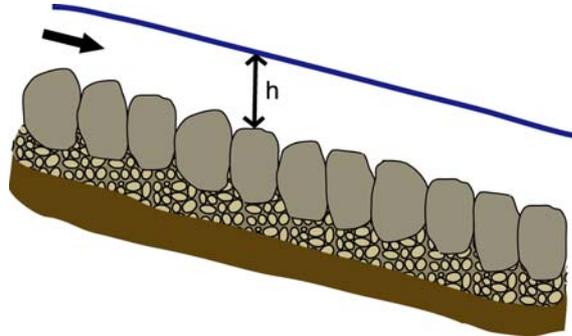


Figure 8 : Coupe transversale schématique d'une rampe en enrochements jointifs.

4.3.1 Aspects hydrauliques

Les paramètres qui déterminent les caractéristiques de l'écoulement (vitesses et tirants d'eau) sont la pente de la rampe, le débit par mètre de largeur, les dimensions caractéristiques des blocs et le cas échéant leur niveau de jointoiment.

La vitesse de l'écoulement augmente progressivement de la crête de la rampe vers l'aval jusqu'à ce que l'écoulement devienne uniforme, le tirant d'eau moyen restant alors à peu près constant tout au long du coursier. Plus le coursier est rugueux et le débit unitaire faible, plus la longueur d'établissement du régime uniforme est courte. Elle est de l'ordre de 3 à 4 mètres pour des débits de 1 à 2 m³/s/m.



Figure 9 : Ecoulement sur une rampe en enrochements jointifs de pente 10% (modèle échelle 1/22)

On a porté à titre d'illustration sur la figure 11 des profils de vitesse mesurés sur une rampe en enrochements ($D_{65} = 0.85$ m) de pente 10%, pour un débit unitaire de 1.5 m³/s/m. Les profils relevés sur plusieurs verticales au droit d'une section à régime uniforme mettent en évidence une variabilité spatiale importante des profils de vitesse (les valeurs maximales étant comprises entre 2.1 m/s et 4.5 m/s) ainsi qu'un très fort gradient de vitesse sur la verticale.

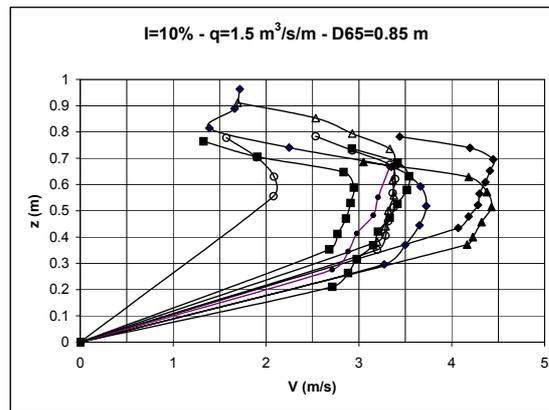


Figure 10 : Exemple de profils de vitesse sur une rampe en enrochements jointifs (D_{65} de 0.85 m) à une pente de 10%.

4.3.2 Dimensionnement piscicole

Principe et critère de dimensionnement

La franchissabilité d'une rampe en enrochement jointifs dépend des vitesses de l'écoulement, des hauteurs d'eau au dessus de la crête des enrochements, de la « qualité » de la lame d'eau (absence de ressauts, de décollement de la lame d'eau rendant la nage du poisson difficile sinon impossible) ainsi que de la distance à franchir.

Deux aspects sont limitants : pour les faibles débits unitaires, la hauteur d'eau n'est plus suffisante pour permettre la nage du poisson, l'eau filtrant entre les enrochements ; lorsque le débit unitaire augmente, la vitesse de l'écoulement dépasse rapidement les capacités de nage de la plupart des espèces. La plage de débit unitaire pour lesquels la rampe reste franchissable se réduit au fur et à mesure que la pente augmente, et ce quel que soit le groupe d'espèce.

Les rampes en enrochements jointifs n'offrent pas vraiment de zones de repos aux poissons de grandes tailles (saumons, truite de mer, alose), et leur franchissement doit donc s'effectuer d'une seule traite. Les blocs les plus protubérants peuvent éventuellement offrir des zones de repos aux plus petites espèces, à conditions que l'agitation et la turbulence ne soient pas trop fortes. D'un point de vue piscicole, il est toujours préférable d'adopter les dimensions de blocs les plus petites possibles, tout en restant compatible avec la stabilité de l'ouvrage (voir annexe hydraulique). Les critères hydrauliques conseillés en fonction des espèces ou groupes d'espèces sont les suivants (Larinier et al., 1995) :

Groupe d'espèces	Hauteur d'eau minimale (m)	Vitesses d'écoulement maximales (m/s)	Longueur maximale du coursier (m)
Saumons, truites de mer, lamproies	0.3	3.0	10
		2.0	20
Aloses	0.4	2.5	10
		1.5-1.8	20
Truites fario, Ombres, cyprinidés rhéophiles	0.2	1.8-2.0	5-6
		1.5	10
Petites espèces	0.2	1.2-1.5	5-6

Tableau 6 : Critères hydrauliques à respecter selon les groupes d'espèces pour les enrochements jointifs.

Franchissabilité par groupe d'espèces

Au dessus de 12-15 %, l'écoulement sur une rampe devient tel que :

- pour les débits unitaires élevés ($> 2 \text{ m}^3/\text{s/m}$), les vitesses deviennent très fortes ($> 5\text{-}6 \text{ m/s}$) et incompatibles avec le passage de la plupart des espèces.
- pour les débits unitaires faibles, les lames d'eau ne sont plus « cohérentes » : présence de ressauts et de décollements de la lame d'eau. Sauf à réduire la dimension des blocs, mais se pose alors le problème de la stabilité de l'ouvrage

La gamme de pente pratiquement intéressante pour la mise en œuvre de rampes en enrochements jointifs franchissables par conception se situe entre 4-5% et 8-10%.

Saumon, truite de mer et lamproie

Pour des pentes de l'ordre de 8-10%, la plage de franchissabilité en terme de débit unitaire est relativement réduite et comprise entre $0.5 \text{ m}^3/\text{s/m}$ et $1 \text{ m}^3/\text{s/m}$. On limitera la chute de la rampe à 1.50 m.

Pour la lamproie, la plage peut être étendue vers les faibles débits unitaires jusqu'à $0.2 - 0.3 \text{ m}^3/\text{s/m}$, dans la mesure où cette espèce est capable de progresser dans des hauteurs d'eau plus faibles que les grands salmonidés migrateurs.

Pour des pentes de l'ordre de 5%, cette gamme s'étend de 0.3 à $1.0 \text{ m}^3/\text{s/m}$, la longueur de la rampe n'est alors plus limitée. Pour la lamproie, la plage peut être étendue vers les faibles débits jusqu'à $0.2 \text{ m}^3/\text{s/m}$.

Alose

Répondre aussi précisément pour l'alose que pour le saumon est délicat : ses capacités de nage sont inférieures et surtout cette espèce n'a pas la faculté de négocier les écoulements « tourmentés » aussi bien que les salmonidés.

A 8-10%, la gamme de débit unitaire franchissable par les aloses est déjà très restreinte : 0.5 à $0.8 \text{ m}^3/\text{s/m}$. La longueur de la rampe ne devant alors pas dépasser une dizaine de mètres, la chute maximale rattrapable est de l'ordre du mètre. Au-delà de 10%, leur franchissement devient aléatoire. A 5%, la gamme s'étend de 0.4 à $1 \text{ m}^3/\text{s/m}$, la rampe ne devant pas dépasser 20 m de long, permettant de ne rattraper toujours qu'un mètre de chute au maximum.

Truite, ombre et grands cyprinidés

Les débits unitaires pour lesquels les vitesses restent inférieures à 1.20 m/s pour une pente de 10 % sont inférieurs à $0.2 \text{ m}^3/\text{s/m}$. Pour de tels débits, compte tenu de la dimension des blocs, il est difficile de parler de « lame d'eau » sur le coursier du seuil : il s'agit plutôt d'un écoulement « en cascade ». Le poisson a la possibilité de progresser de bloc en bloc **à condition que la hauteur des blocs n'induisse pas localement des chutes infranchissables**. Pour les petits individus, le cheminement entre des blocs de grosses tailles avec des chutes locales importantes est très aléatoire. On aura donc tout intérêt à réduire la dimension moyenne des blocs autant que la stabilité de l'ouvrage le permet. On évitera de prendre des blocs relativement sphériques, on prendra de préférence des blocs allongés en forme de menhir que l'on mettra en place verticalement.

A 5%, la gamme de débit unitaire franchissable par ces espèces est encore très restreinte : 0.2 à $0.5 \text{ m}^3/\text{s/m}$.

Petites espèces holobiotiques

Les rampes en enrochements jointifs ne permettent vraiment le franchissement des petites espèces que pour des pentes très faibles ($< 3\%$), peu réalistes pour un seuil compte tenu de la longueur d'ouvrage alors nécessaire pour rattraper une chute significative. Pour ces espèces, il conviendra de recourir à des solutions décrites dans les paragraphes précédents (blocs régulièrement répartis ou rangées de blocs périodiques).

Anguille

L'anguille n'est en mesure de franchir les rampes en enrochements jointifs que si elle peut trouver des zones à faibles tirants d'eau, en bordure généralement, et utiliser ses capacités de reptation.

4.4 Démarche générale de dimensionnement des passes « naturelles »

La démarche générale pour le dimensionnement des passes "naturelles" est identique à celle utilisée pour les autres types de passes. On ne fera qu'en rappeler brièvement certains points particuliers, et pour plus de détails on se référera à l'ouvrage "Passes à Poissons : expertise conception des ouvrages de franchissement" (Larinier et al, 1994, 2002)).

L'ouvrage doit être adapté aux espèces-cibles (vitesses maximales, chutes, puissances dissipée volumiques) et au site sur lequel il doit être installé (débits, variations de niveau à prendre en compte, maintenance).

On précisera tout d'abord très clairement les espèces à prendre en compte ainsi que leur période de migration.

Les débits du cours d'eau en période de migration pour lesquels le dispositif doit être fonctionnel (généralement entre l'étiage et 1.5 à 2.5 fois le module annuel suivant le régime hydrologique du cours d'eau) et ainsi que la plage correspondante des cotes des plans d'eau à l'amont et à l'aval de l'obstacle seront définis.

Le choix du type de dispositif de franchissement dépend alors des possibilités d'implantation générale sur l'obstacle, des débits à faire transiter pour satisfaire aux objectifs d'attractivité et de la faisabilité technique ainsi que de la prise en compte de l'entretien ultérieur du dispositif. Dans les cas où le choix se porte vers les passes « naturelles », le dimensionnement suit généralement les étapes suivantes :

a - Le projeteur doit se définir un scénario au préalable avec la pente de l'ouvrage et les caractéristiques géométriques du dispositif :

- concentration **C** et dimensions des blocs (**D**, **k**) pour les enrochements régulièrement répartis.
- porosité **θ** et espacement des rangées **L**, hauteur des seuils **p** et dimensions des blocs (**D**, **k**) pour les enrochements en rangées périodiques.
- **D₆₅** pour les enrochements jointifs.

La longueur du dispositif, qui dépend de la pente et de la chute maximale à rattraper, doit être compatible avec les possibilités d'implantation générale sur l'obstacle.

b - Le débit unitaire minimal du dispositif est déterminé à partir de la hauteur d'eau minimale compatible avec le passage des espèces-cibles. Cela permet de caler la cote de la crête du dispositif dans sa partie la plus basse par rapport à la cote minimale du plan d'eau amont.

c - Il convient ensuite de vérifier que les conditions hydrauliques demeurent satisfaisantes pour la cote maximale du plan d'eau amont pour laquelle le dispositif doit rester fonctionnel. Si tel n'est pas le cas,

- dans le cas d'un ouvrage relativement large, il est possible d'adopter un dévers latéral, de pente inférieure à 5% pour éviter une concentration de l'écoulement dans sa partie la plus basse. On calera le point haut du dévers de telle sorte que les conditions hydrauliques y demeurent satisfaisantes pour les espèces-cibles pour la cote maximale du plan d'eau amont.

- dans le cas d'un ouvrage peu large (rivière de contournement par exemple) ne se prêtant pas à un dévers latéral, on peut envisager l'installation d'une section de régulation des débits et des niveaux à l'amont de l'ouvrage, consistant le plus souvent en un nombre limité de bassins (généralement de 3 à 5) communiquant par des fentes verticales.

d - Lorsqu'un scénario est jugé satisfaisant d'un point de vue piscicole, il reste à vérifier la stabilité de l'ouvrage lorsque celui-ci est exposé aux crues, ce qui permet de déterminer la dimensions des blocs constituant le fond de l'ouvrage et en particulier pour les ouvrages à blocs isolés la hauteur totale (**K**) des blocs dont la hauteur utile (**k**) a été fixée précédemment.

On veillera, de façon à limiter les problèmes d'entretien, à ce que la hauteur des blocs soit réduite au maximum de façon à ce qu'ils soient le plus rapidement et fréquemment submergés lors des crues, tout en veillant à ce qu'ils demeurent suffisamment efficaces en période de migration.

4.5 Conclusion

L'hydraulique des passes « naturelles » se révèle bien plus difficile à caractériser que celle des passes classiques étant donné la variabilité du mode d'organisation, des formes et des dimensions des blocs. Leur mise en œuvre lors des travaux est d'une précision toute relative. C'est pourquoi il convient de prendre des marges raisonnables de sécurité, en particulier sur la pente des ouvrages. Les limites de franchissabilité des différents dispositifs ne sont données qu'à titre indicatif, notamment concernant les débits unitaires maximaux admissibles. L'acquisition d'un retour d'expérience est primordial pour consolider, affiner, voire modifier les critères proposés dans ce guide. En particulier les critères portant sur la puissance dissipée volumique maximale restent empiriques, inspirés des connaissances sur les passes techniques et d'expérimentations menées en laboratoire.

Les enrochements régulièrement répartis doivent permettre sans problème le franchissement jusqu'à des pentes de l'ordre 6-7% pour les saumons, les truites de mer, les lamproies et les truites fario, jusqu'à 5-6% pour les aloses, les ombres et les grands cyprinidés d'eau vives et jusqu'à 3-4% pour les petites espèces. Avec des enrochements en rangées périodiques avec seuils, la réduction des débits unitaires consécutive à l'installation de seuils de fond permet d'augmenter les pentes de 1 à 2% par rapport aux valeurs précédentes. Pour des pentes plus élevées, en particulier dans le cas des enrochements jointifs, les poissons ne peuvent plus vraiment trouver de zone de repos et doivent franchir l'obstacle d'une traite en faisant appel à leur vitesse de pointe ; c'est pourquoi la longueur des ouvrages et donc les chutes admissibles demeurent très limitées.

Trois modes d'organisation des enrochements ont été distingués dans cette partie, mais en réalité on peut envisager un nombre infini de variantes dans la disposition des blocs et l'organisation des singularités hydrauliques, selon les conditions particulières à chaque ouvrage. Il est envisageable, notamment pour les ouvrages à pentes faibles (rivières de contournement), de diversifier l'écoulement au sein du dispositif avec la mise en place par exemple d'épis rocheux ou de seuils. Cela permet en outre d'éviter l'uniformité d'une disposition régulière et d'obtenir une meilleure intégration dans le paysage, en donnant une plus grande diversité et surtout un aspect plus naturel à l'écoulement.

Comme on l'a dit plus haut, les progrès dans la conception et le dimensionnement piscicole des passes « naturelles » viendront du suivi d'ouvrages existants, c'est-à-dire des observations du comportement des poissons au sein des ouvrages et des évaluations de leur efficacité. La mise en place de stations de contrôles permanentes sur les passes « naturelles » comme les rampes s'avère difficile étant donné les largeurs souvent importantes des ouvrages. La franchissabilité pour les espèces diadromes peut être évaluée par radiotéléométrie. Pour les petites espèces holobiotiques, l'évaluation de la franchissabilité ne peut se faire que par marquage recapture, ou par piégeage à l'amont du dispositif, ce qui nécessite généralement la mise en place d'un système de guidage (filet, grille) vers le piège.

5 L'IMPLANTATION DES PASSES NATURELLES SUR LES OBSTACLES

Comme on l'a vu auparavant, on distingue les rampes installées sur toute la largeur de l'obstacle, les rampes installées sur une partie seulement, et enfin les rivières de contournement installées en rive. Chaque implantation peut être associée à des modes d'organisation très variables des blocs (jointifs, régulièrement répartis ou en rangées...) ou plus généralement des singularités (seuils, épis...) pour réduire les vitesses. On passera en revue dans la suite les trois modes d'implantation en listant leurs avantages et inconvénients et on présentera succinctement quelques exemples de réalisations en France et à l'étranger.

5.1 Les rampes installées sur toute la largeur de l'obstacle

Les rampes installées sur toute la largeur d'un obstacle absorbant tout le débit du cours d'eau présentent un intérêt majeur en terme d'attractivité : elles s'avèrent très efficaces, le poisson ne pouvant manquer le dispositif, sous réserve évidemment qu'elles demeurent franchissables dans les conditions de débit rencontrées en période de migration.

La plupart de ces rampes sont installées sur des cours d'eau d'importance limitée et des ouvrages de faibles hauteurs, inférieures à 1.50 m. En particulier l'installation d'une rampe se prête bien au traitement de la chute résiduelle résultant de l'arasement partiel d'un obstacle. C'est alors une alternative intéressante à l'installation d'un ou plusieurs prébarrages.

Les rampes installées sur de grand cours d'eau sont la plupart du temps à l'origine des seuils de stabilisation constituées le plus souvent d'enrochements jointifs. Leur pente varie de 5% à 10%. La rampe, absorbant tout le débit du cours d'eau, doit résister aux crues : il convient d'être très vigilant sur les problèmes de stabilité (voir annexe hydraulique). La marge de fonctionnement en terme de débit unitaire et donc de charge amont étant très limitée, on donne généralement une pente latérale à la rampe (un dévers inférieur à 5% pour éviter la convergence de l'écoulement) de sorte à offrir des conditions de vitesses et de hauteur d'eau les plus hétérogènes possible pour permettre :

- aux différentes espèces, pour un débit donné, de trouver des conditions acceptables de passage sur une partie du seuil,
- pour une espèce donnée, lorsque le débit varie, de trouver en permanence une zone de passage privilégiée sur le seuil.

Un certain nombre de seuils de stabilisation classiques construits dans les années 1980 à l'origine infranchissables ont évolué au cours du temps et sont devenus plus ou moins franchissables suite à l'abaissement de la pente de leur coursier consécutif à leur déstructuration, souvent due à l'affouillement de leur partie aval (figure 11).



Figure 11 : Ancien seuil de stabilisation sur les Usses

SEUIL DE LESCAR (GAVE DE PAU)

Caractéristiques du cours d'eau et de l'obstacle	Caractéristiques de l'aménagement
Cours d'eau : Gave de Pau Débit moyen : 72 m ³ /s Débit d'étiage : 15 m ³ /s Crue (10 ans) : 670 m ³ /s Chute : 1.5 m Largeur : 130 m Usage : seuil de stabilisation	Dispositif : seuil en enrochements jointifs et rivière de contournement en rive droite Pente du coursier du seuil : 10% Largeur : 100 m Longueur du coursier : de 12 m (RD) à 20 m (RG) Radier horizontal avec parafouille de 6 m de longueur Enrochements : de 1500 à 3000 Kg

Commentaires et illustrations

Ce dispositif a été dimensionné pour être fonctionnel pour les espèces diadromes et les cyprinidés rhéophiles pour des débits entre l'étiage et 150 m³/s. Le dévers latéral est de 0.75 m entre rive gauche (point haut) et rive droite (point bas). En rive droite de ce seuil "franchissable par conception" a été associée une rivière de contournement à faible pente (3%) de 66 m de longueur environ destinée au passage des petites espèces. Les vitesses sont réduites par 8 épis transversaux espacés de 8 m et par rugosité sur le fond.

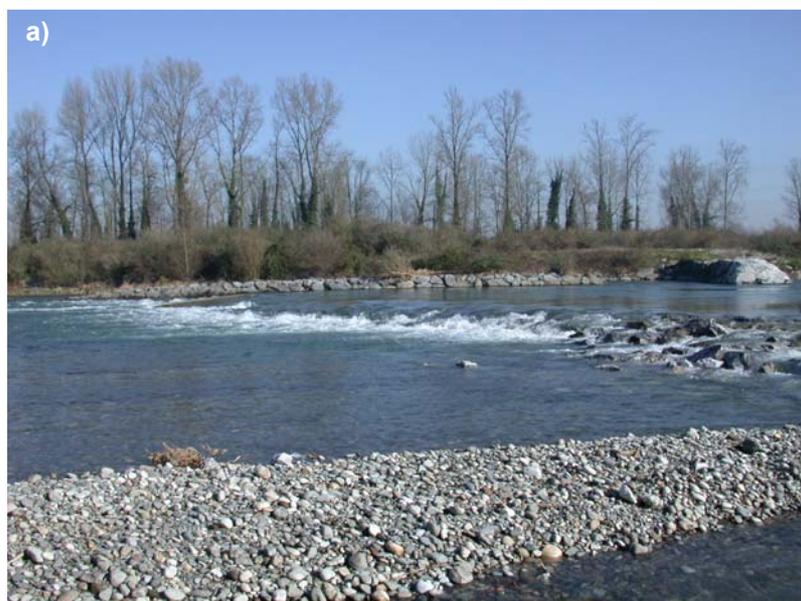


Figure 12 : Seuil en enrochements jointifs de Lescar, a) vue générale, b) vue de la partie basse, c) vue de la partie haute.

SEUIL SUR L'ILLER (ALLEMAGNE)

Caractéristiques du cours d'eau et de l'obstacle	Caractéristiques de l'aménagement
Cours d'eau : Iller Débit moyen : 70 m ³ /s Débit d'étiage : 11 m ³ /s Crue (10 ans) : 650 m ³ /s Chute : 2.83 m Largeur : 70 m Usage : seuil de stabilisation	Dispositif : enrochements jointifs de 1.50 m environ de hauteur Pente : 1/15 (6.7%) Largeur : 70 m Dévers de 0.50 entre les rives et la partie centrale Longueur de l'ouvrage : 140 m (dont coursier 55 m et bassin de dissipation et protection aval 90 m)

Commentaires et illustrations

Ce seuil de stabilisation a été rendu nécessaire suite à l'abaissement du lit de l'Iller consécutif à des prélèvements de matériaux pour la construction. Les enrochements formant le coursier sont bloqués par deux rangées de palplanches fichées dans le substratum.

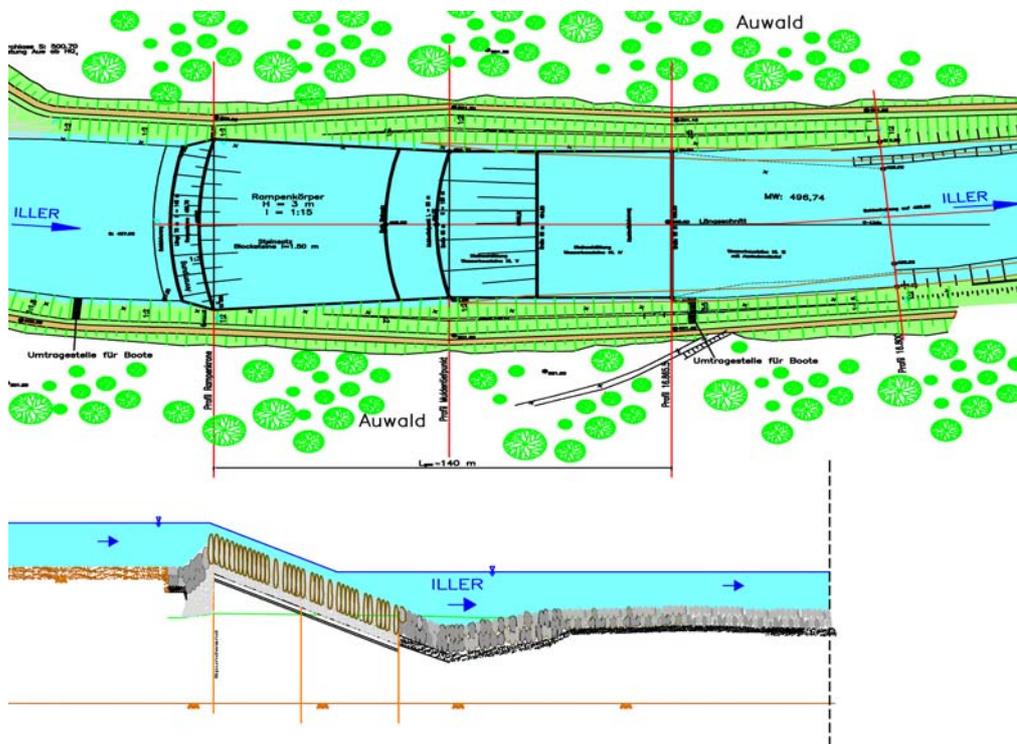


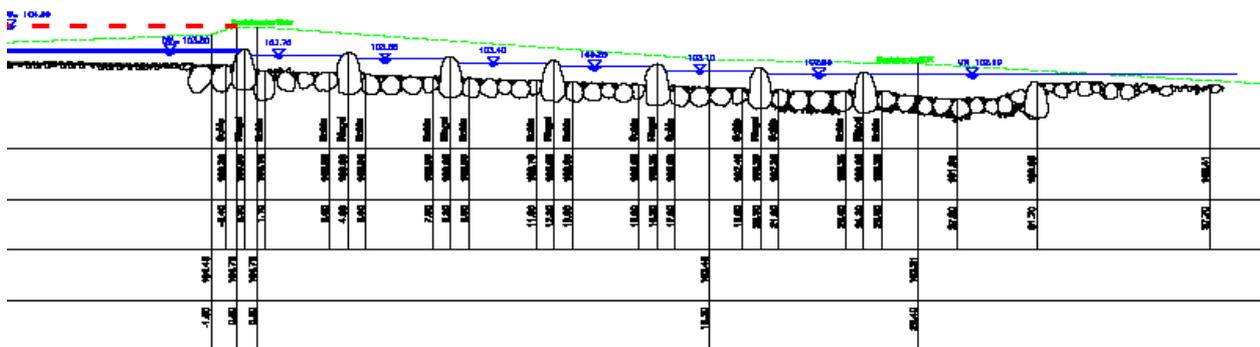
Figure 13 : Seuil en enrochements jointifs sur l'Iller.

RAMPE SUR L'ADR (ALLEMAGNE)

Caractéristiques du cours d'eau et de l'obstacle	Caractéristiques de l'aménagement
Cours d'eau : Ahr Débit moyen : 7 m ³ /s Débit d'étiage : 0.8 m ³ /s Débit maximum : 230 m ³ /s Chute : 1.90 m Largeur : 37 m Usage : aucun	Dispositif : rampe formée de plusieurs rangées de blocs Chute résiduelle: 0.90 m Pente : 3.75% Chute entre rangées de blocs : environ 15 cm Largeur : 20-37 m Longueur de l'ouvrage : environ 27 m

Commentaires et illustrations

Le principe de l'abaissement du seuil originel a été rendu possible et accepté par le fait qu'il n'avait plus aucun usage. Les études ont montré qu'il convenait cependant de limiter l'abaissement à 1 m. Le corps du seuil a été détruit et la chute résiduelle de 0.90 m a été transformée en une rampe constituée de 7 rangées de blocs régulièrement espacés. La partie centrale est légèrement plus basse afin de concentrer le débit d'étiage. En pied de rampe une fosse de dissipation de 1 m de profondeur a été aménagée.



5.2 Les rampes installées sur une partie d'un obstacle

Il est possible d'installer une rampe sur une partie seulement des ouvrages. Ces rampes sont généralement constituées d'enrochements régulièrement répartis ou disposés en rangées. Plus rarement on peut adopter des enrochements jointifs, lorsque la chute et les variations de niveau sont faibles. Il peut être opportun, comme pour les rampes installées sur toute la largeur du cours d'eau, d'adopter un dévers latéral. La largeur des rampes étant généralement limitée, un dévers latéral ne permet de prendre en compte que des variations de niveau réduites, de quelques dizaines de cm.

Plusieurs implantations sont possibles :

- le dispositif peut être installé à l'aval de l'obstacle, c'est l'implantation la plus aisée qui évite d'entailler trop profondément le barrage. Elle possède cependant l'inconvénient majeur que l'entrée se trouve déportée à une certaine distance à l'aval : les migrateurs arrivant au pied de l'obstacle peuvent éprouver des difficultés pour en trouver son entrée (rampe de Buisdorf sur la Sieg).
- le dispositif peut être installé en amont, son entrée étant située au niveau du pied de l'obstacle. C'est la configuration optimale du point de vue piscicole. Cela est possible lorsque le dispositif est construit en même temps que l'obstacle, mais devient plus difficile sur un ouvrage existant, cela nécessitant d'entailler très profondément la structure de l'obstacle (rampes installées au seuil de Toulouzette sur l'Adour et à Carennac sur la Dordogne).
- le dispositif peut être installé dans une configuration intermédiaire, une partie en aval, une partie en amont, c'est la configuration la plus fréquente.
- le dispositif peut prendre la forme d'un ou plusieurs prébarrages, la communication se faisant par des rampes rugueuses à pentes de l'ordre de 10% (seuils de Dampierre et de Belleville sur la Loire).



Figure 15 : Seuil de Dampierre sur la Loire équipé sur chaque rive de prébarrages constitués de rampes en enrochements jointifs

RAMPE EN ENROCHEMENTS DE CARENNAC (DORDOGNE)

Caractéristiques du cours d'eau et de l'obstacle	Caractéristiques de l'aménagement
Cours d'eau : Dordogne Débit moyen : 175 m ³ /s Débit d'étiage : 12 m ³ /s Crue (10 ans) : 980 m ³ /s Chute : 1.20 m (étiage) Largeur : 160 m Usage : ancienne chaussée remise en état pour l'alimentation d'un bief.	Dispositif : enrochements régulièrement répartis Pente longitudinale : 7.6% Largeur : 15 m Dévers latéral : 1/13. Longueur coursier : 17 m Blocs 0.7 m espacés de 2-2.50 m enchassés dans une dalle en béton. Débit de 4.5 (étiage) à 20 m ³ /s (200 m ³ /s en Dordogne).

Commentaires et illustrations

La chute est pratiquement noyée pour un débit en Dordogne de l'ordre de 200 m³/s. La pente adoptée est relativement forte et les conditions d'écoulement auraient été meilleures avec des blocs plus rapprochés (1.75-2.00 m au lieu de 2-2.50 m).



Figure 16 : Rampe en enrochements de Carennac (Dordogne)

RAMPE EN ENROCHEMENTS DE DATTENFELD (SIEG - ALLEMAGNE)

Caractéristiques du cours d'eau et de l'obstacle	Caractéristiques de l'aménagement
Cours d'eau : Sieg Largeur du seuil : 90 m Débit moyen : 21 m ³ /s Débit d'étiage : 3 m ³ /s Débit de crue (max) : 600 m ³ /s Chute : 1.8 m (étiage)	Dispositif : rampe en enrochements de 0.80 m de hauteur régulièrement espacés de 1.50 m enchassés dans un radier en béton. Pente longitudinale : 5% Largeur : 10 m Longueur coursier : 50 m

Commentaires et illustrations

La rampe a été construite entièrement à l'aval de l'obstacle et possède un léger dévers en direction de la rive pour faciliter le passage des petites espèces.

Les vitesses maximales mesurées sont de l'ordre de 1.5-2 m/s.

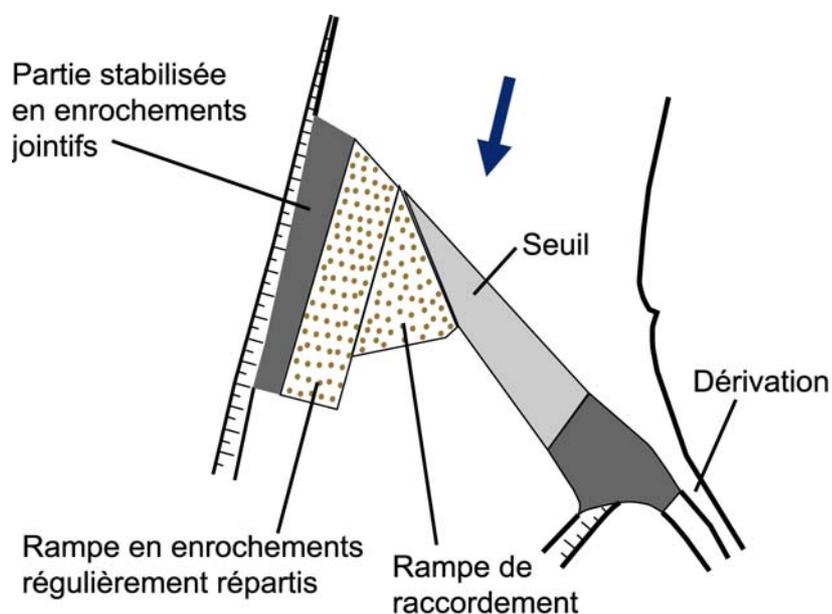
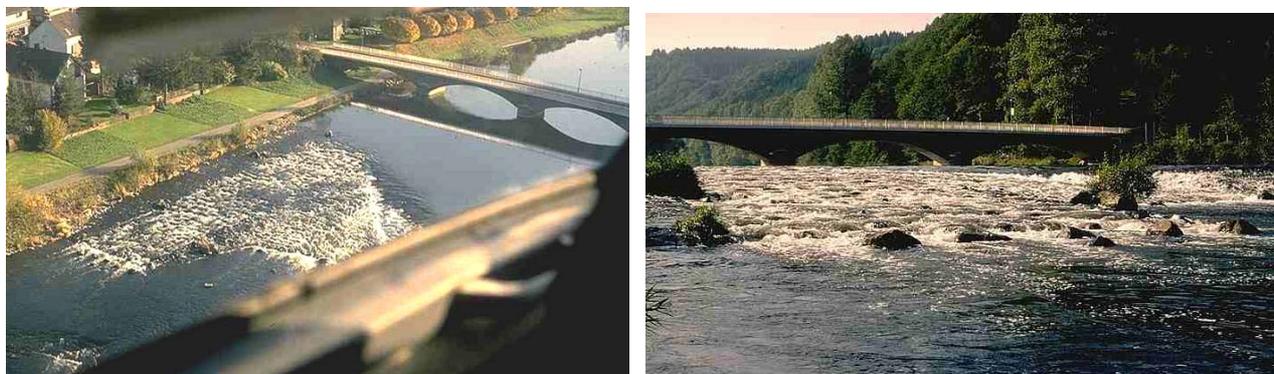


Figure 17 : Rampe en enrochements régulièrement répartis au seuil de Dattenfeld sur la Sieg

RAMPE EN ENROCHEMENTS DE BUISDORF (SIEG - ALLEMAGNE)**Caractéristiques du cours d'eau et de l'obstacle**

Cours d'eau : Sieg
 Débit moyen : 21 m³/s
 Débit d'étiage : 3 m³/s
 Débit de crue (max) : 600 m³/s
 Largeur du seuil : 100 m
 Chute : 2.65 m (étiage)

Caractéristiques de l'aménagement

Dispositif : enrochements régulièrement répartis enchassés dans un radier en béton
 Pente longitudinale : 5%
 Largeur : 15 m
 Longueur coursier : 65 m

Commentaires et illustrations

Comme les premières rampes construites sur la Sieg, l'ouvrage a été construit en aval du seuil pour éviter d'entailler celui-ci. Cependant l'observation a montré que certains migrateurs (en particulier le saumon) ne trouvaient pas l'entrée de la rampe située une soixantaine de mètres à l'aval du barrage. Une passe à fentes verticales a été récemment installée pour récupérer les poissons arrivant en pied de seuil par la rive droite et leur permettre de parvenir à l'amont de la rampe où a été installée une station de contrôle. L'installation de la station de contrôle a nécessité la mise en place d'une grille sur toute la largeur de la sortie de la rampe pour arrêter les migrateurs et les obliger à emprunter le canal les guidant vers le piège.



Figure 18 : Rampe en enrochements au seuil de Buisdorf sur la Sieg

RAMPE AU SEUIL DE TOULOUZETTE (ADOUR)

Caractéristiques du cours d'eau et de l'obstacle	Caractéristiques de l'aménagement
Cours d'eau : Adour Débit moyen : 65 m ³ /s Débit d'étiage : 8 m ³ /s Crue (10 ans) : 740 m ³ /s Chute : 1.20 (étiage) Largeur : 60 m Usage : seuil de stabilisation	Dispositif : rampe en blocs jointifs 500-4000 kg sur le fond, 100-1000 kg sur le côté. Pente longitudinale : 5% Largeur : 6 m Longueur coursier : 17 m Débit 4.5 - 20 m ³ /s.

Commentaires et illustrations

La rampe en enrochements jointifs a été construite en même temps que le seuil. Le pied de la rampe se trouve au niveau du seuil, son implantation est optimale. Une rangée de palplanches sépare la rampe de la rivière en amont.

Cet aménagement se révèle efficace pour l'espèce-cible, l'alose, aucune accumulation d'aloses n'ayant jamais été constatée à l'aval.

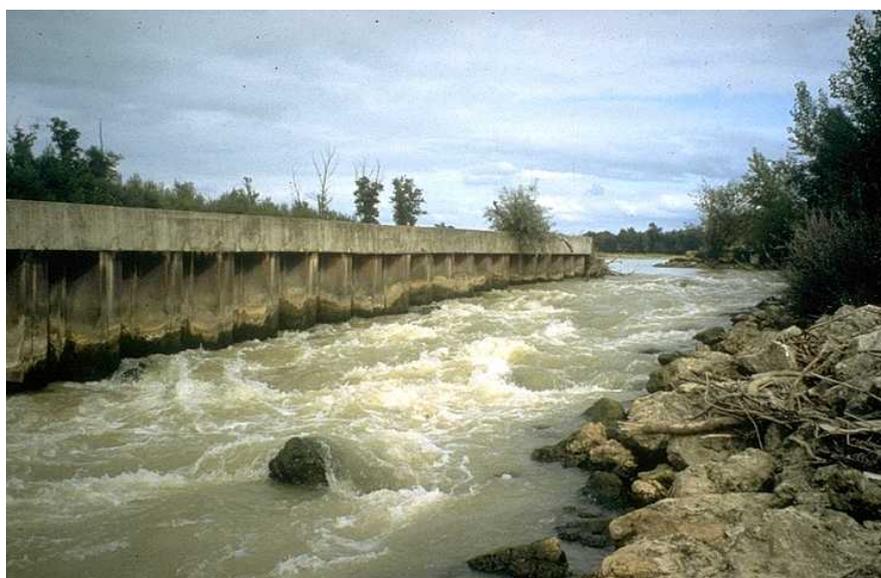
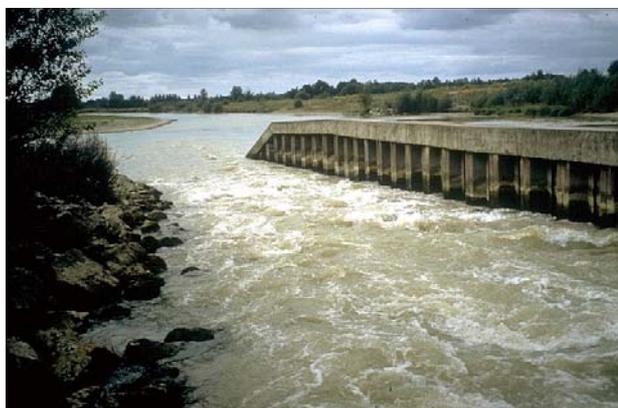


Figure 19 : Rampe en enrochements jointifs au seuil de Toulourette

RAMPE EN ENROCHEMENTS PERIODIQUES A KOLBSHEIM (BRUCHE)

Caractéristiques du cours d'eau et de l'obstacle	Caractéristiques de l'aménagement
Cours d'eau : Bruche Débit moyen : 8 m ³ /s Débit d'étiage : 0.5 m ³ /s Crue (10 ans) : 150 m ³ /s Chute : 1.40 m Largeur : 27 m Usage : aucun	Dispositif : rangées de blocs d'enrochements de 1.20-1.50 m de hauteur disposés à l'aval du seuil Pente longitudinale : environ 5.6% Largeur : environ 9 m Longueur coursier : 25 m

Commentaires et illustrations

La passe consiste en plusieurs rangées de blocs de 1.20-1.50 m de hauteur dont la crête est situé à 0.10 m en dessous du niveau d'eau à l'étiage, enfoncés sur la moitié de leur hauteur. Ces blocs sont fixés entre des blocs plus petits de 0.40-0.60 m regarnis avec du gros gravier 32-64 mm. Les gros blocs sont confortés avec des pieux d'ancrage fichés dans le lit contre leur face aval (longueur des pieux 2.5 m). L'ensemble de l'ouvrage est en enrochements libres, à l'exception des trois premières rangées de gros blocs à l'amont qui sont posés dans une couche de 50 cm de béton, des petits blocs de 15-25 cm enfoncés verticalement à moitié dans cette couche formant le fond de l'ouvrage.



Figure 20 : Rampe en enrochements périodiques à Kolbsheim : vue avant aménagement, vues depuis l'aval en étiage et en crue.

PREBARRAGE EN ENROCHEMENTS JOINTIFS AU SEUIL DE BELLEVILLE (LOIRE)

Caractéristiques du cours d'eau et de l'obstacle	Caractéristiques de l'aménagement
Cours d'eau : Loire Débit moyen : 329 m ³ /s Débit d'étiage : 35 m ³ /s Crue (10 ans) : 2700 m ³ /s Chute : de 1.15 m (60 m ³ /s) à 0.77 m (600 m ³ /s) Largeur : 100 m Usage : seuil de prise d'eau et de rejet de centrale nucléaire	Dispositif : rampe en enrochements jointifs Pente longitudinale : 10% Chute au niveau du prébarrage : de 0.83 m (étiage) à 0.35 m à 300 m ³ /s Chute résiduelle au seuil béton amont : 0.35-0.40 m. Largeur : 100 m Longueur coursier : 20 m

Commentaires et illustrations

Prébarrage constitué d'une rampe en enrochements installée en aval du seuil de rejet de la centrale nucléaire de Belleville sur la Loire afin de faciliter son franchissement.

Débit prébarrage de 58 m³/s (étiage) à 250 m³/s (600 m³/s en Loire).

Dévers de 1 m environ entre la partie centrale et les côtés.

Enrochements libres de 200-1200kg, sauf au raccordement en rive où ils sont bétonnés.

Rangée de palplanches de 3 m à l'amont fichées dans le lit de la Loire pour limiter la percolation (lit de la Loire sableux). Un géotextile posé sur le lit de la Loire joue le rôle de filtre entre le terrain naturel et les blocs.

Parmi les 15 ouvrages équipés de dispositif de franchissement sur l'axe Loire-Allier, l'ouvrage de Belleville sur Loire est celui qui génère le moins d'impact pour la remontée des saumons. Les poissons radio-pistés en 2006 ont franchi l'obstacle par la passe naturelle sans accuser de retard migratoire (temps de présence sur le site 10 min à 2 h).

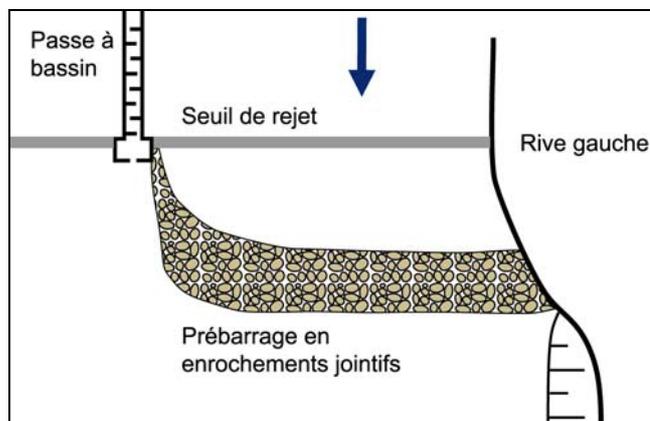


Figure 21 : Prébarrage en enrochements jointifs au seuil de Belleville (Loire)

5.3 Les rivières de contournement

Les rivières de contournement sont implantées en rive.

Si l'espace disponible n'est pas limité, la pente de tels ouvrages peut être très faible, de l'ordre de 1 à 2%. Il est alors possible de donner à l'ouvrage un aspect très naturel dans la mesure où l'on dispose de plus de liberté pour réduire les vitesses à des valeurs acceptables pour le poisson. On cherche alors à donner aux largeurs et profondeurs une certaine diversité.

Pour des pentes supérieures à 2%, il n'est généralement pas possible de maintenir dans les ouvrages des vitesses inférieures à 0.50-0.60 m/s. Leur longueur étant souvent importante, le poisson doit pouvoir trouver des zones de repos dans le dispositif. Dans ce cas, on utilise généralement des enrochements régulièrement répartis ou en rangées périodiques, ou encore des épis ou des seuils de faibles hauteurs générant des bassins.

Les rivières de contournement ne peuvent prendre en compte que des faibles variations du niveau amont. Etant donné leur largeur limitée, la mise en place d'un dévers latéral ne présente pas vraiment d'intérêt. Une régulation du débit est alors souvent nécessaire. Elle est généralement assurée

- soit par l'installation en amont de l'ouvrage d'une courte section de passe à fentes verticales comportant 3 à 6 fentes suivant l'importance des variations du niveau amont (ou l'installation de blocs très hauts au comportement similaire),

- soit en installant une section de régulation à l'amont (vanne, clapet, aiguilles), tout en veillant que ces dispositifs n'induisent pas localement des chutes ou des mises en vitesses infranchissables par les poissons.

Si le débit dans l'ouvrage ne varie que très peu (peu de variation du niveau amont ou section de régulation amont), la stabilisation du lit et des berges peut se faire avec des gros galets ou des petits blocs placés sur une couche de gravier ou un géotextile, le lit prenant un aspect naturel. Par contre, si le débit dans l'ouvrage subit de fortes variations (fluctuations du niveau amont sans organe de régulation amont), il convient, comme pour les rampes, de veiller à la stabilité de l'ouvrage.

Comme pour tout dispositif de franchissement, il faut positionner l'entrée de la rivière le plus à l'amont possible, à proximité immédiate du pied de l'obstacle. Compte tenu de la faiblesse de la pente, il peut s'avérer quelquefois difficile d'implanter l'entrée au pied de l'obstacle, celle-ci devant être reportée plus en aval ; ceci peut limiter significativement son efficacité.



Figure 22 : Rivière de contournement au seuil de Beauregard sur la Garonne en étiage et en hautes eaux

RIVIERE DE CONTOURNEMENT DU BRAS DES ARMENIERS (RHONE)

Caractéristiques du cours d'eau et de l'obstacle	Caractéristiques de l'aménagement
Cours d'eau : bras secondaire du Rhône Débits : peu connus, de l'ordre de 2-10 m ³ /s Chute : 2.50 m Largeur : 100 m Usage : seuil de maintien des niveaux d'eau dans le bras suite à l'aménagement du barrage de Sauveterre sur le Rhône.	Dispositif : Seuils avec échancrures semi-triangulaires 11 bassins de 8 m de longueur Chutes de 0.22 m entre bassins Pente longitudinale : 2.7% Largeur : environ 5.5 m Longueur rivière : 100 m Débit 0.55-1.4 m ³ /s

Commentaires et illustrations

Seuils semi-triangulaires de 1.65 m de largeur en enrochements percolés (pente latérale 0.20 m/ 1.65 m)

Section trapézoïdale (2H/1V), plafond 1 m.

Tirant d'eau : environ 1 m.

Puissance dissipée volumique : environ 40-150 watts/m³.

Le réglage du débit dans l'ouvrage est rendu possible par la mise en place d'aiguilles verticales.

Des pêches effectuées dans les différents bassins ont permis la capture de 23 espèces différentes.



Figure 23 : Rivière de contournement du Bras des Arméniers

RIVIERE DE CONTOURNEMENT DE BIRON (GAVE DE PAU)

Caractéristiques du cours d'eau et de l'obstacle

Cours d'eau : Gave de Pau
 Débit moyen : 82 m³/s
 Débit d'étiage : 18 m³/s
 Crue (10 ans) : 730 m³/s
 Chute : 5.20 m
 Largeur : 120 m
 Usage : hydroélectricité
 Débit turbiné : 110 m³/s

Caractéristiques de l'aménagement

Dispositif : Seuil et épis plus ou moins régulièrement disposés
 Pente moyenne : 2%
 Largeur : 8-10 m
 Longueur rivière : 255 m
 Débit = 4-5 m³/s

Commentaires et illustrations

Le débit dans passe est constant, la régulation du niveau amont se faisant par des clapets au barrage. Le réglage du débit dans l'ouvrage peut se faire par la mise en place de batardeaux. Si la pente moyenne est de 2%, elle n'est pas régulière tout au long de la rivière : les parties amont et aval ont des pentes plus prononcées (de l'ordre de 4-5%), alors que la partie intermédiaire a une pente de l'ordre de 1%. Cette rivière se révèle très efficace pour le saumon, une étude radiopistage ayant montré que tous les individus la franchissaient très rapidement (généralement avec des retards de l'ordre de quelques heures). Ce dispositif est un dispositif mixte passe à poissons parcours d'eau vive pour le canoë-kayak.



Figure 24 : Rivière de contournement de Biron : sortie, entrée, vue de l'amont, vue à sec.

RIVIERE DE CONTOURNEMENT DE CHATILLON SUR LISON (LOUE)

Caractéristiques du cours d'eau et de l'obstacle	Caractéristiques de l'aménagement
Cours d'eau : Loue Débit moyen : 50 m ³ /s Débit d'étiage : 6 m ³ /s Crue : 520 m ³ /s Chute : 2.85 m Largeur : 120 m Usage : hydroélectricité Débit turbiné : 16 m ³ /s	Dispositif : Seuil-épis avec échancrures Chutes entre seuils : 0.20 m environ Pente longitudinale : 3.5% Largeur : 3-6 m Longueur rivière : 80 m Débit environ 1.2 m ³ /s

Commentaires et illustrations

Les seuils ont une hauteur de 0.50 m par rapport au radier général et une largeur de 1.40 à la base, la position des échancrures alternant d'un bassin à l'autre. Les seuils sont espacés de 5.5 m environ.

Puissance dissipée: 100-150 watts/m³.

Le débit dans passe peut être régulé grâce à trois séries d'échancrures batardables dans un bassin à en béton situé à l'amont.

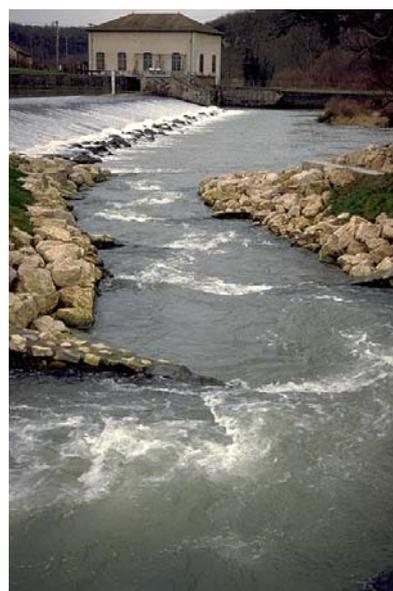
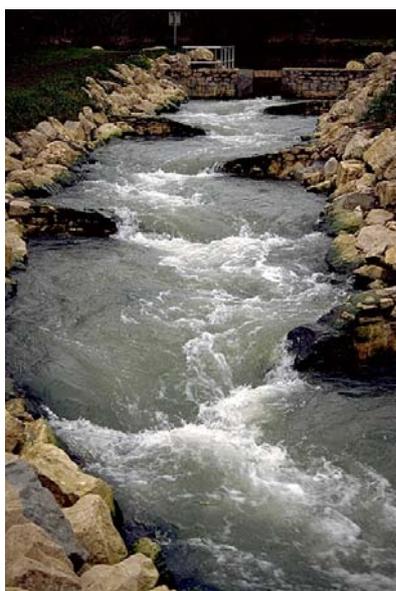


Figure 25 : Rivière de contournement de Chatillon sur Lison (Loue) : vue générale, vue vers l'amont, vue vers l'aval.

RIVIERE DE CONTOURNEMENT DU LAC DES GAVES (GAVE DE PAU)

Caractéristiques du cours d'eau et de l'obstacle	Caractéristiques de l'aménagement
Cours d'eau : Gave de Pau Débit moyen : 30 m ³ /s Débit d'étiage : 8 m ³ /s Crue : 200 m ³ /s Chute totale : 16 m (chute amont 11.70 m, aval 4.30 m) Largeur : 80 m Usage : hydroélectricité Débit turbiné : centrale amont 39 m ³ /s, centrale aval 35 m ³ /s	Dispositif : rivière de contournement Longueur rivière : 1700 m Débit de 1.5 m ³ /s (sur les 1470 m amont) à 4 m ³ /s (sur les 240 m aval) Pente longitudinale globale : 0.94% Pente du fond du chenal : 0.58 % Largeur : partie amont 1.20m à la base, 3.50 m environ au niveau de la surface libre (fruit des berges 3/2) Partie aval 2.80 m à la base, 5.1 m au niveau de la surface libre.

Commentaires et illustrations

Deux centrales ont été installées au niveau de deux seuils de stabilisation rendus nécessaires suite à des extractions massives de matériaux alluvionnaires dans le lit du cours d'eau. La rivière de contournement court-circuite les deux seuils. Au débit de 1.5 m³/s vient s'ajouter un débit d'appoint de 2.5 m³/s provenant du plan d'eau après dissipation de son énergie. Ce dispositif peut permettre le passage des canoës-kayaks. L'énergie est dissipée à la fois au niveau de 27 chutes locales d'une trentaine de cm de hauteur plus ou moins régulièrement espacées et par rugosité le long du canal. Le lit de la rivière est constitué à partir de la partie la plus grossière des matériaux constituant le lit du Gave. Un clapet de 3 m de hauteur situé à l'amont permet de réguler et de limiter de débit dans l'ouvrage. Une petite passe à bassins située à la sortie de la rivière (partie amont) permet au migrateur de franchir le clapet quand celui-ci est en position partiellement relevée. De très nombreuses frayères de truites sont recensées chaque année dans le lit de la rivière de contournement.

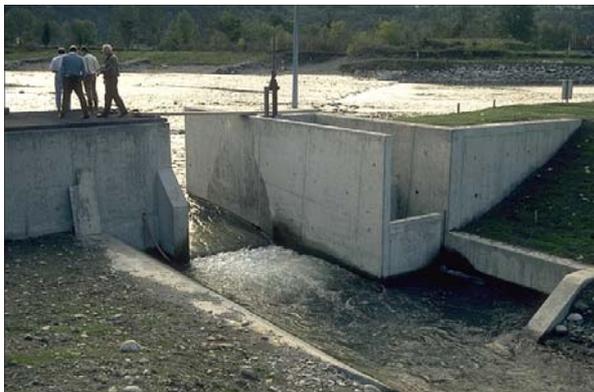


Figure 26 : Rivière de contournement du Lac des Gaves (Gave de Pau) : vue générale, vue de la rivière, vue du clapet amont et de la passe à bassins, vue de l'entrée au niveau de la centrale aval.

RIVIERE DE CONTOURNEMENT SUR L'AARE (SUISSE)

Caractéristiques du cours d'eau et de l'obstacle

Cours d'eau : Aare
 Débit moyen : 122 m³/s
 Etiage 43 m³/s
 Crue : 520 m³/s
 Chute : 2.8 m
 Usage : hydroélectricité

Caractéristiques de l'aménagement

Dispositif : 14 rangées de blocs
 Pente longitudinale : 7.14%
 Largeur : 2.5 - 4.5 m
 Profondeur : 0.80 - 1.00 m
 Longueur rivière : 38 m
 Débit : 0.7 m³/s

Commentaires et illustrations

La rivière de contournement consiste en une succession de rangées de blocs parallélépipédiques créant une pseudo-passe à fentes verticales. Elle est installée dans l'angle amont d'un déversoir d'une centaine de mètres de longueur. L'hydraulique est très proche de celle d'une passe à fentes verticales classique. La chute entre bassins est de l'ordre de 0.20 m.



Figure 27 : Rivière de contournement sur l'Aare (Suisse)

5.4 Entretien des ouvrages

Les passes naturelles, comme tous les autres types de passes, demandent un entretien régulier, en particulier après chaque crue. La formation d'embâcles ou l'engrèvement peuvent se traduire par un colmatage de la prise d'eau et une mauvaise alimentation en eau de l'ouvrage. Des arbres, des branches ou de la végétation aquatique peuvent se déposer lors des crues sur le coursier de l'ouvrage et peuvent induire, suite au colmatage d'une partie des passages entre blocs, des singularités hydrauliques (chute, ressaut) entravant le passage des poissons. A cet égard les rampes en blocs jointifs sont beaucoup moins sujettes à de tels colmatages. Concernant les dispositifs à blocs isolés (régulièrement répartis ou en rangées), lorsque l'ouvrage n'est pas protégé au niveau de sa prise d'eau, les blocs doivent être rapidement submergés lors des crues pour éviter de retenir trop longtemps les corps flottants et favoriser les embâcles. Si les rivières de contournement ne posent généralement pas de problèmes d'entretien, de par leur position en rive et leur faible largeur facilitant leur protection et leur accès, il en est tout autrement pour les rampes de largeurs importantes : il n'est pas facile de les protéger et leur entretien peut s'avérer quelque fois « sportif » voire dangereux.



Figure 28 : Exemple d'embâcles au sein de dispositifs.

6 DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

L'expérience concernant les techniques constructives des passes rustiques montre qu'il est important de respecter certaines règles afin d'assurer une bonne stabilité et un fonctionnement optimum de l'ouvrage.

6.1 Qualité des enrochements

Comme pour tous les ouvrages en rivières, il convient d'utiliser une pierre propre, dure, non gélive, résistante à l'eau et aux agressions extérieures et de bonne qualité apparente (sans zone friable ou altérée). Les enrochements devront notamment satisfaire aux exigences en termes de masse volumique, de résistance à l'usure (coefficient Micro Deval), de résistance à l'abrasion (coefficient Los Angeles), de résistance à la compression de fragmentation dynamique et de coefficient de polissage accéléré, précisées dans le CCTP.

6.2 Les rampes en enrochements jointifs

La rampe est construite en enrochements dont le diamètre équivalent médian peut varier de 0.50 m à plus d'un mètre (de 200 kg à plus d'une tonne). Ils doivent être choisis de forme tétraédrique, avec des angles marqués. Les enrochements de forme plus défavorables (cubique ou plaques) sont à éviter. D'un point de vue piscicole, il est préférable pour une masse donnée de les choisir de forme allongée (hauteur de 0.60 m à plus de 1.20 m) et de les poser verticalement. Il convient alors de spécifier les rapports longueur/largeur minimal et maximal.

La courbe granulométrique des enrochements doit être relativement uniforme et sans lacune, afin d'éviter les « poches » de petits blocs et l'isolement des plus gros blocs.

La dimension minimale des blocs assurant la stabilité de la rampe est fonction de la pente et du débit unitaire maximal en crue. Elle augmente avec le débit unitaire maximal sur la rampe et diminue avec la pente. On adoptera le critère de stabilité donné par Whittaker et Jäggi. (1986, voir annexe hydraulique).

D'un point de vue piscicole, la réduction de la pente de la rampe a un double bénéfice : réduction des vitesses pour un débit unitaire donné, et réduction de la dimension des blocs améliorant les conditions d'écoulement dans la lame d'eau.

Les enrochements constituant le corps de la rampe sont posés sur un filtre, généralement une couche de matériaux de dimensions intermédiaires entre la taille des blocs de la rampe et celle du substrat constitutif du lit, ou un géotextile. On utilisera les critères classiques de dimensionnement des filtres (voir annexe hydraulique). Dans le cas de la mise en place d'un géotextile, il est préférable de disposer entre ce géotextile et les blocs une couche de matériaux tampon pour encaisser les différences de taille des blocs (galets de diamètre de l'ordre de 50-100 mm, voire plus, épaisseur fonction de la taille des blocs, de l'ordre de 30-50 cm).

Ce type de structure relativement rigide est susceptible de résister à des contraintes hydrauliques sévères. Il convient cependant d'assurer le blocage des enrochements aval dont le départ peut déstructurer le seuil. Ce blocage peut être assuré par une rangée de palplanches, de pieux ou de rails, ou encore par un radier horizontal d'une longueur suffisante situé sous le niveau d'étiage jouant le rôle de parafouille.

Pour une meilleure tenue contre les impacts des corps dérivants en crue et aussi pour pouvoir contrôler de manière plus précise les débits sur les différentes parties du seuil (voir annexe hydraulique) et éviter qu'une trop grosse partie de l'écoulement ne filtre entre les enrochements, les enrochements sur la crête du seuil pourront être percolés au béton ou enfoncés dans une couche de béton d'une cinquantaine de cm d'épaisseur, ou bien encore une rangée de palplanches sera battue en amont. Il arrive en effet que le débit d'étiage s'écoule en grande partie voire en totalité en sub-surface, et les rampes sont d'autant plus exposées à ce phénomène que leur pente est importante et que le débit d'étiage est faible.

Les matériaux transportés par le cours d'eau sont susceptibles le plus souvent de combler les interstices entre les enrochements, ce qui limite de débit d'infiltration. Cependant, si les matériaux transportés sont trop fins, les vides entre blocs ne se colmateront pas et la rampe

pourra devenir de plus en plus poreuse avec le temps. Il convient lorsque cette situation est à craindre de faire reposer les blocs sur une couche filtrante bloquant les matériaux transportés par le cours d'eau. Ce filtre peut être assuré par un géotextile ou une couche de matériaux filtrant (voir annexe hydraulique).

A l'amont de la crête des rampes, il est préférable de mettre en place une contre-pente (10 %) de façon à fixer la position de la section critique au voisinage de la rupture de pente et à limiter les vitesses en amont de cette rupture à des valeurs acceptables pour les migrateurs.

Le profil transversal de la crête ne doit en aucun cas être horizontal. Il convient de lui donner une pente (limitée à 5% pour minimiser la convergence de l'écoulement) de façon que le poisson dispose toujours, dans la gamme des conditions de niveaux amont en période de migration, d'une zone dans laquelle le débit unitaire est acceptable pour permettre son franchissement.

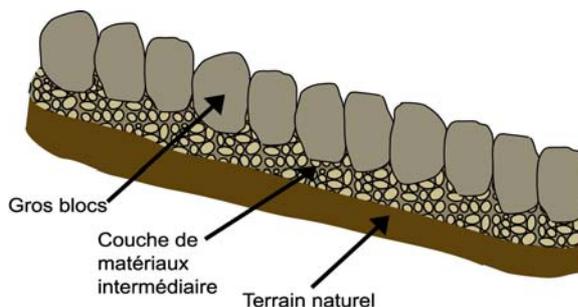


Figure 29 : Organisation des couches de matériaux pour une rampe en enrochements jointifs.

6.3 Les ouvrages à blocs isolés

Les **blocs isolés**, régulièrement répartis ou en rangées, devront présenter une forme allongée de sorte qu'ils puissent être **ancrés sur une profondeur entre 0.5 à 1 fois leur hauteur utile, soit entre 0.3 et 0.5 fois leur hauteur totale**. Cette forme permet une bonne dissipation de l'énergie. On précisera donc bien le poids et les dimensions des blocs avec la précision souhaitée, afin d'obtenir un ensemble de blocs homogène. On peut exiger une précision sur les dimensions jusqu'à +/- 0.10 m. Face à la difficulté de se procurer des gros blocs de même taille, l'utilisation de blocs préfabriqués peut être une solution intéressante.

Les gros blocs devront être posés debout un par un, en respectant la concentration ou l'espacement définis dans le projet conformément et suivant les instructions du conducteur de travaux. Les blocs seront déposés à l'aide d'un grappin ou d'un câble en acier. A cet effet, on pourra percer les blocs et placer des ancrages facilitant leur manipulation et leur mise en place. Après le terrassement du terrain brut, il convient comme pour les rampes de disposer une première couche de matériaux permettant d'assurer la fonction de filtre et une meilleure continuité mécanique entre l'ouvrage et le terrain naturel. Cela permet également d'y ficher les gros blocs, donnant alors la possibilité d'harmoniser leurs hauteurs en les enfonçant plus ou moins. La pose éventuelle d'un géotextile entre le terrain naturel et la couche permet de limiter les infiltrations d'eau et d'éviter la migration des particules fines (sables et gravier) constitutives du terrain naturel. Sur cette première couche sont déposés les « petits » blocs (par opposition aux plus gros), posés debout un par un. Ces blocs sont là pour ancrer et stabiliser les gros blocs et constituent le fond de la passe. Leurs dimensions sont fonction de l'ancrage souhaité des gros blocs (généralement entre 0.3 et 0.6 m) et des contraintes de stabilité en crue. Leur stabilité est évaluée à l'aide du critère de Whittaker et Jäggi (1986, voir annexe hydraulique). Une couche de galets peut en dernier lieu être déposée afin de combler les interstices entre les petits blocs, tout en conservant une rugosité de fond importante.

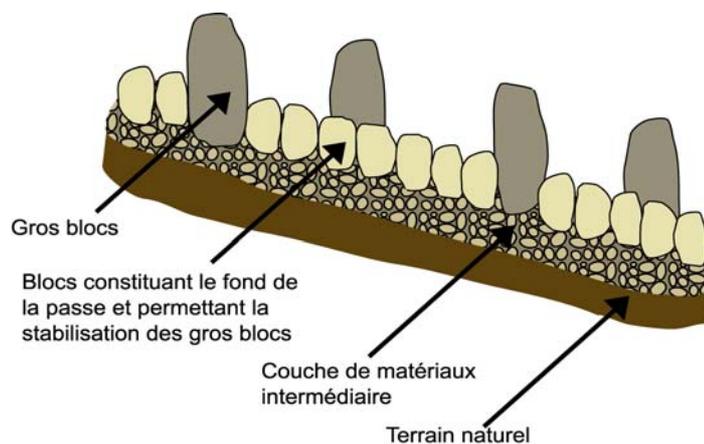


Figure 30 : Organisation des couches de matériaux dans les ouvrages à blocs isolés.

L'ancrage des gros blocs préconisé assure en principe leur stabilité, sans nécessiter de jointoiment. Les premiers blocs sur la crête d'un ouvrage étant les plus vulnérables au basculement, étant donné qu'ils sont les plus susceptibles d'être percutés par les corps dérivants, leur jointoiment est préconisé. Le jointoiment d'un bloc doit permettre de le rendre solidaire notamment avec les petits blocs situés juste à l'aval. S'il est envisagé de jointoyer chaque gros bloc, dans le cas de crues très violentes par exemple, il n'est pas conseillé de jointoyer l'ouvrage sur toute sa surface pour éviter l'exercice de sous-pressions et lui conserver une certaine souplesse permettant de s'adapter à d'éventuels affaissements ou tassements. Il est possible aussi de bloquer les gros blocs avec des pieux d'ancrage métalliques de 4-5 cm de diamètre enfoncés de 2-3 m dans le substratum.



Figure 31 : Mise en place de pieux métalliques pour stabiliser les blocs.

Dans le cas d'enrochements en rangées périodiques, la construction des seuils entre les gros blocs fait généralement appel à un jointoiment pour d'une part éviter qu'une part trop importante de débit ne filtre à travers les enrochements et d'autre part assurer leur stabilité.

La stabilité des ouvrages est également très dépendante de la qualité des travaux lors de la réalisation et tout particulièrement lors de la pose des blocs (homogénéité de la taille des blocs, mise en place bien compacte, protection contre l'affouillement aval, ...).

Pour les enrochements régulièrement répartis, dans le cas de tirants d'eau insuffisants pendant l'étiage, la constitution de cordons de raccordement entre les gros blocs permet de resserrer l'écoulement et ainsi d'augmenter localement la hauteur d'eau en aval des blocs. Ces cordons peuvent être constitués par l'agencement de petits blocs consolidés par une matrice en béton.

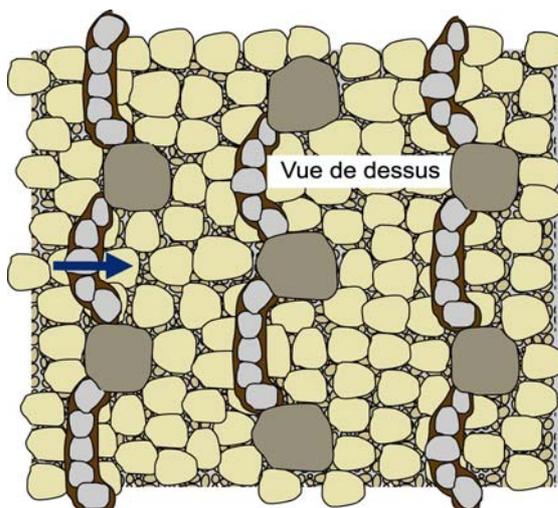


Figure 32 : Disposition de cordons de raccordement entre les gros blocs régulièrement répartis.

Lorsque la passe est située en berge du cours d'eau, l'apport de terre végétale sur les talus de raccordement au terrain naturel ainsi que l'utilisation des techniques de végétalisation (fascine, bouture...) permettent une meilleure intégration de l'ouvrage au site tout en assurant une stabilisation en période de crue. La végétalisation se fera à partir de la cote correspondant au débit médian.

6.4 Dispositions particulières de chantier

Comme pour tous les travaux en rivière, la mise en place de batardeaux et l'utilisation de pompes sont souvent de rigueur. Lorsque le terrain est instable, il peut être nécessaire d'utiliser des structures de renforcement du sol et de l'ouvrage : pieux, palplanches, armature acier, ou béton armé. Les travaux sur des petits cours d'eau peuvent se dérouler « en eau » mais seulement à l'étiage. Cela permet de limiter les coûts et s'assurer du fonctionnement correct du dispositif pour de faibles débits.

Le chantier se situant dans le lit du cours d'eau est particulièrement exposé aux risques d'inondation. Il convient donc de prendre les mesures nécessaires à la protection du chantier et des tranches déjà terminées en cas de montée des eaux. Il convient de garantir l'exécution des travaux jusqu'à un débit prédéfini.

Les travaux devront être exécutés en évitant toute forme de pollution, dans et près de la rivière par les travaux de fouille et de creusement.

6.5 Coût des passes « naturelles »

En France, une première évaluation sur un nombre encore restreint d'ouvrage indique que le coût des rivières de contournement rapporté au débit maximum à faire transiter et à la chute à rattraper est compris entre 50 et 150 k€ par m³/s et par m de chute. Il n'existe pas encore de statistiques sur les coûts pour les rampes sur tout ou partie d'un obstacle.

Redeker (2006) présente à partir des réalisations plus nombreuses en Allemagne des fourchettes sur les coûts par unité de surface :

- de 75 à 325 €/m² pour les rampes sur tout ou partie d'un obstacle.
- de 250 à 525 €/m² pour les rivières de contournement.

Le coût des passes « naturelles » se révèle très variable selon les conditions particulières d'implantation sur chaque site : accessibilité, nature et état de l'obstacle, mise en oeuvre d'une phase de démolition plus ou moins importante, contraintes sécuritaires... Il est, comme pour les autres types de passes, généralement plus faible lorsque le dispositif de franchissement est intégré à la construction ou la réfection d'un obstacle.

7 BIBLIOGRAPHIE

- Beach, M.H. 1984. Fish pass design. Criteria for the design and approval of fish passes and other structures to facilitate the passage of migratory fishes in rivers. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, Lowestoft, Fish. Res. Tech. Rep. 78, 45 p.
- Clough, S.C. and Turnpenny, A.W.H. 2001 Swimming Speeds in Fish : Phase 1, Environment Agency, 94 p
- DVWK 2002. Fish Passes Design, Dimensions and Monitoring. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 118 p
- Gebler, R.J.1991. Sohlrampen und Fischaufstiege. Wasserbau und Umwelt 145p.
- Gebler, R.J. 1998. Examples of Near-natural Fish Passes in Germany : Drop Structure Conversions, Fish Ramps and Bypass Channels. In Fish migration and fish bypasses (eds M; Jungwirth, S. Schmutz and S. Weiss). Fishing News Books, Blackwell Science Ltd Publisher, 403- 419
- Gomes P., Vighetti S., Larinier M., 2005. Etude pour la conception de passes à poissons adaptées à l'Apron. Rapport GHAAPPE RA05.05, 45 p.
- Larinier, M., Travade F., Porcher J.P., Gosset, 1994. Passes à poissons : expertise, conception des ouvrages de franchissement. Collection Mise au point Conseil Supérieur de la pêche, 336 p.
- Larinier, M., Travade F., Porcher J.P., 2002. Fishways biological basis, design criteria and monitoring. Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture, 364, 207 p.
- Larinier, M., Chorda, J., Ferlin, O., 1995. Le franchissement des seuils en enrochements par les poissons migrateurs, rapport GHAAPPE-IMFT, 25 p.
- LUBW, 2006. Durchgängigkeit für Tiere in Fliesgewässern. Baden-Württemberg, ISBN 3-88251-304-7, 247p.
- Parasiewicz, P., Eberstaller, J., Weiss, S. and Schmutz, S. 1998 Conceptual Guidelines for Nature-like Bypass Channels, In Fish migration and fish bypasses (eds M; Jungwirth, S. Schmutz and S. Weiss). Fishing News Books, Blackwell Science Ltd Publisher, 348-362.
- Peterson D.F., Mohanty P., 1960. Flume studies of flow in steep, rough channels. Proc. ASCE, Journal of Hydraulics Division, 86 (HY9) :55-76.
- Puertas J, Pena L., Teijeiro T., 2004. Experimental approach to the hydraulics of vertical slot fishways. Journal of Hydraulic Engineering vol.130 n°1, 10-23.
- Redeker M, 2006. Provision of upstream fish passage by means of nature-like fish passes. EIFAC Symposium on hydropower, flood control and water abstraction : implication for fish and fisheries, Mondsee, Austria.
- Tarrade L, Texier A., David L., Pineau G., Larinier M., 2006. An experimental study of turbulent flow in vertical slot fishways. EIFAC Symposium on Hydropower, Flood Control and Water Abstraction: Implications for Fish and Fisheries, Mondsee, Juin 2006.
- Videler, J.J. 1993 "Fish Swimming" Chapman & Hall, 260 p
- Wildman, L., Parasiewicz, P., Katopodis, C. and Dumont, U., 2000. An Illustrative Handbook on Nature-Like Fishways - Summarized Version, ASCE, 20 p.
- Whittaker, J, Jäggi M., 1986. Blockschwellen, Zürich, Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, 91.
- Yang CT, 1984. Unit Stream power Equation for Gravel, J. Hyd. Div. ASCE, 110 (HY 12) : 1783-1798.
- Yang CT., 1996. Sediment Transport : Theory and Practice. McGraw-Hill, New York.

ANNEXE HYDRAULIQUE

TABLE DES MATIERES

1	Les enrochements régulièrement répartis.....	51
1.1	Variables, schémas et notations	51
1.2	Variables adimensionnelles.....	51
1.3	Définition de la concentration	52
1.4	Relation entre la hauteur d'eau et le débit unitaire.....	52
1.5	Vitesse débitante	53
1.6	Relation entre la hauteur d'eau et la vitesse maximale.....	53
1.7	Comparaison entre vitesse maximale et débitante	54
1.8	Puissance dissipée volumique	54
1.9	Comparaison entre les enrochements à face plane et arrondie	54
1.10	Abaques	54
1.11	55
2	Les enrochements en rangées périodiques	57
2.1	Variables, schémas et notations	57
2.2	Porosité θ des rangées de blocs	57
2.3	Chute au niveau des rangées	57
2.4	Relation entre la charge sur le seuil et le débit à travers les rangées d'enrochements.....	57
2.5	Vitesse maximale dans les jets	58
2.6	Puissance dissipée volumique dans les bassins	59
2.7	Condition de non formation d'un ressaut prononcé	59
3	les enrochements jointifs.....	60
3.1	Variables, schémas et notations	60
3.2	Diamètre équivalent et courbe granulométrique des enrochements	60
3.3	Relation entre la charge amont sur la crête et le débit.....	60
3.4	Relation entre la hauteur d'eau, la vitesse débitante et le débit en régime uniforme	61
4	Stabilité des enrochements.....	63
4.1	Notations	63
4.2	Stabilité des blocs isolés	63
4.3	Stabilité des enrochements	64
5	Conditions de filtre entre les alluvions et les couches d'enrochements.....	65
6	Bibliographie.....	66

LISTE DES FIGURES

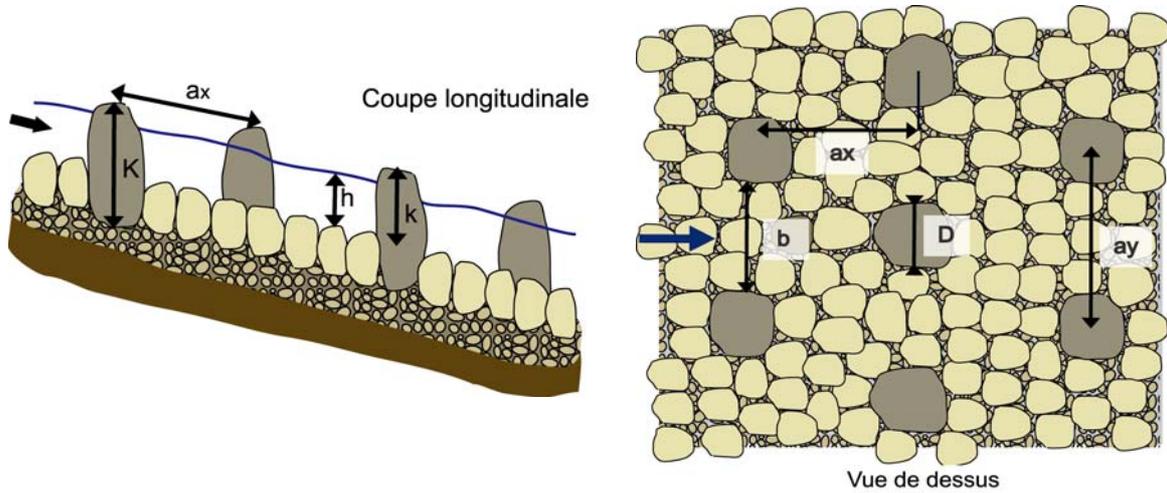
Figure A 1 : Correction à appliquer sur la vitesse maximale en fonction de la concentration en enrochements.....	53
Figure A 2 : Abaque donnant q ($m^3/s/m$), v_{max} (m/s), $Vdeb_{max}$ (m/s) et Pv (W/m^3) en fonction de h (m) et de I pour des enrochements régulièrement répartis à face arrondie à une concentration de 0.13 et $D = 0.5$ m.....	55
Figure A 3: Abaque donnant q ($m^3/s/m$), v_{max} (m/s), $Vdeb_{max}$ (m/s) et Pv (W/m^3) en fonction de h (m) et de I pour des enrochements régulièrement répartis à face plane à une concentration de 0.13 et $D = 0.5$ m.....	56
Figure A 4: Evolution du coefficient de noyage en fonction de la chute Δh et de la charge sur le seuil h_s	58
Figure A 5: Relation entre la charge amont sur la crête et le débit unitaire (coefficient de débit égal à 0.37).....	61
Figure A 6: Relation entre le débit unitaire et la hauteur d'eau pour différentes pentes de coursier ($D_{65} = 1$ m et $a = 18$)......	62
Figure A 7: Relation entre la vitesse débitante et la hauteur d'eau pour différentes pentes de coursier ($D_{65} = 1$ m et $a = 18$)......	62
Figure A 8: Forces exercées par l'écoulement et la gravité sur un bloc isolé.....	63
Figure A 9: Limite de stabilité des enrochements en fonction du D_{65} et de la pente selon la formule originale de Wittaker et Jäggi (1986).	64

LISTE DES TABLEAUX

Tableau A 1: Correspondance entre masse de l'enrochement et diamètre équivalent.	60
---	----

1 LES ENROCHEMENTS REGULIEREMENT REPARTIS

1.1 Variables, schémas et notations



- ax** : espacement longitudinal entre blocs, d'axe à axe (m).
ay : espacement latéral entre blocs, d'axe à axe (m).
b : largeur de passage libre entre les blocs (m).
D : largeur face à l'écoulement des blocs (m).
K : hauteur totale du bloc (m).
k : hauteur utile des blocs (m).
C : concentration des blocs.
l : pente du coursier.
h : hauteur d'eau (m).
Vdeb : vitesse débitante dans les sections « libres » (calculée) (m/s).
Vdeb_{max} : vitesse débitante dans les sections minimales d'écoulement (calculée) (m/s).
v_{max} : vitesse maximale de l'écoulement (mesurée) (m/s).
q : débit unitaire (m³/s/m).

1.2 Variables adimensionnelles

Les relations entre les différentes variables ont été présentées sous forme adimensionnelle. Les longueurs de références choisies ont été soit la largeur des blocs **D**, soit leur hauteur utile (hauteur à partir du fond moyen) **k**.

La hauteur d'eau adimensionnelle **h*_D**, le débit unitaire adimensionnel **q*_D** et la vitesse maximale mesurée adimensionnelle **v*_{Dmax}** sont définis ainsi :

$$h^*_{D} = \frac{h}{D} \quad q^*_{D} = \frac{q}{\sqrt{g} \times D^{1.5}} \quad v^*_{Dmax} = \frac{v}{\sqrt{g} \times D}$$

De même, la hauteur d'eau adimensionnelle **h*_k** et le débit unitaire adimensionnel **q*_k** sont définis ainsi :

$$h^*_{k} = \frac{h}{k} \quad q^*_{k} = \frac{q}{\sqrt{g} \times k^{1.5}}$$

Les formules données ci-dessous sont valables pour des pentes du coursier entre 1 et 10% et des concentrations entre 0.06 et 0.16. Elles ont été établies à partir d'essais hydrauliques effectués à l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (Thinus, 2003 ; Courret 2004 ; Larinier et al, 2005 ; Gomes et al, 2006).

1.3 Définition de la concentration

La concentration en enrochements est définie à partir de la largeur face à l'écoulement moyenne des blocs **D** et des espacements longitudinaux **ax** et latéraux **ay** d'axe à axe :

$$C = \frac{D^2}{ax \times ay}$$

1.4 Relation entre la hauteur d'eau et le débit unitaire

Les essais hydrauliques montrent que la charge à l'amont d'enrochements régulièrement répartis et la hauteur d'eau au sein du dispositif sont globalement similaires, hormis dans le cas d'enrochements à face arrondie à partir de 6-7% de pentes où la hauteur d'eau est alors significativement plus faible que la charge amont. Cependant, dans le cadre du dimensionnement piscicole, ce dernier cas ne se pose pas vraiment.

Dans la relation entre la hauteur d'eau et le débit unitaire, on distingue deux cas selon que les enrochements sont émergés ($h / k < 1.1$) ou immergés ($h / k > 1.1$).

1.4.1 Ecoulement contenu entre les enrochements ($h / k < 1.1$)

Le débit unitaire **q** est déterminé en fonction de la hauteur d'eau **h**, de la concentration en enrochement **C** et de la pente du dispositif **I**. La forme de la face des blocs opposée à l'écoulement a également une influence non négligeable. Deux relations ont été établies pour des blocs à face plane et à face arrondie, considérant que les enrochements naturels ont une forme intermédiaire. Les relations sont données sous la forme adimensionnelle (rapportée à **D**) et pour une largeur face à l'écoulement **D** égale à 0.5 m.

Face plane :

$$\text{Formule adimensionnelle : } q^*_D = 0.648 \times h^*_{D^{1.084}} \times I^{0.56} \times C^{-0.456}$$

$$\text{Pour } D = 0.5 \text{ m : } q = 1.521 \times h^{1.084} \times I^{0.56} \times C^{-0.456}$$

Face arrondie :

$$\text{Formule adimensionnelle : } q^*_D = 0.815 \times h^*_{D^{1.45}} \times I^{0.557} \times C^{-0.456}$$

$$\text{Pour } D = 0.5 \text{ m : } q = 2.466 \times h^{1.45} \times I^{0.557} \times C^{-0.456}$$

1.4.2 Ecoulement dépassant les enrochements ($h / k > 1.1$)

Lorsque l'écoulement dépasse les enrochements, la forme des blocs n'a plus beaucoup d'influence, une seule relation a donc été établie pour appréhender le comportement des ouvrages pour les forts débits. Elle est donnée au format adimensionnel (rapportée à **k**) et pour une hauteur de blocs **k** de 0.6 m.

$$\text{Formule adimensionnelle : } q^*_k = 0.955 \times h^*_{k^{2.396}} \times I^{0.466} \times C^{-0.230}$$

$$\text{Pour } k = 0.6 \text{ m : } q = 4.727 \times h^{2.396} \times I^{0.466} \times C^{-0.230}$$

Dans le cas d'un ouvrage possédant un devers latéral, le débit peut être calculé par tranche de quelques mètres de large en considérant sur chacune la hauteur d'eau moyenne.

1.5 Vitesse débitante

La vitesse débitante au sein d'enrochements régulièrement répartis est intéressante notamment en comparaison avec la vitesse maximale v_{\max} dans les jets. On peut calculer la vitesse débitante dans les sections « libres » V_{deb} , et la vitesse débitante au niveau des sections minimales d'écoulement $V_{\text{deb}_{\max}}$, en rapportant respectivement le débit à la section totale d'écoulement (sans tenir compte de l'encombrement des blocs) ou à la section minimale d'écoulement.

$$V_{\text{deb}} = \frac{q}{h}$$

$$V_{\text{deb}_{\max}} \approx \frac{b+D}{b} \times V_{\text{deb}} \approx \frac{b+D}{b} \times \frac{q}{h}$$

1.6 Relation entre la hauteur d'eau et la vitesse maximale

En vue du dimensionnement piscicole, la vitesse maximale de l'écoulement a été étudiée lorsque l'écoulement est contenu entre les enrochements ($h/k < 1.1$). Deux relations ont été établies **pour une concentration de 0.13** et pour des blocs à face plane et à face arrondies, considérant que les enrochements naturels ont une forme intermédiaire.

Face plane :

$$\text{Formule adimensionnelle : } v_{D_{\max}}^* = 3.35 \times h_D^{*0.27} \times I^{0.53}$$

$$\text{Pour } D = 0.5 \text{ m : } v_{\max} = 8.92 \times h^{0.27} \times I^{0.53}$$

Face arrondie :

$$\text{Formule adimensionnelle : } v_{D_{\max}}^* = 4.54 \times h_D^{*0.32} \times I^{0.56}$$

$$\text{Pour } D = 0.5 \text{ m : } v_{\max} = 12.56 \times h^{0.32} \times I^{0.56}$$

Les corrections à appliquer sur la vitesse maximale dans les cas de concentrations différentes de 0.13 sont données sous forme de pourcentage dans la figure ci-dessous. Par exemple, à un tirant d'eau et une pente donnée, la vitesse maximale pour $C=0.08$ est supérieure de 24% à celle pour $C=0.13$.

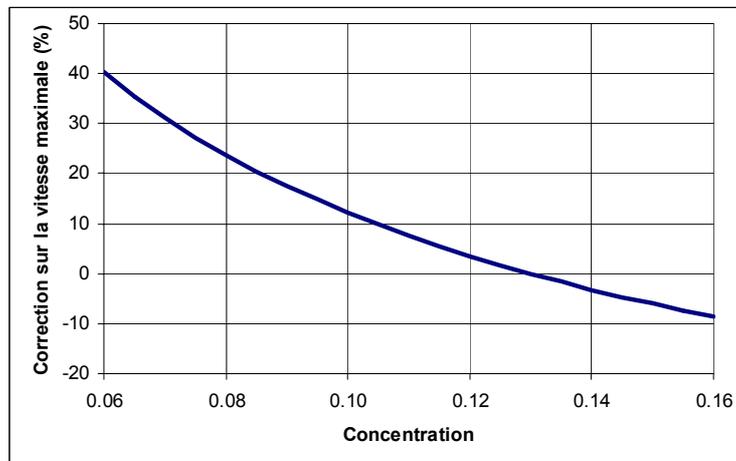


Figure A 1 : Correction à appliquer sur la vitesse maximale en fonction de la concentration en enrochements.

1.7 Comparaison entre vitesse maximale et débitante

La comparaison entre vitesse maximale dans l'écoulement et vitesse débitante est une première indication sur l'hétérogénéité des vitesses et sur les contraintes de cisaillement au sein de l'écoulement. Le rapport v_{\max}/V_{deb} est fonction de la hauteur d'eau (ou du débit) ; la concentration et la pente n'ayant pas d'influence. Il varie d'environ 1.5 à 2.5 pour les enrochements à face plane et de 2 à 3 pour les enrochements à face arrondie. A titre de comparaison, le rapport v_{\max}/V_{deb} dans une passe à bassins à fentes verticales est couramment de l'ordre de 7-12. Globalement, les vitesses d'écoulement au travers d'enrochements régulièrement répartis sont plus homogènes que celles dans les passes techniques.

1.8 Puissance dissipée volumique

La puissance dissipée volumique se calcule à partir du débit unitaire, de la pente et de la hauteur d'eau :

$$Pv = \rho \times g \times \frac{q}{h} \times l = \rho \times g \times V_{deb} \times l$$

1.9 Comparaison entre les enrochements à face plane et arrondie

Les enrochements à face arrondie montrent une débitance supérieure aux enrochements à face plane. C'est-à-dire qu'à une pente donnée, pour obtenir une même hauteur d'eau, il faut un débit supérieur dans le cas de face arrondie que dans le cas de face plane. La vitesse maximale et la puissance dissipée sont alors également supérieures. Cela est dû au fait que l'écoulement est moins contracté à l'entonnement entre des singularités à face arrondie qu'à face plane.

Dans le souci de réduire les vitesses et les puissances dissipées pour permettre le franchissement des poissons, les enrochements à face plane sont plus appropriés. On cherchera donc à les privilégier lors du tri des blocs.

1.10 Abaques

Les figures A2 et A3 montrent les abaques construites à partir des relations présentées précédemment. Ces graphiques se révèlent utiles lors du dimensionnement. Ils permettent notamment de visualiser l'influence des différents paramètres.

FACE ARRONDIE

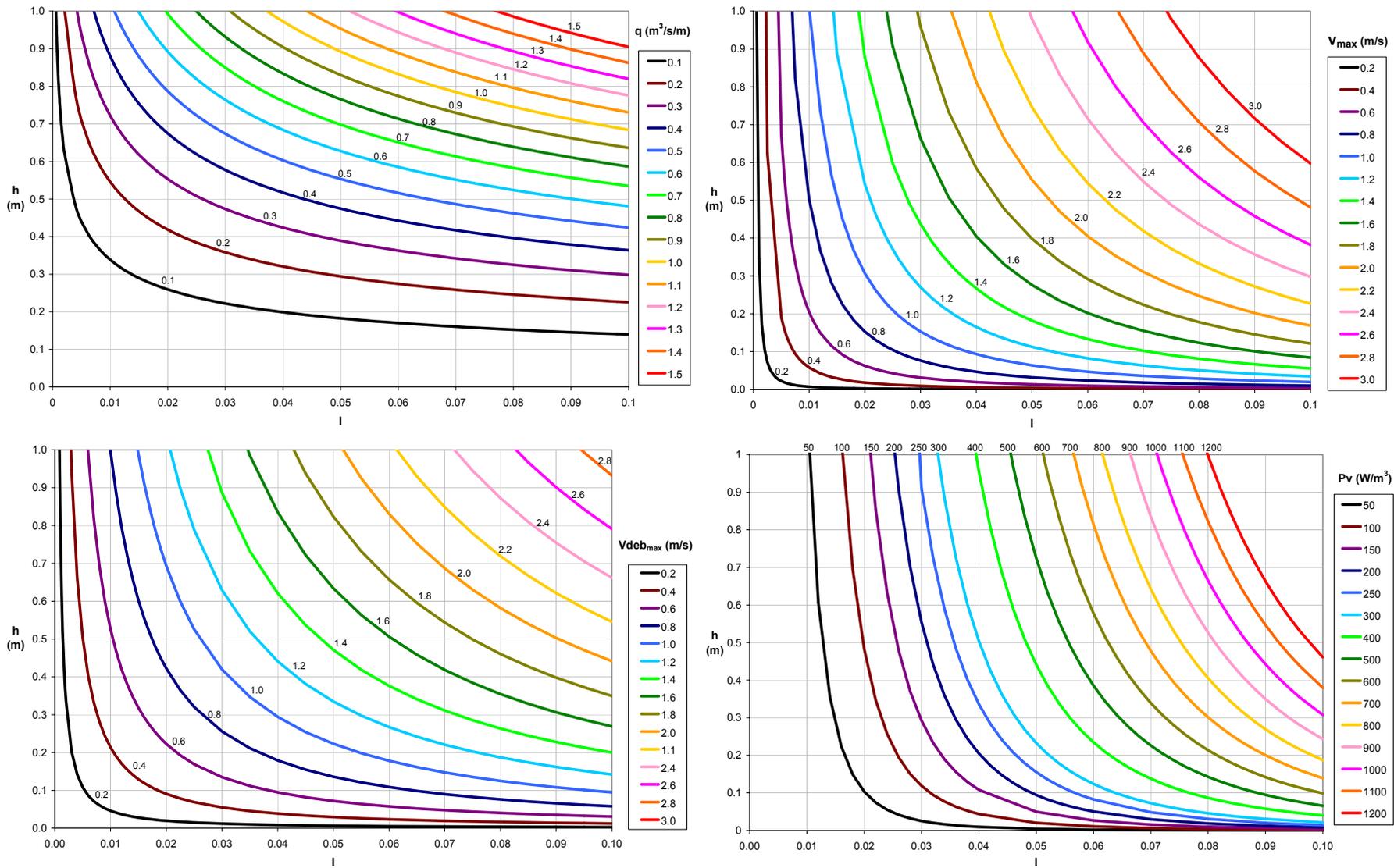


Figure A 2 : Abaque donnant q ($m^3/s/m$), v_{max} (m/s), $V_{deb_{max}}$ (m/s) et Pv (W/m^3) en fonction de h (m) et de l pour des enrochements régulièrement répartis à face arrondie à une concentration de 0.13 et $D = 0.5$ m

FACE PLANE

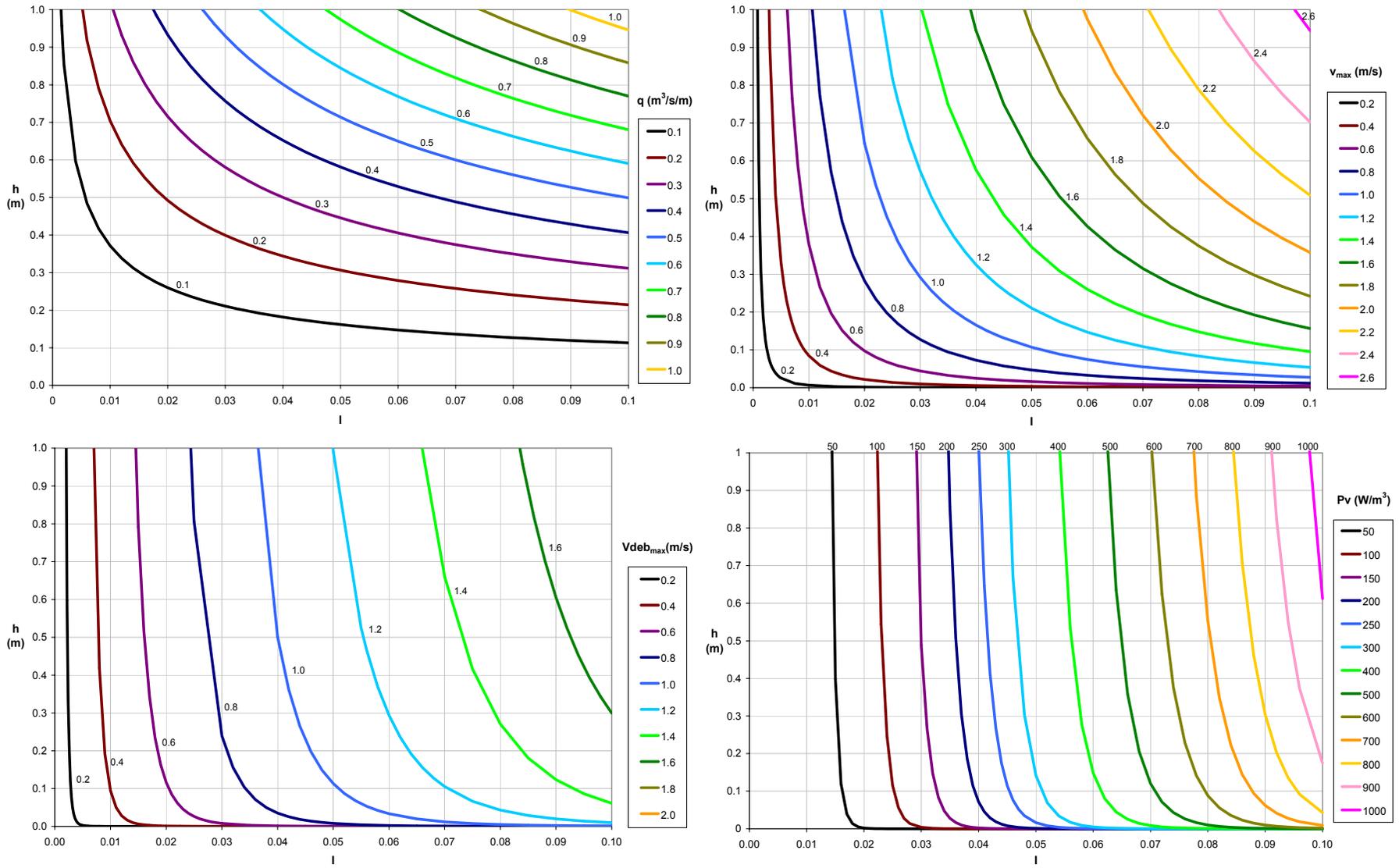
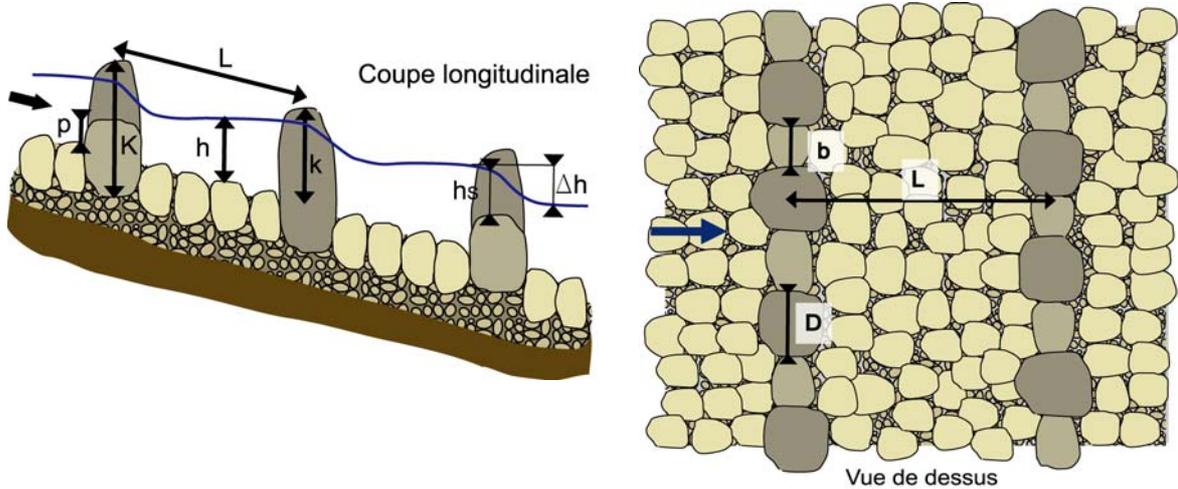


Figure A 3: Abaque donnant q (m³/s/m), v_{max} (m/s), V_{deb_max} (m/s) et Pv (W/m³) en fonction de h (m) et de l pour des enrochements régulièrement répartis à face plane à une concentration de 0.13 et $D = 0.5$ m

2 LES ENROCHEMENTS EN RANGEES PERIODIQUES

2.1 Variables, schémas et notations



- h** : hauteur d'eau dans les bassins (m).
- h_s** : charge sur les seuils (m) ($h_s = h - p$).
- Δh** : chute entre les bassins (m).
- v_{max}** : vitesse maximale dans les jets (m/s).
- p** : hauteur des seuils (m).
- D** : largeur moyenne face à l'écoulement des blocs (m).
- k** : hauteur utile des blocs (m).
- b** : largeur de passage libre entre les blocs (m).
- B** : largeur de l'ouvrage (m).
- L** : espacement longitudinal entre les rangées (m).
- θ** : porosité des rangées de blocs.
- q** : débit unitaire ($m^3/s/m$).
- Q** : débit total transitant dans l'ouvrage (m^3/s).
- μ** : coefficient de débit.
- K_N** : coefficient de noyage du seuil.

2.2 Porosité θ des rangées de blocs

La porosité des rangées d'enrochement est égale au rapport de la somme des largeurs de passage libre sur la largeur totale de l'ouvrage.

$$\theta = \frac{\sum b}{B} \approx \frac{b}{b + D}$$

2.3 Chute au niveau des rangées

Au sein d'enrochements en rangées périodiques, la chute est essentiellement concentrée au niveau des rangées. On a alors :

$$\Delta h \approx l \times L$$

2.4 Relation entre la charge sur le seuil et le débit à travers les rangées d'enrochements

Les essais réalisés à l'IMFT montrent que la relation entre la charge **h_s** sur le seuil et le débit unitaire **q** est bien représentée par la formule de type déversoir.

Lorsque l'écoulement est essentiellement contenu dans les enrochements (submersion relative h_s/k inférieure à 1.2), on a :

$$q = K_N \times \mu \times \theta \times \sqrt{2g} \times h_s^{3/2}$$

On peut également calculer le débit total transitant dans l'ouvrage :

$$Q = q \times B = K_N \times \mu \times \sum b \times \sqrt{2g} \times h_s^{3/2}$$

Les seuils généralement également constitués d'enrochements s'apparentent à des seuils épais avec un coefficient de débit μ voisin de 0.35. La valeur du coefficient de noyage du seuil K_N dépend de la charge sur le seuil h_s et de la chute entre les bassins Δh . Le coefficient K_N peut être considéré égal à 1 tant que $(h_s - \Delta h) / h_s < 0.8$; condition généralement vérifiée dans le cas des dispositifs de franchissement piscicole. K_N décroît ensuite au fur et à mesure que le rapport $(h_s - \Delta h) / h_s$ augmente (figure 5).

Le débit n'est donc pas directement dépendant de la pente de l'ouvrage.

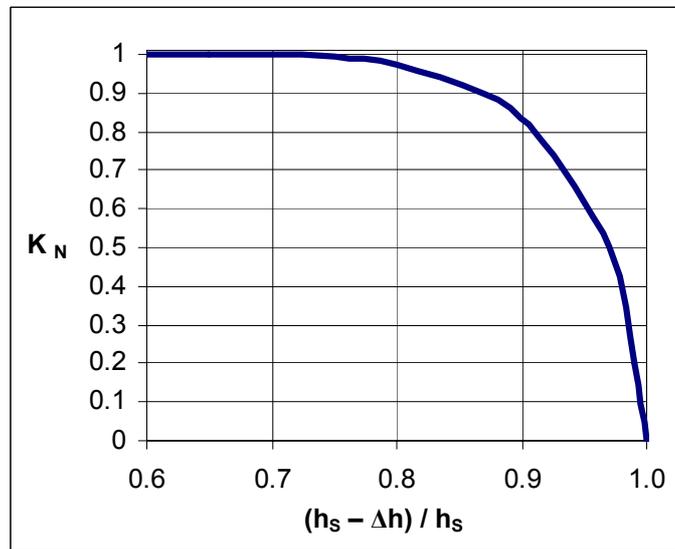


Figure A 4: Evolution du coefficient de noyage en fonction de la chute Δh et de la charge sur le seuil h_s .

Lorsque l'écoulement dépasse nettement la hauteur des blocs (submersion relative h_s/k supérieure à 1.2), on peut considérer le dispositif comme un ensemble de déversoirs à deux cotés différentes :

$$q = K_N \times \mu \times \sqrt{2g} \times \left[\theta \times h_s^{3/2} + (1 - \theta) \times (h_s - k)^{3/2} \right]$$

Dans le cas d'un ouvrage avec une pente latérale, le débit peut être calculé par tranche de quelques mètres de large en considérant sur chacune la hauteur d'eau moyenne.

2.5 Vitesse maximale dans les jets

La vitesse maximale v_{MAX} dans les jets est de l'ordre de :

$$v_{max} = \sqrt{2g \times \Delta h}$$

Comme elle dépend de la chute Δh , la vitesse maximale est liée à la pente de l'ouvrage I et à l'espacement des rangées L .

2.6 Puissance dissipée volumique dans les bassins

La puissance dissipée volumique dans les bassins se calcule à partir du débit unitaire, de la pente et de la hauteur d'eau :

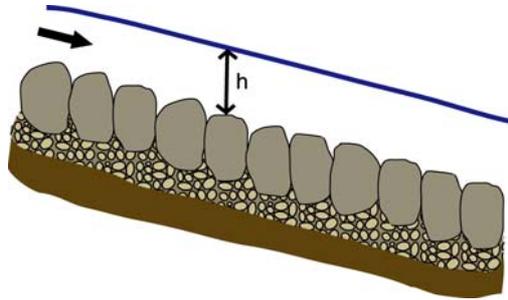
$$P_v = \rho \times g \times \frac{q}{h} \times l$$

2.7 Condition de non-formation d'un ressaut prononcé

Il convient de garantir en pied de chute, c'est-à-dire à l'aval immédiat de la rangée de blocs, une profondeur d'eau suffisante pour éviter la formation d'un ressaut trop prononcé susceptible de rendre le passage du poisson très difficile sinon impossible. On adoptera le même critère que pour les passes à bassins successifs, c'est-à-dire une profondeur d'eau minimale dans les pseudo-bassins au moins égale à 2.5 fois la chute entre bassins.

3 LES ENROCHEMENTS JOINTIFS

3.1 Variables, schémas et notations



- h_{am} : charge amont sur la crête du seuil (m).
 h : hauteur d'eau en écoulement uniforme (m).
 V_{deb} : vitesse débitante (m/s).
 q : débit unitaire ($m^3/s/m$).
 K_S : coefficient de Strickler.
 μ : coefficient de débit de la formule déversoir.
 l : pente longitudinale du coursier.
 g : accélération de la pesanteur ($9.81 m/s^2$).
 M : Masse d'un enrochement (kg).
 P_V : Puissance dissipée volumique (W/m^3).
 ρ_s : masse volumique des enrochements ($\approx 2650 kg/m^3$).

3.2 Diamètre équivalent et courbe granulométrique des enrochements

Le diamètre équivalent d'un enrochement de masse M est par définition le diamètre de la sphère équivalente:

$$D = \left(\frac{6M}{\rho_s \pi} \right)^{1/3}$$

Masse de l'enrochement (kg)	50	100	250	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
Diamètre équivalent (m)	0.33	0.42	0.56	0.71	0.90	1.03	1.13	1.22	1.29	1.36	1.42	1.48	1.53

Tableau A 1: Correspondance entre masse de l'enrochement et diamètre équivalent.

3.3 Relation entre la charge amont sur la crête et le débit

La relation entre la charge amont h_{am} sur la crête de la rampe et le débit unitaire q est bien représentée par la formule de type déversoir **dénoyé** (Larinier et al. 1995) :

$$q = C \times \sqrt{2g} \times h_{am}^{3/2}$$

Dans le cas d'enrochements libres, une fraction non négligeable du débit filtre à travers les enrochements jusqu'à des charges amont de l'ordre d'un mètre, englobant le domaine de franchissabilité des poissons. Il est alors très délicat de déterminer précisément la relation entre charge amont et débit, étant donné d'une part la difficulté à définir la cote de référence pour mesurer la charge et d'autre part la variabilité du coefficient de débit.

Étant donné les gammes réduites de débit unitaires franchissable par les poissons, le dimensionnement des ouvrages nécessite une détermination précise de la relation entre charge amont et débit, ce qui passe par le jointolement de la crête du seuil. La charge amont h_{am} sur la

crête de la rampe est alors considérée à partir du niveau de jointoiment des enrochements. La valeur du coefficient de débit **C** est constante et voisine de 0.37 (Larinier et al 1995).

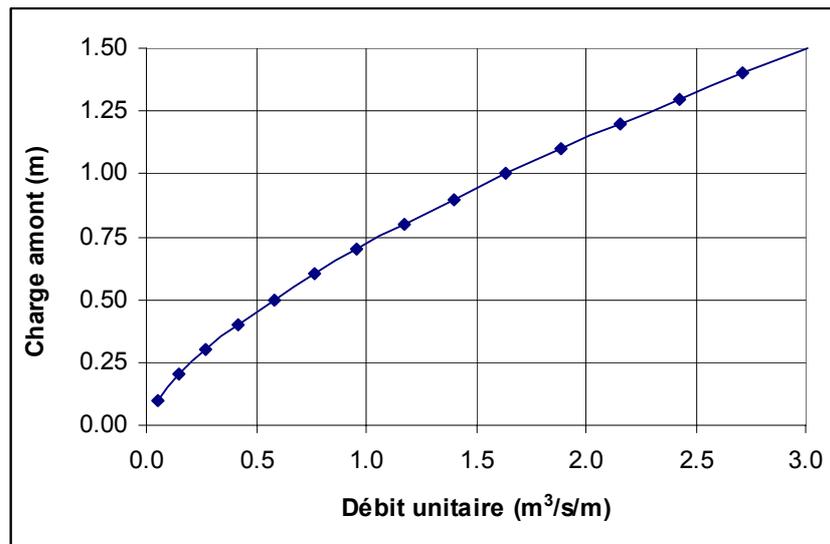


Figure A 5: Relation entre la charge amont sur la crête et le débit unitaire (coefficient de débit égal à 0.37)

Dans le cas d'un ouvrage avec une pente latérale, le débit peut être calculé par tranche de quelques mètres de large en considérant sur chacune la hauteur d'eau moyenne.

3.4 Relation entre la hauteur d'eau, la vitesse débitante et le débit en régime uniforme

A partir de la crête de la rampe, l'écoulement s'accélère et la hauteur d'eau diminue jusqu'à l'établissement du régime uniforme. Plus le coursier est rugueux et le débit unitaire faible, plus la longueur d'établissement du régime uniforme est courte. Elle est de l'ordre de 3 à 4 mètres pour des débits unitaires de 1 à 2 m³/s/m.

Les études sur modèle réduit d'écoulement uniforme sur une rampe en enrochements jointifs ont montré une dispersion importante des vitesses et des hauteurs d'eau. En vue du franchissement piscicole, il est alors délicat de raisonner uniquement en terme de vitesse et hauteur moyenne, sachant que localement ces paramètres peuvent subir des variations telles que le poisson peut être bloqué. Par sécurité, il est préférable de considérer le premier quartile des hauteurs d'eau (seules 25% des hauteurs d'eau sont inférieures à cette valeur) et le troisième quartile des vitesses d'écoulement (75% au moins des vitesses sont inférieures à cette valeur) (Larinier et al. 1995).

Larinier et al. (1995) ont comparé les résultats de la formule de Manning-Strickler avec les distributions des hauteurs d'eau et des vitesses, montrant que :

- Les hauteurs d'eau calculées (en prenant comme référence le niveau de jointoiment des blocs) sont voisines des valeurs de premier quartile des hauteurs d'eau mesurées.
- Les vitesses débitantes calculées se situent majoritairement entre le troisième quartile et la vitesse maximale (mesurées à 0.4*h).

La formule de Manning-Strickler est donc adaptée au dimensionnement des rampes en enrochements jointifs. Le débit unitaire **q** est estimé en fonction du coefficient de Strickler **K_s**, de la hauteur d'eau **h**, et de la pente **I** :

$$q = K_s \times h^{5/3} \times I^{1/2}$$

La vitesse débitante **V_{deb}** est ensuite égale à :

$$V_{deb} = q/H = K_s \times h^{2/3} \times I^{1/2}$$

Le coefficient de Strickler est évalué à partir du D_{65} des enrochements :

$$K_s = \frac{a}{D_{65}^{1/6}}$$

Le valeur de a est fonction du mode de mise en place des enrochements et de leur niveau de jointoiement.

- Pour des enrochements déversés non jointoyés, la valeur de a est voisine de 21, la référence pour les hauteurs d'eau étant la surface moyenne du coursier (Whittaker et Jäggi, 1986).
- Pour des enrochements disposés un à un de manière compacte sans joint, la valeur de a est voisine de 15.5, la référence pour les hauteurs d'eau étant la surface moyenne du coursier (Whittaker et Jäggi, 1986). Pour des niveaux de jointoiement de 30 et 50%, la valeur de a est voisine respectivement de 16.7 et 18, la référence pour les hauteurs d'eau étant alors le niveau de jointoiement (Larinier et al. 1995).

Pour la construction de rampes en enrochements jointifs franchissables par conception, les blocs seront préférentiellement mis en place un par un de manière compacte plutôt que par déversement.

Les formules données dans ce paragraphe sont valables pour des pentes du coursier entre 2 et 15%.

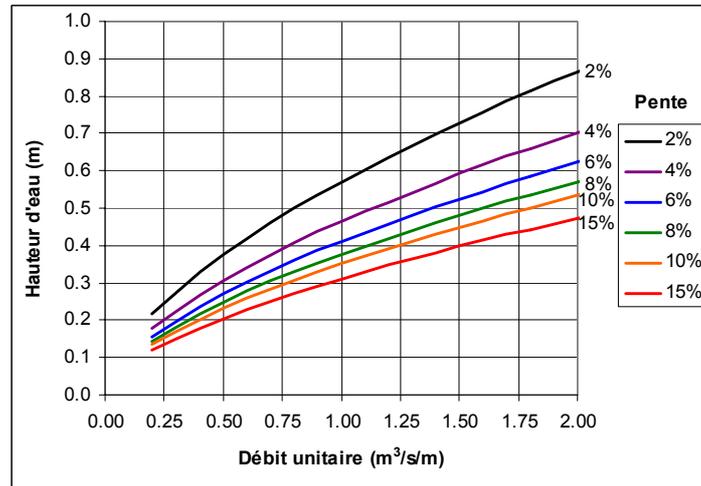


Figure A 6: Relation entre le débit unitaire et la hauteur d'eau pour différentes pentes de coursier ($D_{65} = 1$ m et $a = 18$).

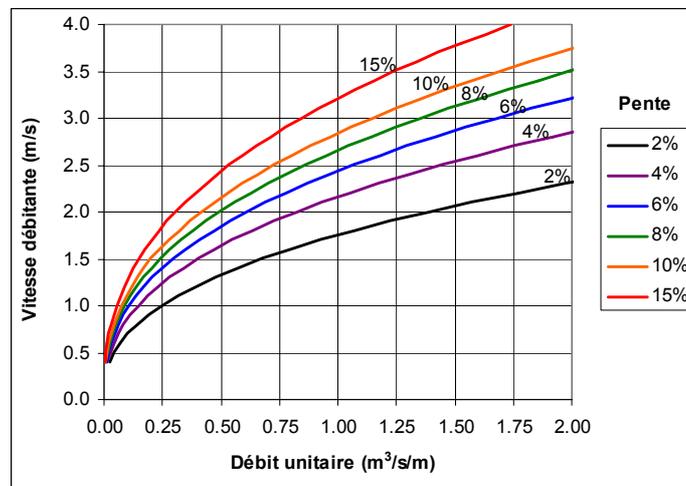


Figure A 7: Relation entre la vitesse débitante et la hauteur d'eau pour différentes pentes de coursier ($D_{65} = 1$ m et $a = 18$).

4 STABILITE DES ENROCHEMENTS

4.1 Notations

D : largeur face à l'écoulement des blocs (m).

K : hauteur totale du bloc (m).

k : hauteur utile des blocs (m).

S : surface de la face opposée à l'écoulement d'un bloc isolé (m²)

$S \approx k \times D$

Vol : volume d'un bloc (m³).

$Vol \approx K \times D^2$ en considérant le bloc proche d'un parallélépipède

l : pente du coursier.

h : hauteur d'eau (m).

V_{crit} : vitesse critique pour la stabilité des blocs isolés (m/s).

q_{max} : débit unitaire maximal permmissible au dessus d'enrochement jointifs (m³/s/m).

ρ : masse volumique de l'eau (1000 kg/m³).

ρ_s : masse volumique des enrochements (≈2650 kg/m³).

R : point pivot du basculement d'un bloc isolé.

O : centre de la surface opposée à l'écoulement d'un bloc isolé.

G : centre de gravité d'un bloc.

P : poids d'un bloc (N).

F : force exercée par l'écoulement sur un bloc isolé (N).

L_F : bras de levier de la force F appliquée en O, autour de R (m)

L_P : bras de levier du poids P appliquée en G, autour de R (m).

C_T : coefficient de traînée des blocs isolés .

4.2 Stabilité des blocs isolés

La stabilité est peut être évaluée grossièrement en fonction du rapport entre la force exercée par l'écoulement **F** sur le bloc tendant à le faire basculer et le poids du bloc **P** tendant à le maintenir en place (Gebler, comm. pers.).

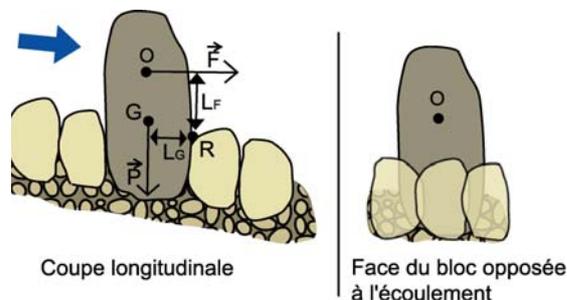


Figure A 8: Forces exercées par l'écoulement et la gravité sur un bloc isolé.

Le poids d'un bloc immergé s'applique en son centre de gravité **G**. Il est égal à :

$$P = (\rho_s - \rho) \times g \times Vol$$

La force exercée par l'écoulement sur le bloc s'applique au centre **O** de la surface du bloc opposée à l'écoulement. Elle dépend de la vitesse d'écoulement **V** :

$$F = \frac{1}{2} \rho \times C_T \times S \times V^2$$

Le coefficient de traînée **C_T** est fonction de la forme des blocs ; il varie de 1.2 pour des blocs à face arrondie à 1.4 pour des blocs à face plane.

On considère le basculement du bloc autour du point pivot **R**. Le bloc est stable tant que :

$$F \times L_F < P \times L_P$$

On en tire la vitesse critique V_{crit} de stabilité pour les blocs qu'il ne faudra pas dépasser :

$$V_{crit} = \sqrt{\frac{2 \times (\rho_s - \rho) \times g \times Vol \times L_p}{\rho \times C_T \times S \times L_F}}$$

La vitesse critique peut être comparée à la vitesse débitante pour la crue de référence. Ce sont cependant les impacts des embâcles qui constituent les plus grands risques de déstabilisation des blocs.

Pour la stabilité des blocs, il est donc important d'ancrer les gros blocs sur une profondeur entre 0.5 à 1 fois leur hauteur utile k , soit entre 0.3 et 0.5 fois leur hauteur totale K , pour obtenir un poids important par rapport à la surface de leur face opposée à l'écoulement.

Dans les cas où la stabilité des blocs considérés est jugée incertaine, il est envisageable soit d'adopter de plus gros blocs et/ou de les enfouir davantage, soit de les adosser à des pieux métalliques, soit encore de rendre chaque gros bloc solidaire des blocs voisins par jointoiement. Il n'est cependant pas conseillé de jointoyer la surface de tout l'ouvrage pour éviter l'exercice de sous-pressions et lui conserver une certaine souplesse afin de s'adapter à d'éventuels affaissements ou tassements. Le jointoiement d'un bloc doit permettre de le rendre solidaire notamment avec les petits blocs juste à l'aval, de façon à augmenter la distance entre le centre de gravité et le point de basculement de l'ensemble.

4.3 Stabilité des enrochements

La formule de Wittaker et Jäggi (1986) confirmée par les essais de Larinier et al. (1995) donne le débit unitaire maximal permissible q_{max} au dessus d'enrochements déversés en fonction de la pente I et du D_{65} des enrochements :

$$q_{MAX} = 0.308 \times \left(g \times \left[\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right] \times D_{65}^3 \right)^{0.5} \times I^{-7/6}$$

En appliquant les valeurs numériques de g , ρ_s et ρ , on obtient :

$$q_{MAX} = 1.24 \times D_{65}^{1.5} \times I^{-7/6}$$

Cette formule établie pour des enrochements déversés contient une marge de sécurité de 20%.

Pour des enrochements disposés de manière compacte on peut adopter par sécurité la même formule, mais Gebler (1991) avance que le débit maximal permissible peut être multiplié dans ce cas par un facteur de 1.7 à 2.

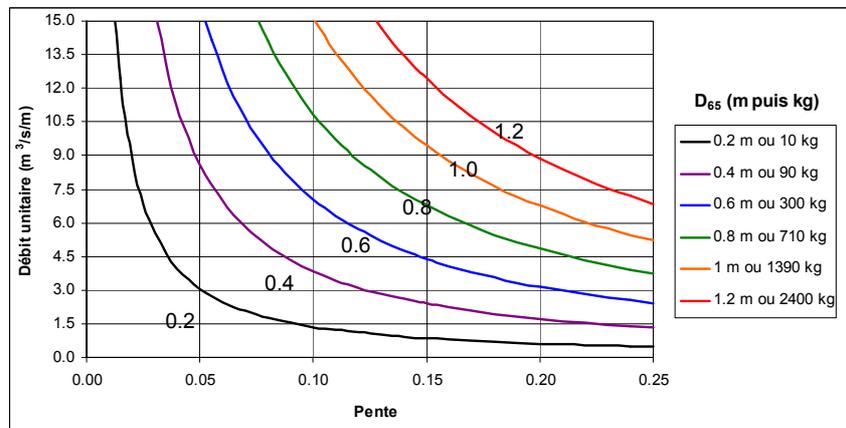


Figure A 9: Limite de stabilité des enrochements en fonction du D_{65} et de la pente selon la formule originale de Whittaker et Jäggi (1986).

5 CONDITIONS DE FILTRE ENTRE LES ALLUVIONS ET LES COUCHES D'ENROCHEMENTS

Il convient généralement de disposer une couche de transition entre les blocs constituant le fond de l'ouvrage et les éléments du terrain naturel pour éviter l'enfoncement des blocs. Cette couche de transition doit avoir des caractéristiques granulométriques n'autorisant ni le passage des matériaux du terrain naturel (généralement sables et gravier) à travers ses éléments, ni le passage de ses propres éléments à travers les blocs. Cette couche doit donc jouer le rôle de couche filtrante vis-à-vis du terrain naturel, les blocs jouant le rôle de filtre vis-à-vis de cette couche de transition.

Pour que les éléments de la couche de base (couche inférieure) ne migrent pas à travers ceux de la couche filtrante (couche supérieure), on doit avoir :

- pour des granulométries de la couche de base étendues :

$$D_{15,F} / D_{15,B} > 5$$

$$D_{15,F} / D_{85,B} \leq 5$$

$$D_{50,F} / D_{50,B} \leq 25$$

- pour des granulométries de la couche de base serrées (Terzaghi, 1976) :

$$D_{15,F} / D_{85,B} \leq 4$$

Avec $D_{i,F}$ le diamètre tel que $i\%$ en poids des éléments de la couche filtrante ont un diamètre inférieur ou égal. De même pour $D_{i,B}$ avec la couche de base.

Ces conditions de filtre peuvent également être utilisées pour vérifier que le colmatage des interstices entre les enrochements par les éléments de la charge solide du cours d'eau peut s'effectuer. Le D_{15} de la couche de transition ne devra alors pas dépasser 4 à 5 fois le D_{85} des éléments de la charge solide du cours d'eau.

6 BIBLIOGRAPHIE

Courret, D. 2004. Etude des écoulements à fortes pentes entre et au dessus de macrorugosités régulièrement répartis – Application aux dispositifs de franchissement piscicole rustiques. Rapport GHAAPPE RA.04.07. 66p.

Gebler, R.J.1991. Sohlrampen und Fischaufstiege. Wasserbau und Umwelt 145p.

Gomes P, Courret D, Larinier M, 2006. Etude hydraulique en laboratoire des écoulements à fortes pentes au dessus de macrorugosités régulièrement répartis.

Larinier, M., Chorda, J., Ferlin, O., 1995. Le franchissement des seuils en enrochements par les poissons migrateurs, rapport GHAAPPE-IMFT, 25 p.

Terzaghi, K, 1976. Erdbaumekank auf bodenphysikalischer Grundlage, Wien.

Thinus, Z. 2003. "Etude des écoulements à fortes pentes au-dessus de macro-rugosités régulièrement réparties. Aide au dimensionnement de dispositifs de franchissement piscicoles multi-spécifiques. Mémoire de fin d'étude ENSAR-ENGEES, 48 p.

Whittaker, J, Jäggi M., 1986. Blockschwellen, Zürich, Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, 91.