

Pour mieux
affirmer
ses missions,
le Cemagref
devient Irstea



Pôle Ecohydraulique



352, avenue Roger Tissandié

31 600 MURET

Tél.: 05.62.20.98.24

Mise au point d'outils d'estimation du coût des passes à poissons

Avril 2015



Les auteurs

Philippe Baran

Ingénieur

ONEMA - Pôle d'Ecohydraulique - IMFT, allée du professeur Camille Soula, 31400 TOULOUSE

Dominique Courret

Ingénieur

ONEMA - Pôle d'Ecohydraulique - IMFT, allée du professeur Camille Soula, 31400 TOULOUSE

Bruno Voetgle

Ingénieur

ECOGEA – 352 avenue Roger Tissandié – 31 600 MURET

Droits d'usage :

Couverture géographique : **Nationale**

Niveau géographique

Niveau de lecture **Professionnels, experts**

Nature de la ressource:

Mise au point d'outils d'estimation du coût des passes à poissons

Sommaire

1	RAPPELS DU CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE.....	17
1.1	Rappels du contexte	17
1.2	Objectifs	17
1.3	Plan du rapport	18
2	PRESENTATION DU JEU DE DONNEES ET METHODOLOGIES D'ANALYSES	19
2.1	La méthode de travail	19
2.2	La récolte des données	19
2.3	Les données récoltées.....	22
2.3.1	Données techniques.....	22
2.3.2	Données financières.....	22
2.4	Les variables analysées	23
2.5	Méthodes statistiques	24
2.6	Méthodes de construction des outils d'estimation des coûts.....	24
3	RESULTATS	25
3.1	Caractéristiques des 114 dossiers sélectionnés	25
3.1.1	Caractéristiques générales des seuils et barrages étudiés.....	25
3.1.2	Les types de passes étudiées.....	25
3.1.3	Caractéristiques générales des passes à poissons étudiées.....	26
3.2	Les coûts globaux des 114 ouvrages étudiés.....	29
3.2.1	Statistiques générales	29
3.2.2	Conclusions sur coûts globaux.....	33
3.3	Construction d'un outil d'estimation des coûts à large échelle.....	35
3.3.1	Effet des caractéristiques générales des seuils sur les coûts des dispositifs	35
3.3.2	Modèles généraux d'estimation des coûts.....	37
3.3.3	Influence d'autres facteurs sur le coût estimé	40

3.4	Construction d'un outil d'estimation des coûts pour les passes à bassin.....	42
3.4.1	Caractéristiques générales des dispositifs étudiés	42
3.4.2	Facteurs influençant le coût des passes à bassin	44
3.4.3	Modèles statistiques d'évaluation des coûts des passes à bassins	48
3.4.4	Modèle d'estimation du coût des passes	49
3.5	Construction d'un outil d'estimation des coûts pour les passes en enrochement	53
3.5.1	Caractéristiques générales des dispositifs étudiés.	53
3.5.2	Facteurs influençant le coût des passes en enrochement.....	55
3.5.3	Modèles d'estimation des coûts des passes en enrochement.	59
3.6	Construction d'un outil pour l'estimation des coûts des rivières de contournement.	62
3.6.1	Caractéristiques générales des dispositifs étudiés	62
3.6.2	Facteurs influençant le coût des rivières de contournement.....	64
3.6.3	Modèles d'estimation des coûts.....	65
3.7	Construction d'un outil pour l'estimation des coûts des pré-barrages	66
3.7.1	Caractéristiques générales des dispositifs étudiés	66
3.7.2	Facteurs influençant le coût des pré-barrages.....	68
3.7.3	Outil d'estimation des coûts des prébarrages.	68
3.8	Construction d'un outil pour l'estimation des coûts des passes à anguilles	69
3.8.1	Caractéristiques générales des dispositifs étudiés	69
3.8.2	Facteurs influençant le coût des passes à anguille.....	71
3.8.3	Modèles d'estimation des coûts des passes à anguilles	72
3.8.4	Coûts des matériaux	73
4	DISCUSSION ET ANALYSE CRITIQUE DES RESULTATS	74
4.1	Qualité du jeu de données	74
4.2	Champs d'application.....	74
4.3	Evaluation des coûts détaillés d'un projet de passes à poissons	74
4.3.1	Rappels des différentes phases et coûts des études.....	74
4.3.2	Coûts des différentes études	75
4.3.3	Coût des différentes phases de réalisation du chantier	76
5	CONCLUSIONS	77

Liste des Figures

Figure 1 : Nombre d'ouvrages sélectionnés en fonction des différents critères de tri et par Agence de bassin...	21
Figure 2 : Nombre d'ouvrages étudiés par type de coût ayant pu être récupéré.....	23
Figure 3 : Evolution de l'Indice des Travaux Publics (TP02) depuis le 01/01/2001.....	24
Figure 4 : Nombre de dispositifs de franchissement étudiés par type de passes. PAB : passe à bassin ; PEE : passe en enrochement ; PAA : passe à anguille ; PAR : passes à ralentisseurs ; RIV : rivière de contournement ; PB : pré-barrages.	26
Figure 5 : Caractéristiques générales des débits transitant dans les 97 passes étudiées (hors PAA).	27
Figure 6 : Caractéristiques générales des pentes des 97 passes étudiées (hors PAA).....	27
Figure 7 : Caractéristiques générales des surfaces des 97 passes étudiées(hors PAA).	27
Figure 8 : Caractéristiques générales des volumes dans les 97 passes étudiées (hors PAA).	28
Figure 9 : Débits transitant dans les passes en fonction des modules des rivières. Les pourcentages correspondent à la valeur moyenne du débit des passes ramenée au module de la rivière	28
Figure 10 : Hauteurs de chute des barrages équipés en fonction des différents types de passes.	29
Figure 11 et Figure 12 : Coût médian total et par mètre de chute des différents types de passes étudiées.	30
Figure 13 : Coût total par type de passe à poisson et pour les seuils de faible hauteur (< 1,5 m) et les rivières de module < 30 m ³ /s	31
Figure 14 : Coût médian par m ³ de génie civil et par type de passes à poissons.	31
Figure 15 : Coût par m ³ de génie civil et par type de passe à poisson pour les seuils de faible hauteur (< 1,5 m) et les rivières de module < 30 m ³ /s.	32
Figure 16 : Comparaison des coûts par m de chute et par l/s de débit dans la passe entre les différents types d'ouvrage.	32
Figure 17 : Comparaison des coûts totaux en fonction des classes de module des seuils et barrages étudiés.....	35
Figure 18 : Comparaison des coûts par m de chute en fonction des classes de module des seuils et barrages étudiés.	36
Figure 19 : Comparaison des coûts par m de chute et par l/s de débit dans la passe en fonction des classes de module des seuils et barrages étudiés.	36
Figure 20 : Comparaison des coûts totaux en fonction des classes de hauteur de chute des seuils et barrages étudiés.	37
Figure 21 : Modèle d'estimation des coûts totaux basé sur le module et la hauteur de chute.....	38
Figure 22 : Statistiques des coûts totaux et par m de chute en fonction de type de passe à bassin (Jet Plong. ; Passe à échancrure et jet plongeant ; Echan. Lat : Passe à échancrure latérale profonde ; Fente Vert. : Passe à Fente Verticale ; Dble. Fente Vert. : Passe à double fente verticale).....	44
Figure 23 : Statistiques des coûts totaux et par m de chute en fonction du module de la rivière.	45
Figure 24 : Statistiques des coûts par m de chute et débit dans la passe en fonction du module de la rivière.....	46
Figure 25 : Statistiques des coûts totaux et par m ³ de génie civil fonction de la hauteur de chute des seuils.	46
Figure 26 : Comparaison des coûts par m de chute et par m ³ /s dans la passe avec ou sans débit d'attrait dans une passe à échancrure.....	47
Figure 27 : Comparaison des coûts par m de chute et par m ³ /s dans la passe avec ou sans débit d'attrait dans une passe à fente verticale.	47
Figure 28 : Modèle d'estimation du coût total des passes à bassin en fonction du module de la rivière et de la hauteur de chute.....	48

Figure 29 : Modèle d'estimation du coût par m de chute des passes à bassin en fonction du débit dans la passe.	48
Figure 30 : Relation entre le coût total des passes à bassins et le volume de génie civil de l'ouvrage.	49
Figure 31 : Comparaison entre les coûts estimés sur la base de la médiane et des déciles des coûts par m de chute et les valeurs observées sur les 57 dossiers étudiés.	50
Figure 32 : Comparaison entre les coûts estimés sur la base de la médiane et des déciles des coûts par m ³ de génie civil et les valeurs observées sur les 57 dossiers étudiés.	51
Figure 33 : Comparaison des écarts de coûts entre les estimations des modèles et les valeurs observées pour des seuils présentant ou non une centrale hydroélectrique.	51
Figure 34 : Statistiques des coûts totaux et par m de chute en fonction de type de passe à bassin (ERR : Enrochements Régulièrement Répartis ; RP : Enrochement en Rangées Périodiques).	55
Figure 35 : Statistiques des coûts totaux et par m de chute en fonction du module de la rivière.	56
Figure 36 : Relation entre la longueur de la passe en enrochement et le coût total (Coût total (K€) = 4.33 (±1.31) x Long. PEE (m) avec r ² = 0.74 (p<0.05)).	56
Figure 37 : Relation entre la surface de la passe en enrochement et le coût total (Coût total (K€) = 0.688 (±0.13) x Surf PEE (m ²) avec r ² = 0.88 (p<0.05)).	57
Figure 38 : Relation entre le volume de blocs de la passe en enrochement et le coût total (Coût total (K€) = 0.96 (±0.24) x VolBloc PEE (m ³) avec r ² = 0.80 (p<0.05)).	57
Figure 39 : Relation entre le volume de génie civil de la passe en enrochement et le coût total (Coût total (K€) = 0.56 (±0.09) x Vol. PEE (m ³) avec r ² = 0.91 (p<0.05)).	57
Figure 40 : Relation entre le débit de la passe en enrochement et le coût par m de chute (Coût total (K€) = 90.8 (±41.7) x Q. PEE (m ³ .s ⁻¹) avec r ² = 0.55 (p<0.05)).	58
Figure 41 : Relation entre le débit de la passe en enrochement et le coût total (Coût total (K€) = 93 (±20.3) x Q. PEE (m ³ .s ⁻¹) avec r ² = 0.84 (p<0.05)).	58
Figure 42 : Modèle d'estimation du coût total des passes à bassin en fonction du de la hauteur de chute et du débit dans la passe.	59
Figure 43 : Estimations des coûts totaux pour des passes en enrochement sur la base de la saisie de la hauteur de chute et du débit prévu dans la passe.	60
Figure 44 : Estimations des coûts totaux pour des passes en enrochement sur la base de la saisie du volume du génie civil et/ou du volume de blocs de la passe.	61
Figure 45 : Relation entre le coût total des rivières de contournement et leur largeur.	64
Figure 46 : Comparaison des coûts observés et modélisés à partir de la largeur et de la pente des rivières de contournement.	65
Figure 47 : Relation entre la hauteur de chute et le coût total des rampes installées sur des canaux en génie civil.	71
Figure 48 : Relation entre la longueur développée des rampes installées sur des canaux en génie civil et le coût total des passes.	72
Figure 49 : Relation entre la surface des rampes installées sur des canaux en génie civil et le coût total des passes.	72
Figure 50 : Relation entre surface de la passe et coût total pour les passes piège.	73

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Etapes de la collecte des données.....	20
Tableau 2 : Caractéristiques des données récoltées pour chaque passe à poissons.....	22
Tableau 3 : Caractéristiques générales des 114 seuils et barrages étudiés.....	25
Tableau 4 : Caractéristiques générales des 114 passes étudiées.....	26
Tableau 5 : Statistiques générales des différents types de coûts pour les 114 dispositifs étudiés.....	34
Tableau 6 : Estimation de coûts totaux pour quelques exemples de hauteur de chute et de module de rivière....	38
Tableau 7 : Statistiques des coûts estimés par le modèle 2 en fonction des classes de module (pas de sites à module > 120 m ³ /s dans cette classe de hauteur de chute [$< 1,5$ m]).	39
Tableau 8 : Statistiques des coûts estimés par le modèle 3 en fonction des classes de module.	40
Tableau 9 : Présentation des 54 passes à bassins étudiées.....	42
Tableau 10 : Caractéristiques générales (chute et module) des 54 seuils équipés de passes à bassins étudiés en 2013.	42
Tableau 11 : Statistiques générales des différents coûts des passes à bassins étudiées en 2013-2014 par rapport à ceux de l'étude de 2001.....	43
Tableau 12 : Statistiques utilisées pour l'estimation du coût total d'une passe sur la base de la hauteur de chute et du débit dans la passe.	49
Tableau 13: Statistiques utilisées pour l'estimation du coût total d'une passe sur la base du volume de génie civil.....	50
Tableau 14: Caractéristiques générales (chute et module) des 18 seuils équipés de passes en enrochement.....	53
Tableau 15 : Statistiques générales des différents coûts des passes en enrochement étudiées en 2013-2014.....	54
Tableau 16 : Statistiques utilisées pour l'estimation du coût total d'une passe sur la base de la hauteur de chute et du débit dans la passe.	59
Tableau 17: Statistiques utilisées pour l'estimation du coût total d'une passe sur la base du volume de génie civil et/ou blocs.....	60
Tableau 18: Caractéristiques générales (chute et module) des 8 seuils équipés de rivières de contournement... 62	62
Tableau 19 : Statistiques générales des différents coûts des rivières de contournement étudiées en 2013-2014 et en 2001.....	63
Tableau 20: Statistiques utilisées pour l'estimation du coût total d'une passe sur la base de la hauteur de chute et du débit dans la passe.	65
Tableau 21: Caractéristiques générales (chute et module) des 5 seuils équipés de pré-barrages.	66
Tableau 22 : Statistiques générales des différents coûts des pré-barrages étudiés en 2013-2014 et en 2001.....	67
Tableau 23: Statistiques utilisées pour l'estimation du coût total d'un pré-barrage sur la base de la hauteur de chute et du débit dans la passe.....	68
Tableau 24 : Comparaison des coûts totaux des 5 pré-barrages étudiés en 2013-2014 avec les coûts estimés sur la base de l'outil de 2001.....	68
Tableau 25 : Types de passes à anguilles étudiées.	69
Tableau 26: Caractéristiques générales (chute et module) des 18 seuils équipés de passes en enrochement.....	69
Tableau 27 : Statistiques générales des différents coûts des passes à anguilles étudiées en 2013-2014 et en 2001.	70
Tableau 28 : Caractéristiques des coûts des différents types de passes à anguille étudiées.....	71
Tableau 29 : Détail des coûts de travaux de construction de passes à poissons issus de l'analyse de 35 des 114 dossiers sélectionnés.....	76

Résumé : L'Onema a été sollicitée afin de conduire une étude des coûts de dimensionnement et de construction des passes à poissons. La Direction du Contrôle des Usages et de l'Action Territoriale a coordonné le travail dont la réalisation a été confiée au Pôle d'Ecohydraulique ONEMA/IMFT/IRSTEA appuyé par le bureau d'étude ECOGEA. Ce travail fait suite à celui conduit en 2001 par le GHAPPE et qui avait abouti grâce à l'analyse de 272 passes à poissons, à des outils d'estimation des coûts. Le travail de récolte des données a été initié en mai 2011 avec l'appui des délégations interrégionales de l'Onema et des agences de l'eau sous la coordination de l'action territoriale. Cette étape n'a pu être achevée qu'à la fin de 2013 avec d'importantes difficultés à collecter l'ensemble des informations nécessaires (données techniques et financières).

Au total, 114 passes à poissons ont été utilisées dans l'étude sur 239 ouvrages sélectionnés en 2011 (41% de passes à bassins, 16% de passes en enrochement (PEE), 15% de passes à anguilles, 7% de rivières de contournement et 4% pré-barrages. Les indicateurs de coûts retenus dans l'analyse (coût total, coût/m de chute, coût/m³ de génie civil, coût/m de chute/débit de la passe, coût/m³ de blocs) ont été pondérés par l'Indice des Travaux Publics (TP02) à la date du 01/01/2014. Les passes étudiées sont situées pour 50% dans entre elles sur des cours d'eau de module variant entre 2,2 et 49,4 m³/s, des barrages de hauteurs variant entre 1,6 et 2,9 m. Les débits transitant dans ces dispositifs sont compris entre 150 et 900 l/s (médiane : 500 l/s), les pentes entre 5,1% et 12% (médiane : 6,8%), les surfaces entre 55 et 248 m² (médiane : 141 m²) et les volumes entre 93 et 557 m³ (médiane : 248 m³). Les coûts totaux de la moitié des 114 passes varient de 46 000 à 320 000 € (médiane à 130 000€), les coûts par m de chute de 27 000 € à 133 000 € (médiane à 69 000 €/m de chute) et les coûts par m³ de volume de génie civil de 700 € à 2 300 € (médiane à 1 300 €/m³). Les coûts par m de chute et débit transitant dans les dispositifs sont quasiment identiques, entre les passes à bassin, en enrochement et les rivières de contournement (de 150 à 190 €/m de chute/l.s⁻¹)

Trois modèles d'estimation des coûts pour des études à large échelle ont été construits :

→ Tous les seuils (97 sites):

Coût total (K€) = 51.4(±33.6) x Hauteur Chute(m)+4.95(±1) x Module(m³.s⁻¹) ; r² = 0.77 (p<0.05)

→ Seuils <1,5 m de hauteur de chute (27 sites) :

Coût Total (K€) = 31.8 (±9.1) x Hauteur Chute (m)+4.4(±1.15) x Module(m³.s⁻¹), r²=0.87 (p<0.05)

→ Seuils compris entre 1,5 m et 3 m de hauteur de chute (53 sites) :

Coût Total (K€) = 58.9(±29.8) x Hauteur Chute (m)+4.3(±0.94) x Module (m³.s⁻¹), r²=0.78 (p<0.05)

Des outils d'estimation des coûts ont été construits sur la base des coûts unitaires par mètre de chute et débit dans le dispositif ainsi que par m³ de génie civil, ceci pour les passes à bassins, les passes en enrochement, les prébarrages. Le principe de calcul repose sur le produit de la hauteur totale de chute, du débit dans la passe ou du volume de génie civil avec les statistiques des coûts unitaires que sont les valeurs médianes, les 1^{er} et 3^{ème} quartile et les 1^{er} et dernier décile.

	Passe à bassins	
	Coût unitaire (en €/m de chute/l.s ⁻¹ dans la passe)	Coût unitaire (en €/m ³ de génie civil)
1 ^{er} décile	117	654
1 ^{er} quartile	133	932
Médiane	189	1278
3 ^{ème} quartile	212	1834
Dernier décile	394	2239

	Passes en enrochement		
	Coût unitaire (en €/m de chute/l.s ⁻¹ dans la passe)	Coût unitaire (en €/m ³ de génie civil)	Coût unitaire (en €/m ³ de blocs)
1 ^{er} décile	60	311	607
1 ^{er} quartile	88	389	701
Médiane	148	527	1046
3 ^{ème} quartile	203	735	1719
Dernier décile	396	1076	2402

Pour les rivières de contournement (8 ouvrages) et les passes à anguilles (17 ouvrages), c'est une démarche statistique qui a été retenue pour construire des modèles prédictifs.

Rivière de contournement

Coût total (K€) = (-131.6 (±59) x pente (%))+(133.06 (±60) x largeur RC (m)), $r^2= 0.92(p<0.05)$

Passes à anguilles

- *Passes pièges* : leur coût est très homogène qu'elle que soit la hauteur de chute à franchir (entre 40 000 € et 50 000 €).
- *Rampes avec canaux en génie civil* :

Coût total (K€) = 2.69 (±0.53) x Longueur dev.(m), $r^2= 0.89(p<0.05)$

Coût total (K€) = 2.53 (±1.06) x Surface rampe(m²), $r^2= 0.65(p<0.05)$

Le coût des études (esquisse et dimensionnement) varie dans une fourchette de 8 000 à 15 000 € par ouvrage pour 75% des dispositifs. Les coûts d'installation et d'isolement de chantier se situent pour 90% des passes entre 10% et 26% du coût total des travaux.

Les outils d'estimation des coûts proposés sont des approches statistiques applicables essentiellement lors des phases d'esquisse des dispositifs. Ils permettent d'appuyer les choix de solutions techniques de restauration de la continuité écologique, ainsi que la priorisation des actions à conduire.

Mots clés : continuité écologique, passes à poissons, évaluation des coûts.

SYNTHESE OPERATIONNELLE

1) Contexte, enjeux et objectifs

L'atténuation des impacts des obstacles à l'écoulement sur la libre circulation piscicole va se traduire dans de nombreux contextes, par la construction de dispositifs dédiés à la montaison des poissons. Avec le classement des cours d'eau, c'est entre 8 000 et 12 000 ouvrages qui sont concernés dans les années à venir. De nombreux travaux scientifiques et techniques, ainsi que les 30 années de retour d'expériences sur le territoire permettent aujourd'hui de disposer des recommandations nécessaires au choix des dispositifs mais également à leur dimensionnement. En complément, il est apparu nécessaire d'aborder le coût des différents types de passes à poissons afin de disposer d'outils d'aide notamment vis-à-vis de la planification et la priorisation des actions.

La Direction du Contrôle des Usages et de l'Action Territoriale de l'Onema a répondu aux sollicitations des Agences de l'Eau en engageant, par l'intermédiaire du Pôle d'Ecohydraulique et des Délégations Régionales, un travail d'évaluation des coûts des passes à poissons déjà construites et de mise au point d'outils d'estimation de ces coûts. Le cabinet d'étude ECOGEA est intervenu en appui à ce travail.

2) Jeu de données et méthodes d'analyse

En 2001, le GHAAPPE (devenu depuis le Pôle d'Ecohydraulique) avait déjà conduit un travail d'évaluation des coûts et de construction d'outils de calcul sur 272 ouvrages existants. Ce travail avait permis de disposer d'outils pour les passes à bassins, les passes à ralentisseurs, les rivières de contournement et les pré-barrages.

Pour la présente étude, le travail a été réalisé en respectant plusieurs étapes :

- Collecte des données des projets de dispositifs de franchissement,
- Analyse des projets afin d'extraire :
 - les données techniques (données du génie civil, données hydrauliques, hauteur de chute, module, usages),
 - les données financières (coûts d'étude, de travaux (préparation chantier, réalisation, travaux connexes..)),
- Calcul des statistiques sur les coûts et mise en relation avec les caractéristiques techniques des projets, des obstacles et cours d'eau concernés,
- Mise en œuvre des outils d'estimation des coûts issus de l'étude 2001,
- Construction de nouveaux outils d'estimation des coûts.

Deux niveaux d'analyse des données ont été retenus :

- un niveau global permettant d'établir des relations entre les coûts de construction et des paramètres très généraux (hauteur de chute, module cours d'eau, type d'usage) (**outils utilisables à l'échelle d'études d'axe**). A cette échelle, une distinction a été apportée en fonction de la hauteur de chute de l'ouvrage :
 - seuils <1.5 m de hauteur de chute,
 - seuils compris entre 1,5m et 3 m de hauteur de chute,
- un niveau local à l'échelle de l'obstacle permettant des calculs sur la base des 1^{ers} éléments de choix du type de dispositif et de critères de dimensionnement (hauteur de chute, débit dans la passe, volume de génie civil, surface de la passe...)(**outils utilisables à l'échelle de l'ouvrage**),

Sur 239 ouvrages sélectionnés en 2011, seuls 114 ont été conservés dans l'analyse finale qui n'a pu être engagée qu'en 2014. Cette forte réduction du nombre de dossiers et le délais de l'étude sont essentiellement liées aux difficultés de récoltes de données techniques et financières complètes.

Les coûts des passes à poissons sélectionnées ont été pondérés en fonction de l'évolution de l'Indice des Travaux Publics (TP02) à la date du 01/01/2014.

$$\text{Coût}_{\text{au } 01-01-2014} = \text{Coût}_{\text{année } n} \times (\text{TP02}_{01-01-2014} / \text{TP02}_{\text{année } n})$$

En plus du coût total des travaux, plusieurs coûts ramenés aux caractéristiques des passes ont été calculés :

$$\text{Coût/m de chute} = \text{Coût}_{\text{au } 01-01-2014} / \text{hauteur de chute (en m)}$$

$$\text{Coût/m}^3 \text{ de GC} = \text{Coût}_{\text{au } 01-01-2014} / \text{volume GC (en m}^3\text{)}$$

$$\text{Coût/m de chute/QPAP} = [\text{Coût}_{\text{au } 01-01-2014} / \text{hauteur de chute}] / \text{QPAP}$$

$$\text{Coût/m}^3 \text{ de Blocs} = \text{Coût}_{\text{au } 01-01-2014} / \text{Volume Blocs (PEE et RIV).}$$

GC : génie civil de la passe QPAP : débit de la passe à l'étiage

PEE : Passe En Enrochement RIV : Rivière de contournement

Pour les 114 dossiers, ces coûts ont été obtenus majoritairement au stade des travaux (54%) mais également au stade projet, dossier de consultation des entreprise (DCE) voire avant-projet (10% des cas). Il a été possible pour certains dossiers (17/114) d'évaluer l'évolution des estimations de coûts entre le stade avant-projet, projet et l'exécution des travaux (en moyenne +50% entre APS et travaux et +10% entre le stade projet et les travaux).

3) Caractéristiques générales des ouvrages étudiés

La moitié des dispositifs sélectionnés :

- sont situés sur des cours d'eau de module variant entre 2,2 et 49,4 m³/s, des barrages de hauteurs variant entre 1,6 et 2,9 m de hauteur de chute,
- présentent des débits compris entre 150 et 900 l/s (médiane à 500 l/s) des pentes de 5,1 à 12% (médiane: 6,8%), une surface de 55 à 248 m² (médiane à 141 m²) et un volume de 93 à 557 m³ (médiane à 248 m³).

Ces valeurs sont proches de l'étude de 2001 avec toutefois une proportion plus importante en 2014 pour les rivières à plus fort module (>120 m³/s).

Les passes à bassin (PAB) représentent 41% des ouvrages étudiés, les passes en enrochement (PEE) et les passes à anguilles (PAA) respectivement 16 et 15%, les rivières de contournement 7% et les pré-barrages 4%.

La moitié des 114 passes à poissons étudiées ont :

- des coûts totaux de conception et de construction variant de 46 000 à 320 000€ (médiane à 130 000€)
- des coûts par m de chute variant de 27 000€ à 133 000€ (médiane à 69 000€/m de chute),
- des coûts par m³ de volume de génie civil variant de 700€ à 2 300€ (médiane à 1300€/m³).

Pour les ouvrages installés sur des seuils et barrages de hauteur faible à moyenne (<1,5 m) et des cours d'eau de module <30m³/s, les coûts totaux ne diffèrent pas significativement en fonction du type de passe. 50% des ouvrages présentent des coûts compris entre 30 et 110 K€ avec des coûts médians variant selon le type de passe entre 55 et 75 K€.

Ramenés aux m³ de génie civil, les coûts des passes à anguilles sont nettement plus élevés que pour les autres types de passes ceci du fait d'un volume relativement restreint. Ce sont ensuite les passes à bassins qui présentent un coût total médian par m³ de génie civil statistiquement supérieur à celui des rivières de contournement, des pré-barrages et des passes en enrochement. Là encore, cette différence est directement liée aux volumes de ces dispositifs qui sont en général plus réduits.

Ramenés au mètre de chute au barrage et au débit transitant dans les dispositifs, les coûts des passes à bassin, en enrochement et des rivières de contournement sont quasiment identiques, respectivement 190 et 150€/m de chute/l.s⁻¹.

4) Outils d'évaluation des coûts des passes à poissons à l'échelle d'un axe de cours d'eau

Le coût total et le coût ramené à la hauteur de chute augmentent significativement avec le module des rivières (entre 20 et 220 K€ et 15 et 105 K€ par m de chute pour 95% des passes des petits cours d'eau à faible module (<10 m³/s), entre 400 et 1675 K€ et 130 et 582 K€ par m de chute pour 95% des grandes rivières (module >120 m³/s),

Les coûts des passes ramenés à la hauteur de chute et au débit dans le dispositif diminuent significativement avec le module des cours d'eau. Dans les petites rivières de moins de 2 m³/s de module, 95% des passes construites ont coûté entre 0,15 et 0,6 K€ par m de chute au barrage et par l/s de débit dans la passe. Pour les grandes rivières (>120 m³/s), ces coûts se situent entre 0,15 K€ et 0,45 K€.

Sur la base de ces relations entre coût, module et hauteur de chute, un modèle général d'estimation du coût total des passes à poissons a été construit :

$$\text{Coût total (K€)} = 51.41(\pm 33.6) \times \text{Hauteur Chute(m)} + 4.95(\pm 1) \times \text{Module(m}^3\text{.s}^{-1})$$

avec $r^2 = 0.77$ ($p < 0.05$)

Les intervalles de confiance du modèle varient selon les situations de 33 à 55%. Ils sont plus importants pour les petits seuils et les rivières à faible module que pour les seuils plus élevés dans des cours d'eau à plus fort module.

Des modèles par classe de hauteur de chute ont également été construits.

→ Seuils <1,5 m de hauteur de chute.

$$\text{Coût Total (K€)} = 31.8 (\pm 9.1) \times \text{Hauteur Chute (m)} + 4.4 (\pm 1.15) \times \text{Module (m}^3\text{.s}^{-1})$$

avec $r^2 = 0.87$ ($p < 0.05$)

→ Seuils compris entre 1,5 m et 3 m de hauteur de chute

$$\text{Coût Total (K€)} = 58.9 (\pm 29.8) \times \text{Hauteur Chute (m)} + 4.3 (\pm 0.94) \times \text{Module (m}^3\text{.s}^{-1})$$

avec $r^2 = 0.78$ ($p < 0.05$)

La présence d'un dispositif vidéo conduit à une augmentation des coûts d'un facteur 1,5. A l'opposé, la construction d'une passe à poisson sur un seuil équipé d'une turbine hydroélectrique conduit en moyenne à un coût réduit de 20%.

5) Outils d'évaluation des coûts des passes à bassin

Le travail a été conduit sur 57 passes à bassins (37% de passes à jet de surface avec des échancrures latérales et des orifices noyés et 35% de passes à fente verticale).

La moitié des passes étudiées en 2013-2014 ont coûté entre 119 000 à 557 000€ (médiane à 240 000€) contre 72 000 à 225 000 en 2001 (médiane à 140 000€). Ramenés à la hauteur de chute, au volume de génie civil et au débit dans la passe, les coûts de 50% des dispositifs sont respectivement compris entre 49 000 et 219 000€ par m de chute

(médiane à 102 500€), 932 et 1834€ par m³ de génie civil (médiane à 1278€) et 133 et 272€ par m de chute et par l/s de débit.

Pour une même hauteur de chute et un même débit dans la passe, les ouvrages construits après 2001 ont coûté 55% plus cher que ceux construits avant 2001 (ceci en tenant compte de l'évolution de l'Indice des Travaux Publics). Ainsi, une passe à bassin de 100 000€ au 01/01/2001 coûterait au 01/01/2014 environ 245 000€.

Les passes à double fente verticale coûtent plus chères que les passes à simple fente verticale qui elles-même sont plus chères que les passes à échancrure. Ce constat tient directement au volume de ces ouvrages. Les coûts augmentent proportionnellement aux volumes des passes à bassins. D'ailleurs, il n'y a pas de différence significative de coûts par m³ de génie civil entre ces différents types d'ouvrages.

Le coût total et le coût par m de chute augmentent significativement avec la valeur du module du cours d'eau. Dans les grands cours d'eau (>120 m³/s), le coût médian par m de chute des passes à bassin s'élève à 425 000€ (50% entre 205 000 et 540 000€) alors qu'il est de 102 000 € (50% entre 65 000€ et 195 000€) pour des rivières de 30 à 60 m³/s, 55 000 € (50% entre 35 000€ et 90 000€) pour des rivières de moins de 10m³/s.

En revanche, à l'exception des petits cours d'eau (<2 m³/s de module), les coûts des passes à bassins ramenés à la hauteur de chute et au débit dans l'ouvrage ne diffèrent pas en fonction du module.

La même démarche de calcul que celle adoptée en 2001 basée sur le produit de la hauteur de chute et du débit dans la passe ou du volume de génie civil par les valeurs médianes, les déciles et les quartiles obtenus sur le jeu de données analysé a été conduite. Les valeurs de référence proposées sont indiquées dans le tableau suivant

	Valeurs de référence (en €/m de chute/l.s ⁻¹ dans la passe)	Valeurs de référence (en €/m ³ de génie civil)
1 ^{er} décile	117	654
1 ^{er} quartile	133	932
Médiane	189	1278
3 ^{ème} quartile	212	1834
Dernier décile	394	2239

6) Outils d'évaluation des coûts des passes en enrochement

Dix-huit passes en enrochement ont été sélectionnées (12 passes en enrochement régulièrement répartis (ERR), 5 passes en enrochement en rangées périodiques (RP), 1 passe mixte)

La moitié des passes étudiées ont coûté entre 41 000 à 243 000€ (médiane à 140 000€) soit de 41 000 à 108 000€ par m de chute (médiane à 63 500€), de 389 à 735€ par m³ de génie civil (médiane à 527€), et de 88 à 203€ par m de chute et par l/s de débit.

Les coûts par volume de génie civil sont environ 50% inférieurs à ceux des passes à bassins. Toutefois, il faut souligner qu'à l'exception des forts modules (>60 m³/s), le volume des passes en enrochement est 1.5 à 4 fois plus important que celui des PAB pour une même hauteur de chute et un même débit transitant dans la passe.

Du fait d'un plus important volume de blocs utilisés, les passes en enrochements régulièrement répartis coûtent plus chères que les passes à rangées périodiques.

Les coûts par m de chute augmentent significativement avec la valeur du module du cours d'eau. Dans les grands cours d'eau (60-120 m³/s), le coût médian par m de chute s'élève à 221 000€ (50% entre 101 000 et 458 000€) alors qu'il est de 140 000 € (50% entre 70 000€ et 195 000€) pour des rivières de 30 à 60 m³/s, 61 000 € (50% entre 31 000€ et 103 000€) pour des rivières de moins de 10m³/s.

Les coûts totaux augmentent en fonction de la longueur de l'ouvrage, de la surface, du volume de génie civil, du volume de blocs et du débit.

La méthode d'estimation basée sur le produit de la hauteur de chute, du débit et du volume du génie civil avec les coûts médians, les 1^{er} et 3^{ème} quartile ainsi que les 1^{er} et dernier décile a également été appliquée.

	Valeurs de référence (en €/m de chute/l.s ¹ dans la passe)	Valeurs de référence (en €/m ³ de génie civil)	Valeurs de référence (en €/m ³ de blocs)
1 ^{er} décile	60	311	607
1 ^{er} quartile	88	389	701
Médiane	148	527	1046
3 ^{ème} quartile	203	735	1719
Dernier décile	396	1076	2402

7) Outils d'évaluation des coûts des rivières de contournement et des pré-barrages

Seulement 8 rivières de contournement et 5 pré-barrages ont pu être étudiés:

La moitié des rivières de contournement étudiées ont des coûts totaux compris entre 189 000€ et 950 000€ (médiane à 413 000€). Les coûts médians des pré-barrages sont de 77 000€ et 59 €/m de chute et par l.s¹ de débit dans le dispositif (coût très proche de celui de 2001).

Les coûts totaux des rivières de contournement augmentent en fonction de la largeur, de la surface, du volume, du débit et de la pente des ouvrages ainsi que de la chute et du module de la rivière. Les meilleures relations statistiques sont obtenues avec la largeur et la surface de la passe.

Nous n'avons pu construire qu'un modèle statistique d'estimation des coûts totaux utilisant comme variable la largeur et la pente de la rivière de contournement.

$$\text{Coût total (K€)} = (-131.55 (\pm 59) \times \text{pente (\%)}) + (133.06 (\pm 60) \times \text{largeur RC (m)})$$

Avec $r^2 = 0.92 (p < 0.05)$

Pour les pré-barrages, l'approche de 2001 a été reprise sur la base du produit de la hauteur de chute et du débit dans la passe par les coûts médians ainsi que les 1^{er} et dernier déciles.

	Valeurs de référence (en €/m de chute/l.s ⁻¹ dans la passe)
1 ^{er} décile	67
Médiane	20
Dernier décile	741

8) Outils d'évaluation des coûts des passes à anguilles

Dans cette étude, 17 passes à anguille (8 passes piège, 7 rampes installées sur un canal en génie civil avec des substrats à brosse, 1 rampe sur un canal en préfabriqué (canal léger), 1 rampe rustique en enrochement) ont été étudiées

La moitié des passes à anguilles ont un coût compris entre 30 000 et 51 000 € (médiane à 42 000€).

Le coût des passes piège est très homogène quelque soit la hauteur de chute à franchir (entre 40 000€ et 50 000€).

Pour les rampes installées sur des canaux en génie civil, les coûts augmentent avec la hauteur de chute. Pour ces passes, deux outils statistiques d'estimation des coûts ont été construits.

$$\text{Coût total (K€)} = 2.69 (\pm 0.53) \times \text{Longueur dev. (m)}$$

$$\text{Avec } r^2 = 0.89 (p < 0.05)$$

$$\text{Coût total (K€)} = 2.53 (\pm 1.06) \times \text{Surface rampe (m}^2\text{)}$$

$$\text{Avec } r^2 = 0.65 (p < 0.05)$$

Le coût des passes à anguilles peut également être approché au travers des coûts des substrats artificiels utilisés pour les rampes. Actuellement, 2 types de substrats sont recommandés, les brosses et les plots. Les coûts au m² installés varient de 250 à 500€.

9) Quelques éléments sur le détail des coûts.

Le coût total d'une passe à poisson peut être détaillé successivement en coût d'étude, d'installation de chantier et de réalisation. Les études respectent normalement une chronologie :

- les approches globales (souvent à l'échelle d'un axe de rivière) qui permettent d'effectuer les choix en matière de solutions techniques et de réaliser les esquisses des dispositifs,
- les approches à l'échelle de l'ouvrage qui doivent aboutir au dimensionnement du dispositif (phase projet et dossier de consultation des entreprises),
- les études de maîtrise d'œuvre (assistance pour la passation des contrats de travaux (ACT), examen de conformité visa des plans d'exécution de l'entreprise (VISA), direction de l'exécution du contrat de travaux (DET), assistance lors des opérations de réception (AOR)),
- les études spécifiques à la phase travaux (études béton notamment).

Le coût peut être calculé par ouvrage avec une fourchette variant de 8 000 à 15 000€ pour 75% des dispositifs pour les études globales et le dimensionnement et un pourcentage pour les études de maîtrise d'œuvre variant de 10 à 20% selon le montant du dispositif.

Il est également possible d'identifier des coûts d'installation et d'isolement de chantier. Pour 90% des passes construites, ces coûts varient de 10 à 26% du coût total des travaux.

10) Limites des outils proposés.

Les outils d'estimation des coûts proposés à l'issue de ce travail restent des approches statistiques applicables essentiellement à des échelles globales permettant d'aboutir à la phase esquisse des dispositifs. Ils doivent apporter des éléments quant au meilleur choix des solutions techniques de restauration de la continuité écologique ainsi qu'à la priorisation des actions à conduire.

Le travail a permis d'observer une augmentation significative des coûts des passes à poissons depuis l'étude de 2001, augmentation supérieure à celle de l'Indice des Travaux Publics. Ceci peut être attribué partiellement à des changements dans les préconisations de dimensionnement relatives à des attentes plus fortes vis-à-vis de l'efficacité des dispositifs mais d'autres facteurs sont intervenus. Il semble important, au vu de l'ampleur des futurs travaux sur la continuité écologique d'engager un travail plus approfondi sur l'optimisation des coûts de ces dispositifs notamment par le jeu des échelles de travail, du regroupement dans la réalisation des travaux et du développement technologique.

1 Rappels du contexte et objectifs de l'étude

1.1 Rappels du contexte

Les enjeux de restauration et d'atténuation des effets des obstacles sur la continuité écologique et plus particulièrement sur la libre circulation des poissons sont essentiels pour l'état des masses d'eau et la restauration des stocks de certaines espèces piscicoles.

Au travers d'une réglementation et d'une politique publique ambitieuses basées sur le classement des cours d'eau et la mise en œuvre de la trame bleue, des actions vont être engagées sur de nombreux obstacles à l'écoulement dans les cours d'eau d'ici à 2017 (8000 et 12000 ouvrages concernés). Certaines de ces actions vont se traduire par la construction de dispositifs dédiés à la montaison des poissons. Si les recommandations quant au choix et au dimensionnement des différentes solutions techniques existent grâce notamment aux travaux du Pôle d'Ecohydraulique de l'Onema, il est apparu nécessaire de disposer d'outils permettant d'approcher le coût des dispositifs dans le cadre d'études diagnostic à l'échelle des axes de cours d'eau et de l'obstacle.

En 2001, le GHAAPPE (Groupement d'Hydraulique Appliquée aux Aménagements Piscicoles et à la Protection de l'Environnement) a réalisé une étude portant sur le coût des dispositifs construits entre 1990 et 2000 (Voegle et al. 2001)¹. Deux-cent-soixante-douze ouvrages avait été analysés. Ce travail a permis de disposer d'outils de calcul basés sur les principales caractéristiques des ouvrages (hauteur de chute, débit dans la passe, volume du génie civil). Pour autant, les outils étaient principalement centrés sur les passes à bassin, les passes à ralentisseurs et les pré-barrages. Les passes en enrochement plus récentes en matière de conception, ainsi que les passes à anguilles n'avaient pas été abordées. Il était donc nécessaire, au moment de la mise en œuvre de programmes ambitieux de restauration de la continuité, de disposer de nouveaux outils d'estimation des coûts mis à jour pour tous les types d'ouvrages et tenant compte de l'évolution des coûts d'étude et de construction.

A la demande des Agences de l'Eau, la Direction Générale de l'Onema au travers de sa Direction du Contrôle des Usages et de l'Action Territoriale a sollicité le Pôle d'Ecohydraulique de Toulouse qui, en collaboration, avec le cabinet d'étude ECOGEA a conduit le présent travail.

1.2 Objectifs

L'étude porte sur un ensemble de dispositifs de rétablissement de la libre circulation piscicole à la montaison construits depuis 2001 et a pour objectif :

- d'analyser les coûts de construction par types de passes à poissons,
- de comparer les coûts avec ceux estimés par les outils issus des études de 2001,
- de construire de nouveaux modèles d'estimation des coûts à différentes échelles de travail (étude globale d'axe, étude à l'ouvrage),
- d'analyser les principaux coûts intervenant dans la construction d'un ouvrage.

¹ Voegtli B, Pallo S et Larinier M, 2001. Coût des passes à poissons et méthodes constructives. Rapport GHAAPPE RA.01.08 / MIGADO G11-01-RT.

1.3 Plan du rapport

Ce rapport présente les principaux résultats obtenus. Après un rappel du contexte et des objectifs, le jeu de données et les méthodes d'analyses sont décrites. Dans la 3^{ème} partie, les résultats sont présentés selon les 2 échelles d'analyse (étude d'axe, étude à l'obstacle) en détaillant à l'obstacle selon les types de passes à poissons. La dernière partie est consacrée à une discussion sur les principaux coûts d'étude et de construction.

2 Présentation du jeu de données et méthodologies d'analyses

2.1 La méthode de travail

Le travail a été conduit en respectant plusieurs étapes :

- Collecte des données des projets de dispositifs de franchissement construits entre 2001 et 2014 et retenus selon les critères d'analyse fixés,
- Analyse des projets afin d'extraire :
 - les données techniques permettant de caractériser les dispositifs de franchissement (données du génie civil, données hydrauliques) et les seuils et barrages concernés (hauteur de chute, module, usages),
 - les données financières permettant d'approcher les différentes composantes des coûts (coûts d'étude, de travaux [préparation chantier, réalisation, travaux connexes...]),
- Calcul des statistiques sur les coûts et mise en relation avec les caractéristiques techniques des projets et des seuils et cours d'eau concernés,
- Mise en œuvre des outils d'estimation des coûts issus de l'étude 2001,
- Construction de nouveaux outils d'estimation des coûts.

Les analyses ont été conduites à deux niveaux :

- un niveau global permettant d'établir des relations entre les coûts de construction et des paramètres très généraux (hauteur de chute, module cours d'eau, type d'usage) (**outils utilisables à l'échelle d'études d'axe**). A cette échelle, une distinction a été apportée en fonction de la hauteur de chute de l'ouvrage :
 - seuils < 1.5 m de hauteur de chute,
 - seuils compris entre 1,5 m et 3 m de hauteur de chute,
- un niveau local à l'échelle de l'ouvrage permettant des calculs sur la base des 1^{ers} éléments de choix du type de dispositif et de critères de dimensionnement (hauteur de chute, débit dans la passe, volume de génie civil, surface de la passe...) (**outils utilisables à l'échelle de l'ouvrage**).

2.2 La récolte des données

Les étapes de la récolte et de l'analyse ont été placées sous la responsabilité :

- du Pôle d'Ecohydraulique pour la récolte
- du Pôle d'Ecohydraulique + ECOGEA pour l'analyse,

Etapes	Objectifs	Intervenants	Résultats et durée
1: liste ouvrage	<i>Etablir une liste d'ouvrages sur lesquels les données seront collectées</i>	Pôle, Dir Onema, Agences de l'Eau	239 ouvrages -05-2011 au 12-2012
2: Pré-sélection des ouvrages	<i>Pré-sélectionner les ouvrages pertinents</i>	Pôle, ECOGEA	211 ouvrages - 01-2012 au 04-2012
3: Collectes des données	<i>Collecter les données techniques et financières par ouvrage</i>	Pôle, Dir Onema, Agences de l'Eau,	170 ouvrages mais seulement 126 complets (TECH+FIN) 05-2012 au 02-2014
4: Sélection def. ouvrages	<i>Sélectionner les ouvrages pertinents avec toutes les données</i>	Pôle, ECOGEA	101 ouvrages retenus présentant des données fiables
4: Analyse des données	<i>Analyser les données techniques et financières</i>	Pôle, ECOGEA	114 ouvrages étudiés car récupération de 13 ouvrages 04-2012 au 06-2014
5: Restitution	<i>Restituer les outils d'estimation des coûts</i>	ECOGEA	

Tableau 1 : Etapes de la collecte des données.

Dans le cadre de la réalisation de ce travail et contrairement à celui de 2000-2001, il a été décidé de réaliser une collecte des données en s'appuyant sur des correspondants dans les DiR Onema et les Délégations des Agences de l'Eau. En 2000-2001, la collecte avait été conduite directement par un chargé de mission du pôle qui s'était déplacé dans les différentes délégations. Ce choix basé sur une limitation des coûts s'est avéré compliqué à gérer avec une remontée parfois difficile des informations, notamment les informations financières disponibles dans les Agences de l'Eau. Certains maîtres d'ouvrage ont été sollicités directement pour la remontée des dossiers de passes à poissons.

Le travail a débuté en mai 2011 par une phase de pré-sélection de dossiers. A la fin de l'année 2011, 239 passes à poissons avaient été identifiées pour finalement ne retenir que 211 dossiers en avril 2012 qui constituaient donc la base pour l'obtention des informations techniques et financières.

Pratiquement deux années ont été nécessaires pour finalement récolter des informations techniques et financières fiables et complètes sur 101 ouvrages (48%) auxquels ce sont ajoutés 13 ouvrages récupérés en 2014.

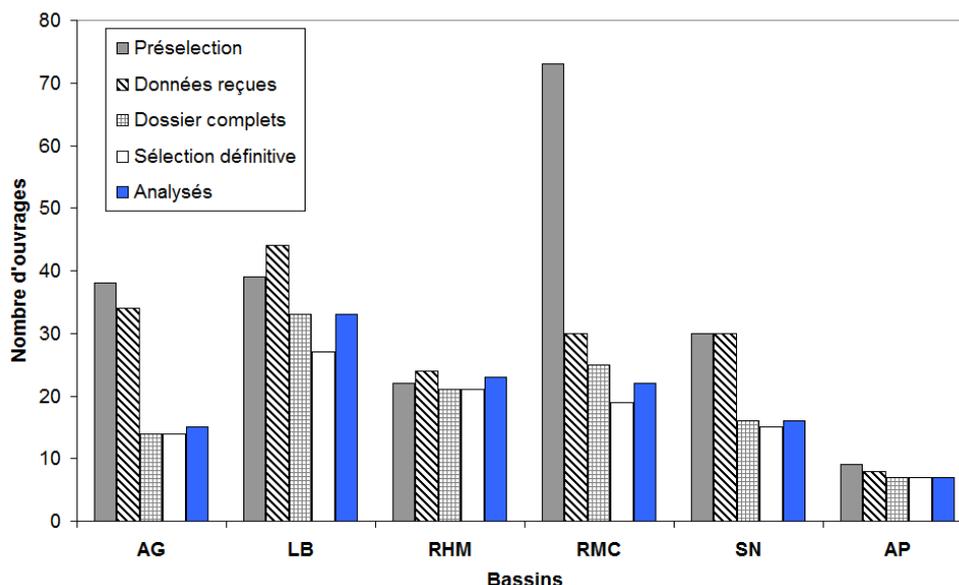


Figure 1 : Nombre d'ouvrages sélectionnés en fonction des différents critères de tri et par Agence de bassin. A titre comparatif, le travail du chargé de mission avait permis en 2001 d'analyser 272 ouvrages.

Globalement, la collecte des données a permis d'obtenir des informations couvrant l'ensemble du territoire national avec toutefois deux bassins moins bien représentés malgré leur couverture géographique, le bassin Adour-Garonne avec 15 ouvrages et le bassin Seine-Normandie avec 16 ouvrages.

Au total 114 passes à poissons ont pu être analysées réparties sur l'ensemble du territoire national. Le travail a laissé apparaître :

- *une identification des ouvrages assez rapide grâce aux connaissances des DIR Onema,*
- *une récolte des données extrêmement difficile et longue :*
 - *Données techniques : les DIR Onema ne disposent pas toujours des données techniques complètes et notamment des dernières versions des projets. Ils n'ont que rarement accès au recollement quand celui-ci a été effectué.*
 - *Données financières : les DIR Onema n'ont souvent que des devis.*

Au niveau des Agences de l'Eau l'accès aux données est difficile en raison des archivages de dossiers.

2.3 Les données récoltées

2.3.1 Données techniques

Pour chaque ouvrage, des données permettant de caractériser le dispositif ont été récoltées tant au niveau des informations géographiques générales qu'au niveau des caractéristiques spécifiques de l'ouvrage et de son dimensionnement.

Concernant les données de débit dans les passes, la valeur retenue correspond au débit transitant dans le dispositif pour une situation de cote normale d'exploitation (cas des centrales hydroélectriques, des barrages de navigation) ou pour une situation d'étiage (cas des passes en enrochement notamment).

<i>Données géographiques générales</i>	<i>Données spécifiques à la passe</i>	<i>Données du dimensionnement (dispositifs concernés)</i>
<i>Bassin hydrographique</i>	<i>Hauteur chute en m</i>	<i>Longueur passe en m (toutes PAP)</i>
<i>Date construction</i>	<i>Type de PAP</i>	<i>Nombre de chutes (PAB, PB)</i>
<i>Nom ouvrage</i>	<i>Sous_Type PAP</i>	<i>(PAB, PB)</i>
<i>Code ROE ouvrage</i>	<i>PréBarrage asso.</i>	<i>Pente en % (PAR, PER, RIV)</i>
<i>DIR Onema</i>	<i>Débit Passe en m³/s</i>	<i>Chute inter_bassin en m (PAB, PB)</i>
<i>Département</i>	<i>Vidéo_comptage</i>	<i>Longueur des bassins en m (PAB, PB)</i>
<i>Rivière</i>	<i>Attrait</i>	<i>Largeur des bassins ou de la rampe en m (toutes PAP)</i>
<i>Module en m³/s</i>	<i>Débit d'Attrait m³/s</i>	<i>Hauteur de la passe en m (toutes PAP)</i>
		<i>Surface de la passe en m² (toutes PAP)</i>
		<i>Volume de la passe en m³ (volume Génie Civil) (toutes PAP)</i>
		<i>Nombre de dissipateurs (PER)</i>
		<i>Volume de Blocs en m³ (PER)</i>
		<i>Puissance Dissipée W/m³ (PAB, PB)</i>

Tableau 2 : Caractéristiques des données récoltées pour chaque passe à poissons.

2.3.2 Données financières

Selon les dispositifs, les données sur les coûts ont été récoltées à différents stades du projet (Avant Projet Sommaire (APS), Projet (PRO), Dossier Consultation des Entreprises(DCE), Travaux (TR) (54% des dossiers étudiés)). Il a également été parfois possible de distinguer le coût des travaux, du coût des études, mais cela malheureusement pour assez peu de dossiers. De même, le détail des coûts n'a qu'assez rarement permis de séparer les coûts de mise en place du chantier, de ceux de la construction.

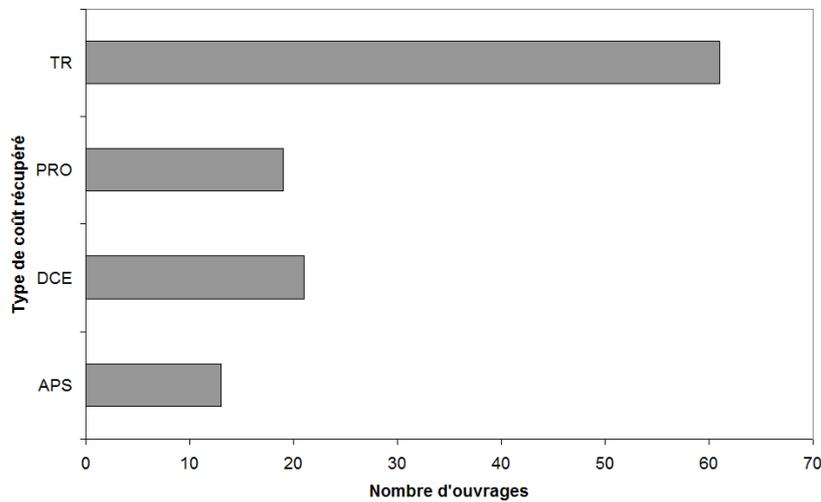


Figure 2 : Nombre d'ouvrages étudiés par type de coût ayant pu être récupéré.

Sur 17 dossiers, nous avons pu obtenir les coûts à différents stades du projet depuis l'APS jusqu'aux travaux. Cela a permis de voir l'évolution. En général, les coûts estimés au stade APS sont 50% inférieurs à ceux réellement constatés lors des travaux. A partir des stades Projet et DCE, les coûts évoluent nettement moins par rapport aux travaux (+10% d'augmentation seulement). Cette forte augmentation des coûts entre les APS et les travaux peut être liée à trois facteurs :

- le décalage dans le temps entre la phase avant-projet et la réalisation effective des travaux (parfois 2 à 3 ans), décalage qui se traduit par une augmentation liée directement à celui de l'Indice des Travaux Publics,
- une évaluation incomplète des contraintes du chantier notamment en termes d'implantation et de dispositions constructives,
- et des modifications importantes apportées à l'avant-projet qui parfois ne satisfait pas totalement aux critères de dimensionnement des ouvrages de franchissement.

2.4 Les variables analysées

Plusieurs variables de coûts ont été analysées et modélisées. Mais, avant toute analyse, il était indispensable de pondérer les coûts en fonction de l'évolution de l'Indice des Travaux Publics (TP02). Pour cela, les coûts de chaque passe à poisson ont été réévalués à la date du 01/01/2014.

$$\text{Coût}_{\text{au 01-01-2014}} = \text{Coût}_{\text{année n}} \times \left(\frac{\text{TP02}_{01-01-2014}}{\text{TP02}_{\text{année n}}} \right)$$

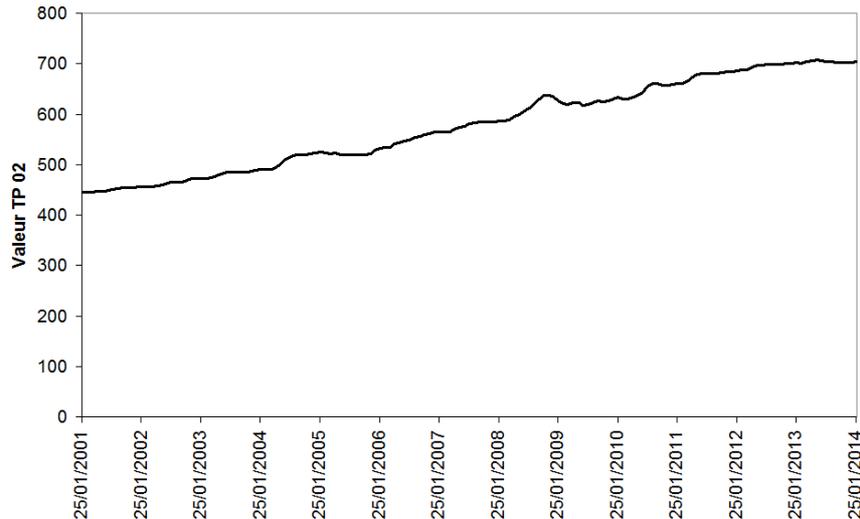


Figure 3 : Evolution de l'Indice des Travaux Publics (TP02) depuis le 01/01/2001.

L'indice est passé d'une valeur de 453.4 à 703.9 entre 2001 et 2014 soit une augmentation de 55%.

En plus du coût total des travaux, plusieurs coûts ramenés aux caractéristiques des passes ont été calculés :

Coût/m de chute = $\text{Coût}_{\text{au } 01-01-2014} / \text{hauteur de chute (en m)}$

Coût/m³ de GC = $\text{Coût}_{\text{au } 01-01-2014} / \text{volume GC (en m}^3\text{)}$

Coût/m de chute/QPAP = $[\text{Coût}_{\text{au } 01-01-2014} / \text{hauteur de chute}] / \text{QPAP}$

Coût/m³ de Blocs = $\text{Coût}_{\text{au } 01-01-2014} / \text{Volume Blocs (PEE et RIV)}$

GC : génie civil de la passe QPAP : débit de la passe à l'étiage

PEE : Passe En Enrochement RIV : Rivière de contournement

2.5 Méthodes statistiques

L'objectif des analyses statistiques a été de décrire les coûts et de rechercher les facteurs explicatifs de variations de coût observé. Une 1^{ère} étape d'analyse descriptive des données a été conduite sur la base des statistiques générales (moyenne, écart-type, variance, quartiles, déciles, distribution) ainsi que d'approches comparatives et corrélatives utilisant des méthodes paramétriques et non paramétriques selon la normalité des données.

Dans un deuxième temps, une approche prédictive a été menée afin de construire des outils d'estimation des coûts. Cette approche s'est basée sur des modèles de régression.

2.6 Méthodes de construction des outils d'estimation des coûts

Deux types d'outils sont proposés selon l'échelle d'approche (axe de rivière, ouvrage) :

- **Axe de rivière** : un outil basé sur des modèles statistiques permettant de calculer le coût d'un ouvrage sur la base de variables propres à l'aménagement concerné (hauteur de chute, module de la rivière, l),
- **Ouvrage** : un outil basé sur les valeurs médianes, les 1^{er} et 3^{ème} quartiles et 1^{er} et derniers déciles des coûts par m de chute et par l/s de débit dans la passe et des coûts par m³ de génie civil (méthode utilisée en 2001).

3 Résultats

3.1 Caractéristiques des 114 dossiers sélectionnés

3.1.1 Caractéristiques générales des seuils et barrages étudiés.

Les 114 seuils et barrages étudiés présentent une moyenne de hauteur de chute de 2,75 m (50% des ouvrages à moins de 2,04 m) pour des modules de rivière de 42,4 m³/s (50% à moins de 12 m³/s). 50% des dispositifs sont situés sur des cours d'eau de module variant entre 2,2 et 49,4 m³/s et des barrages de hauteurs variant entre 1,6 et 2,9 m de hauteur de chute. Ces valeurs sont assez proches de celles obtenues lors de l'étude de 2001 avec toutefois une proportion plus importante en 2014 pour les rivières à plus fort module (>120 m³/s).

	Chute	Module
Moyenne	2,75	42,4
Mediane	2,07	12
Min	0,7	0,07
Max	19,7	480
1er quartile	1,6	2,2
3ème quartile	2,9	49,4
1er décile	1,2	1,1
Dernier décile	4,2	109,8

Tableau 3 : Caractéristiques générales des 114 seuils et barrages étudiés.

3.1.2 Les types de passes étudiées

Les 114 dispositifs étudiés restent dominés par les passes à bassin (PAB) qui représentent 41% des ouvrages. Les passes en enrochement (PEE) et les passes à anguilles (PAA) constituent respectivement 16% et 15% des dossiers. En 2001, les passes en enrochement n'avaient pas été analysées du fait de la quasi-absence de construction de ce type de dispositif.

L'échantillon obtenu permet de représenter tous les types de passes à poissons. Toutefois, d'un point de vue statistique, il reste assez modeste pour les catégories des passes à anguille et des passes en enrochement, ce qui limitera la validité statistique des outils d'estimation des coûts développés pour ces 2 types d'ouvrages.

Concernant le cas des passes à ralentisseurs ou passes à bassins doublés de passes à anguille (PAR+PAA, PAB+PAR), soit nous disposons des coûts distinctifs pour les 2 types d'ouvrage, soit nous avons estimé le coût de la passe à anguille sur la base des outils développés pour ces dispositifs et les avons retrancher du coût total pour individualiser les passes à ralentisseurs ou les passes à bassins.

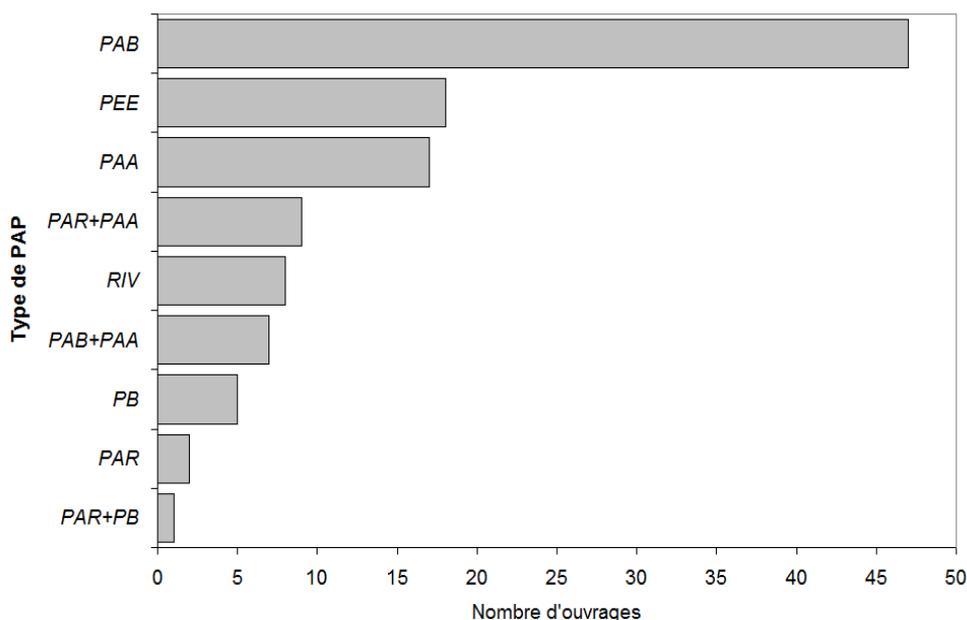


Figure 4 : Nombre de dispositifs de franchissement étudiés par type de passes.
PAB : passe à bassin ; PEE : passe en enrochement ; PAA : passe à anguille ; PAR : passes à ralentisseurs ; RIV : rivière de contournement ; PB : pré-barrages.

3.1.3 Caractéristiques générales des passes à poissons étudiées.

50% des passe étudiées (hors passes à anguille soit 97 ouvrages) présentent des débits compris entre 150 et 900 l/s (médiane : 500 l/s) pour des pentes de 5,1% à 8,3% (médiane : 6,8%), une surface de 55 à 248 m² (médiane : 141 m²) et un volume de 93 à 557 m³ (médiane : 248 m³).

	Débit dans la passe (m ³ /s)	Pente (%)	Surface de la passe (en m ²)	Volume de la passe (en m ³)
Moyenne	0.76	7.5	257	468
Médiane	0.5	6.8	141	248
1 ^{er} quartile	0.15	5.1	55	93
3 ^{ème} quartile	0.9	8.3	248	557

Tableau 4 : Caractéristiques générales des 97 passes étudiées (hors passes à anguille (PAA)).

Les passes les plus volumineuses sont des rivières de contournement avec des débits de l'ordre de 5 m³/s pour des surfaces de plus de 4000 m² et des volumes de 8000 m³.

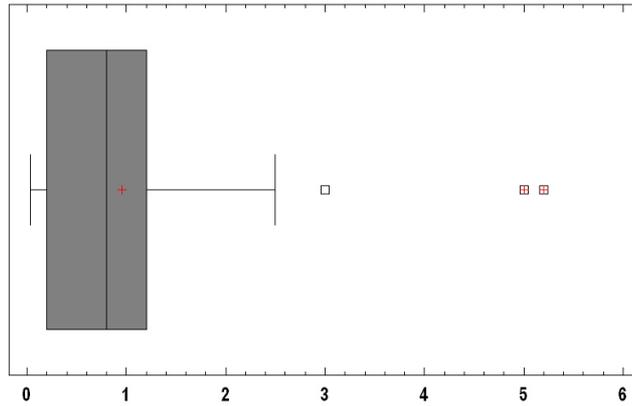


Figure 5 : Caractéristiques générales des débits transitant dans les 97 passes étudiées (hors PAA).

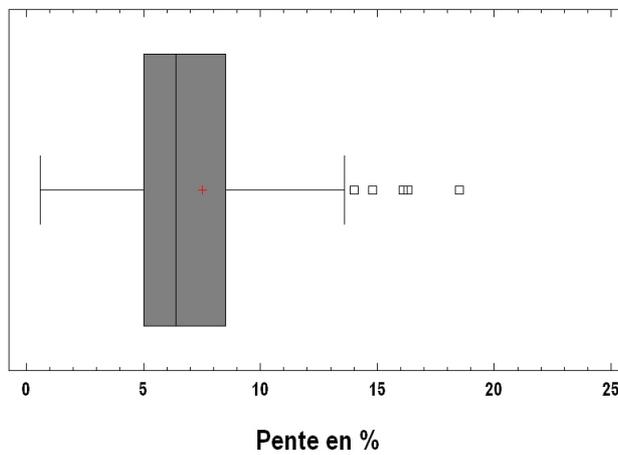


Figure 6 : Caractéristiques générales des pentes des 97 passes étudiées (hors PAA).

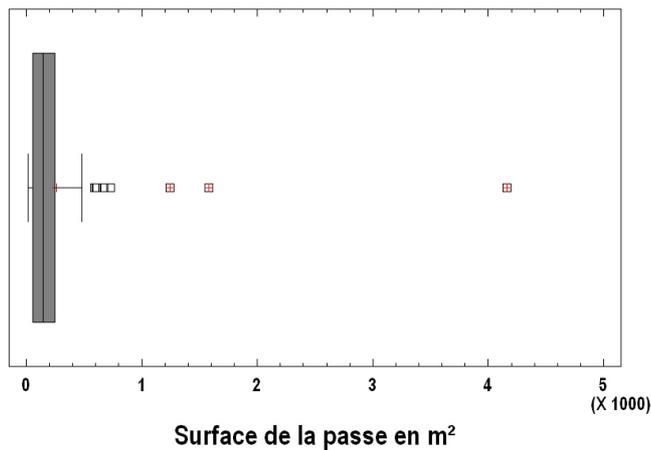


Figure 7 : Caractéristiques générales des surfaces des 97 passes étudiées (hors PAA).

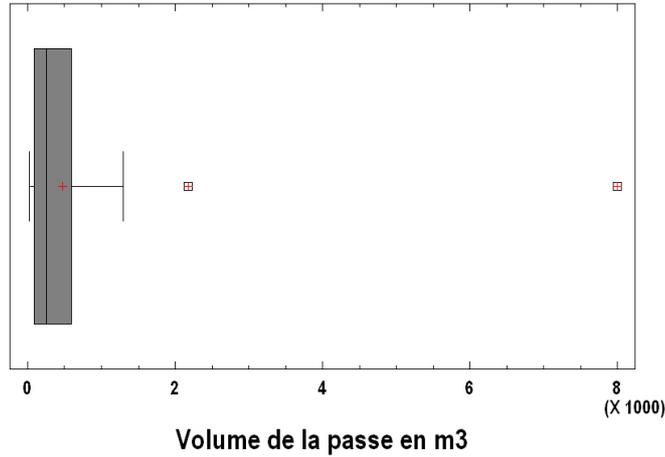


Figure 8 : Caractéristiques générales des volumes dans les 97 passes étudiées (hors PAA).

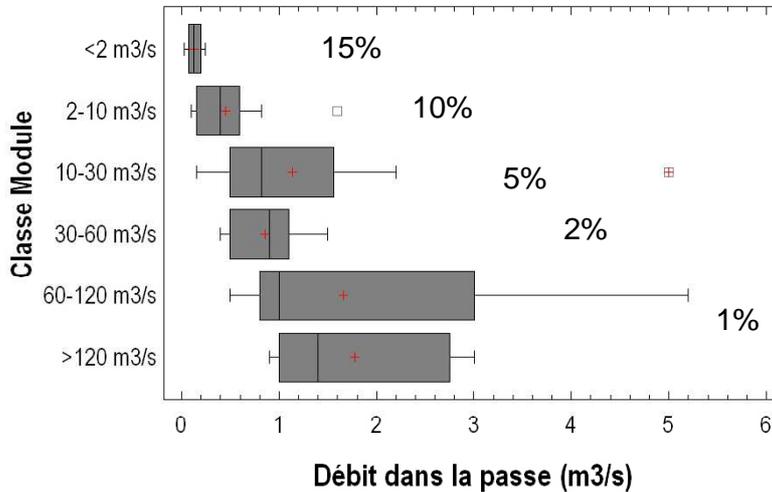


Figure 9 : Débits transitant dans les passes en fonction des modules des rivières. Les pourcentages correspondent à la valeur moyenne du débit des passes ramenée au module de la rivière

Les débits transitant dans les dispositifs de montaison étudiés augmentent globalement avec les modules des rivières. Cela s'explique par le fait que, pour rester attractifs, les débits transitant dans les dispositifs doivent rester à l'échelle des débits du cours d'eau. En pourcentage, les valeurs diminuent tout de même vers les plus gros cours d'eau, du fait des limitations sur la taille et les coûts des dispositifs. Les valeurs médianes varient ainsi de 15% pour les petites rivières de moins de 2 m³/s de module, à 1-1.5% du module pour les cours d'eau de plus de 60 m³/s de module.

En revanche, les débits ne diffèrent pas statistiquement entre les 4 principaux types de passes (passes à bassin, passes en enrochement, rivière de contournement et pré-barrages).

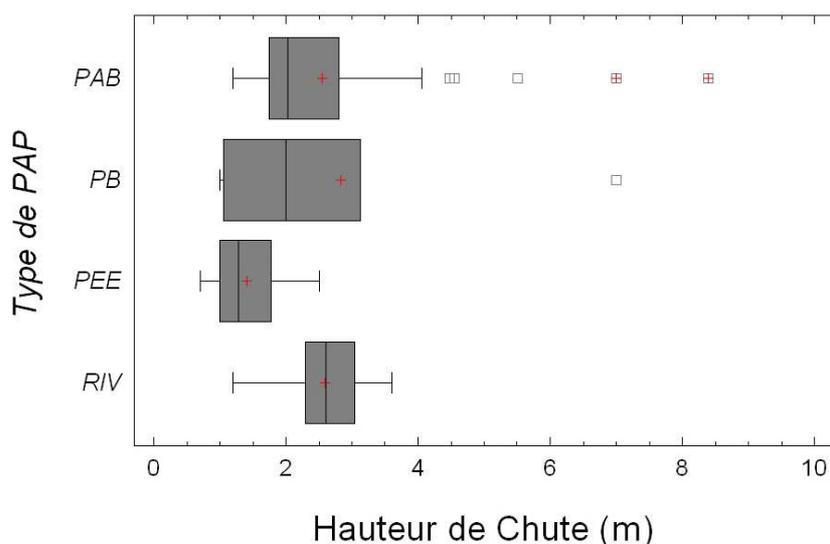


Figure 10 : Hauteurs de chute des barrages équipés en fonction des différents types de passes.

Les passes en enrochement équipent des seuils et barrages de hauteurs significativement inférieures à celles des autres ouvrages équipés de passes à bassin, de rivière de contournement ou de pré-barrages. Ces observations sont conformes aux préconisations de dimensionnement qui spécifient que les passes en enrochement sont essentiellement réservées à des seuils de hauteur < 2,5-3 m (Larinier et al. 2006²). Il faut ajouter à cela le cas des pré-barrages. Si parmi les 5 dossiers, on retire le cas des pré-barrages du seuil de Cau amont (64) (association d'une passe à bassin et de pré-barrages pour une hauteur de chute totale de 9,8 m), les 4 autres pré-barrages équipent des ouvrages de hauteurs réduites (1,5 m). En 2001, les 25 pré-barrages étudiés correspondaient déjà à des seuils de hauteur assez faible (1,75 m de chute médiane). Ces observations sont là encore conformes aux recommandations fournies quant au choix du type de dispositif en fonction de la hauteur de chute au barrage.

3.2 Les coûts globaux des 114 ouvrages étudiés

3.2.1 Statistiques générales

50% des 114 passes à poissons étudiées ont des coûts totaux de conception et de construction variant de 46 000 à 320 000 € (médiane à 130 000 €) et pour 90% des dispositifs les coûts varient de 36 000 à 621 000 €. Ramené à la hauteur de chute du barrage, les coûts de la 50% des dispositifs varient de 27 000 € à 133 000 €/m de chute (médiane à 69 000 €/m de chute), tandis que pour le volume de génie civil ces coûts varient de 700 € à 2 300 €/m³ de volume de la passe (médiane à 1 300 €/m³).

Le plus faible coût enregistré est de 12 300 € pour une passe à anguille et le plus élevé de 4 millions € pour une passe à bassin sur la Seine aval.

² Larinier M, Courret D et Gomes P, 2006. Guide technique pour la conception des passes « naturelles ». Rapport GHAAPPE RA.06.05-V1. (www.onema.fr/IMG/pdf/2006_060.pdf).

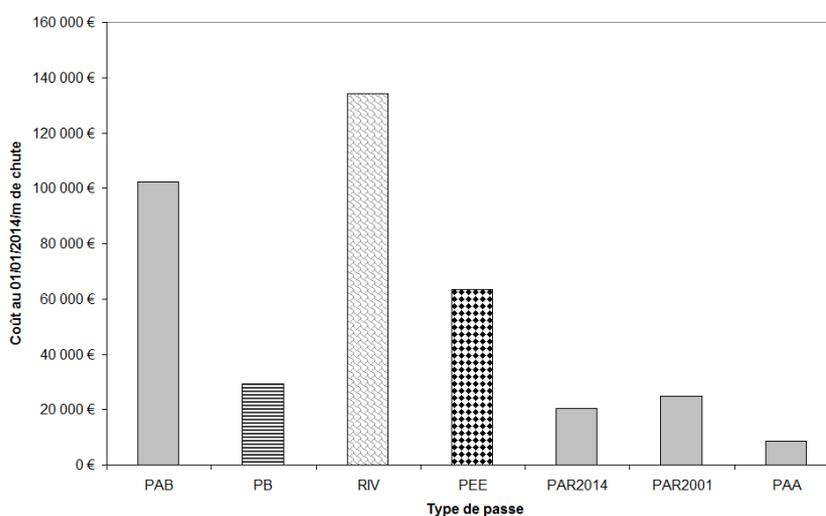
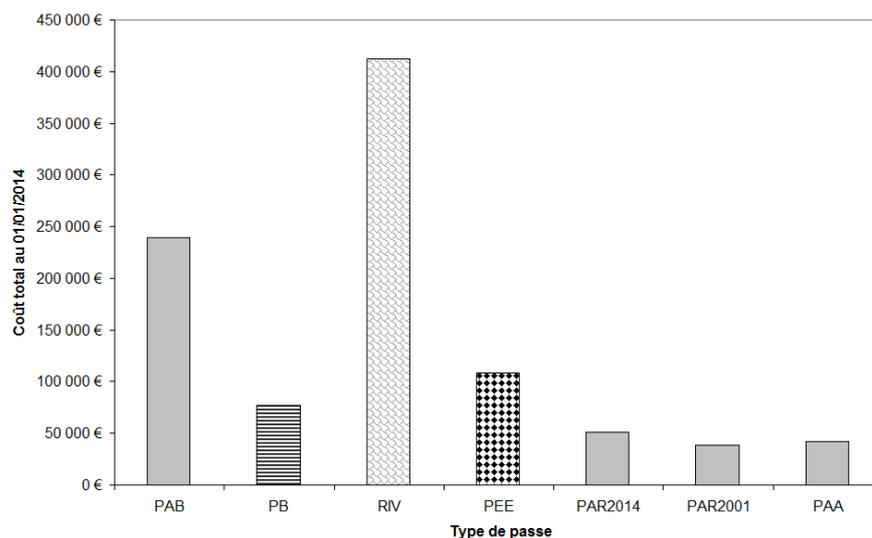


Figure 11 et Figure 12 : Coût médian total et par mètre de chute des différents types de passes étudiées.

Les coûts totaux médians (ajout passes à ralentisseurs de l'étude de 2001) sont statistiquement plus élevés pour les rivières de contournement par rapport aux autres types d'ouvrages. Cela tient essentiellement aux dimensions de ces dispositifs qui sont très souvent construits sur des rivières à forts débits et qui présentent donc ainsi des dimensions importantes. Ces observations sont confirmées par l'analyse des coûts par m de chute où il n'existe pas de différences statistiques de coût total entre les types de passes.

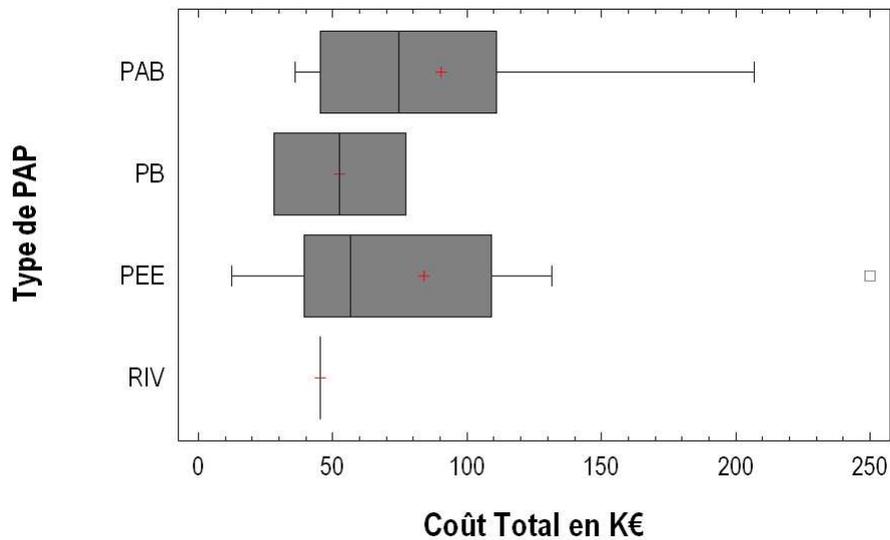


Figure 13 : Coût total par type de passe à poisson et pour les seuils de faible hauteur (< 1,5 m) et les rivières de module < 30 m³/s

Lorsque l'on s'intéresse aux ouvrages installés sur des seuils et barrages de hauteur faible à moyenne (< 1,5 m)(27 seuils) et des cours d'eau de module < 30 m³/s, on constate que les coûts totaux ne diffèrent pas significativement en fonction du type de passe. 50% des ouvrages présentent des coûts compris entre 30 et 110 K€, avec des coûts médians variant selon le type de passe entre 55 et 75 K€.

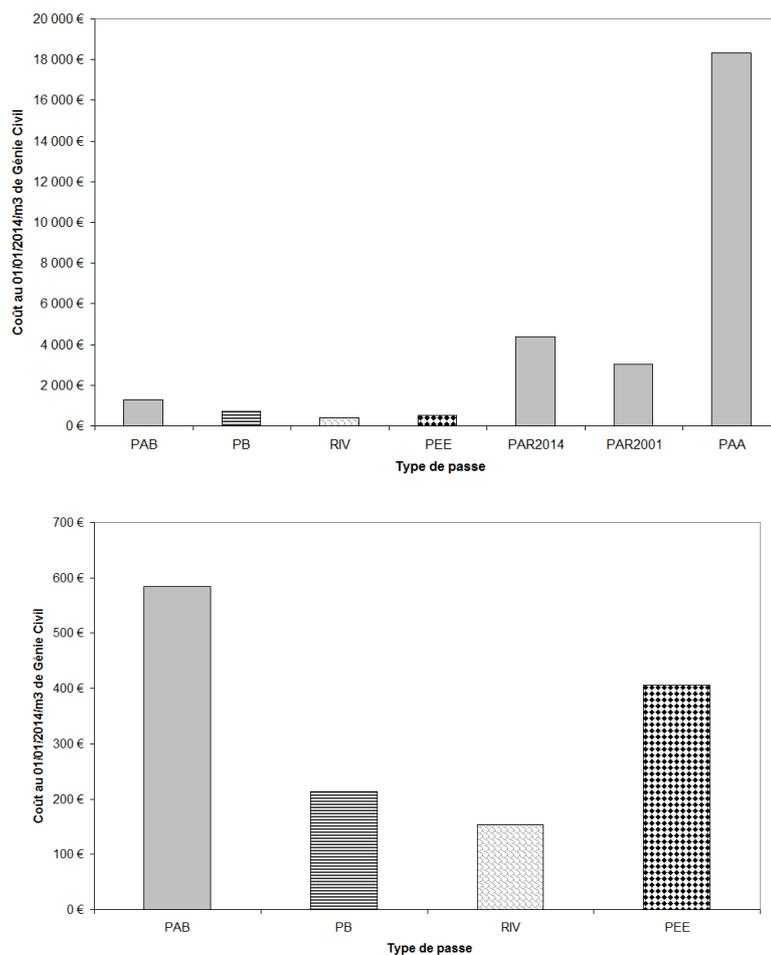


Figure 14 : Coût médian par m³ de génie civil et par type de passes à poissons.

Ramené aux m³ de génie civil, les passes à anguilles sont plus chères que les autres types de passes, ceci du fait d'un volume relativement restreint. Pour les autres types de passes, on constate que les passes à bassins présentent un coût total médian par m³ de génie civil statistiquement supérieur à celui des rivières de contournement, des pré-barrages et des passes en enrochement. Là encore, cette différence est directement liée aux volumes de ces dispositifs qui sont en général plus réduits.

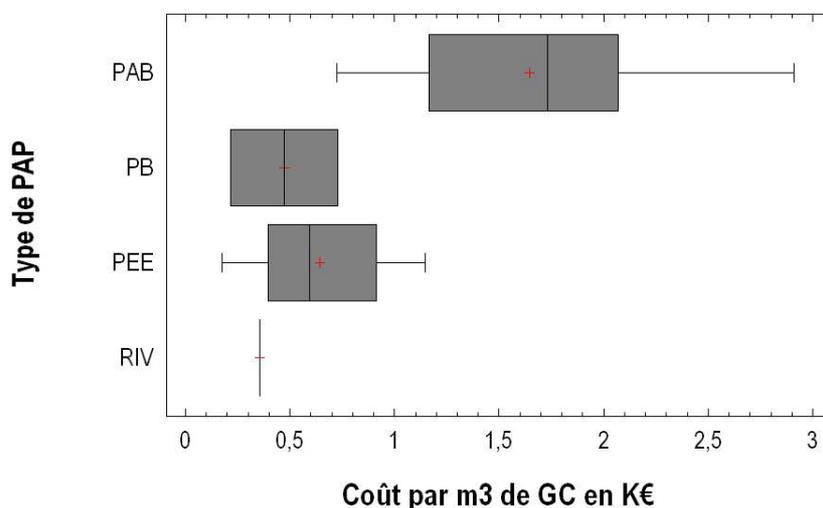


Figure 15 : Coût par m³ de génie civil et par type de passe à poisson pour les seuils de faible hauteur (< 1,5 m) et les rivières de module < 30 m³/s.

Pour les seuils de faible hauteur (< 1,5 m) et les rivières à module < 30 m³/s, les coûts des passes ramenés au volume de génie civil sont statistiquement plus élevés pour les passes à bassins. Comme précédemment, ce constat est directement imputable à la différence de volume entre ces 3 types de dispositifs avec des passes à bassins dont le volume est toujours plus faible que les pré-barrages, les passes en enrochement et les rivières de contournement, ceci pour une même hauteur de chute à franchir.

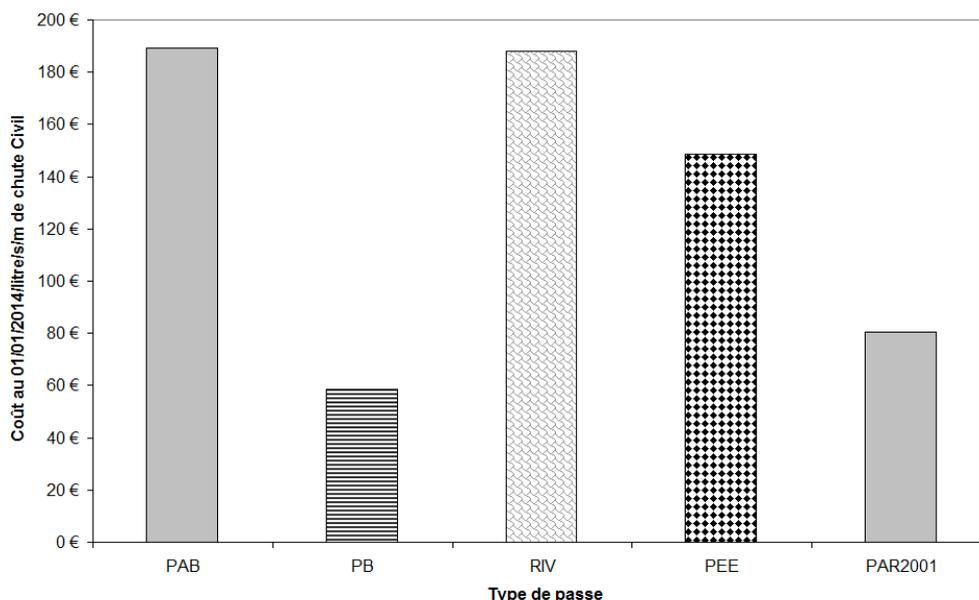


Figure 16 : Comparaison des coûts par m de chute et par l/s de débit dans la passe entre les différents types d'ouvrage.

Seuls les pré-barrages présentent des coûts ramenés à la hauteur de chute et au débit dans la passe statistiquement inférieurs aux autres dispositifs. Toutefois, l'échantillon des pré-barrages étudiés en 2014 étant assez faibles (5 ouvrages), nous avons ajouté celui de 2001 (25 ouvrages). Les coûts actualisés (pondération par l'indice TP02) de 50% des pré-barrages étudiés à cette date variaient de 30 € à 110 €/m de chute/(l/s) de débit dans la passe (médiane : 53 €), soit des valeurs assez proches de celles de l'échantillon de 2014 et donc statistiquement inférieurs à celle des autres types de dispositifs.

3.2.2 Conclusions sur coûts globaux.

Les coûts des 114 ouvrages étudiés présentent de fortes variations imputables au type de passes, à la hauteur de l'ouvrage et au débit. Les pré-barrages constituent les dispositifs les moins chers lorsque l'on raisonne par mètre de chute et débit dans la passe.

Globalement, tout ouvrage confondu on compte environ 190 €/m de chute/(l/s) de débit dans la passe soit :

- pour un seuil de 1 m de chute et une passe de 100 l/s un coût de l'ordre de 20 000 €,
- pour un seuil de 1,5 m de chute et une passe de 300 l/s un coût de 85 000 €.

	Coût au 01/01/2014	Coût/m de chute	Coût/m3 GC	Coût/m de chute/l.s-1	Coût/m3 Blocs
Moyenne	285616	121364	4801	303	1114
Mediane	129054	68980	1263	193	953
Min	12272	4529	72	13	163
Max	4060711	585291	97660	3813	3571
1er quartile	46637	26863	700	130	567
3ème quartile	318355	133287	2229	358	1240
1er décile	36599	14192	395	83	342
Dernier décile	620999	396550	12861	540	2260

Tableau 5 : Statistiques générales des différents types de coûts pour les 114 dispositifs étudiés (les coûts par m3 de Blocs ne concernent que les passes en enrochement).

3.3 Construction d'un outil d'estimation des coûts à large échelle

Dans cette approche, nous avons cherché à construire un outil d'estimation des coûts des dispositifs de franchissement (à l'exception des passes spécifiques à l'anguille) utilisable dans des approches à large échelle allant du bassin hydrographique, à l'axe de cours d'eau.

Il a été décidé de construire des outils généraux n'intégrant pas initialement un choix de type de passes à poissons. Cela conduit inévitablement à proposer des intervalles de confiance assez larges que nous avons cherché à réduire en séparant les seuils et barrages en fonction de leur hauteur de chute.

3.3.1 Effet des caractéristiques générales des seuils sur les coûts des dispositifs

Dans un 1^{er} temps, nous avons testé les effets des caractéristiques générales des seuils et barrages sur le coût des passes à poissons (sans les passes à anguilles), à savoir l'effet du module et de la hauteur de chute.

3.3.1.1 Relation au module du cours d'eau

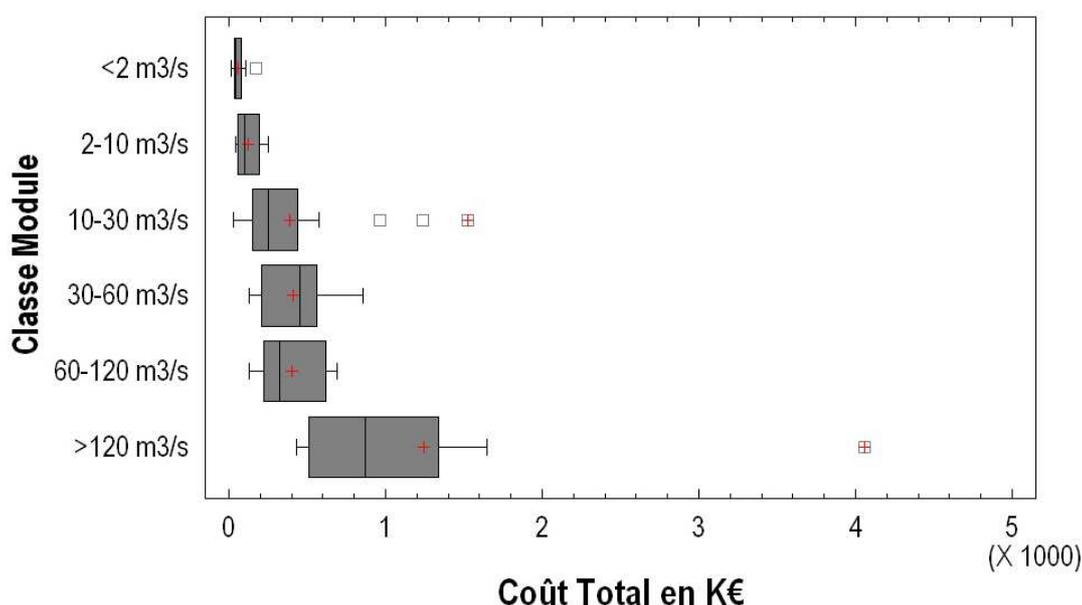


Figure 17 : Comparaison des coûts totaux en fonction des classes de module des seuils et barrages étudiés.

Le coût total des passes à poissons augmente significativement avec le module des rivières. Pour les petits cours d'eau à très faible et faible module (< 10 m³/s), 95% des passes étudiées présentent des coûts inférieurs à 40 K€, alors que pour les grandes rivières (module > 120 m³/s), 95% des dispositifs ont des coûts compris entre 400 et 1675 K€ (50% des dispositifs sont compris entre 500 et 1350 K€).

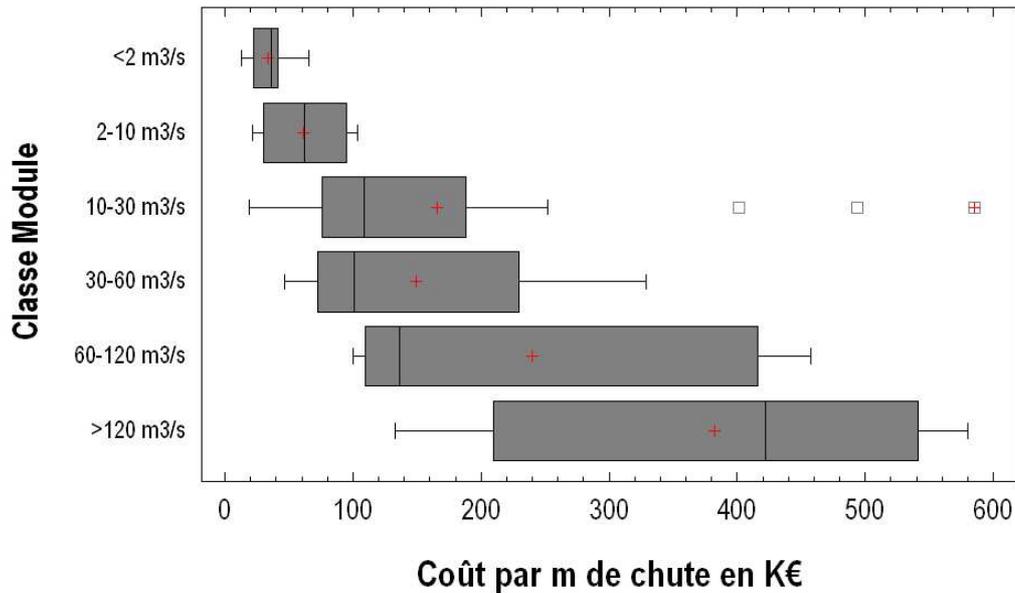


Figure 18 : Comparaison des coûts par m de chute en fonction des classes de module des seuils et barrages étudiés.

Comme pour les coûts totaux, les coûts des passes ramenés à la hauteur de chute augmentent significativement avec le module des cours d'eau. Dans les petites rivières de moins de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ de module, 95% des passes construites ont coûté entre 15 et 105 K€ par m de chute au barrage. Pour les grandes rivières ($>120 \text{ m}^3/\text{s}$), les coûts par m de chute de 95% des dispositifs se situent entre 130 et 582 K€ par m de chute au barrage.

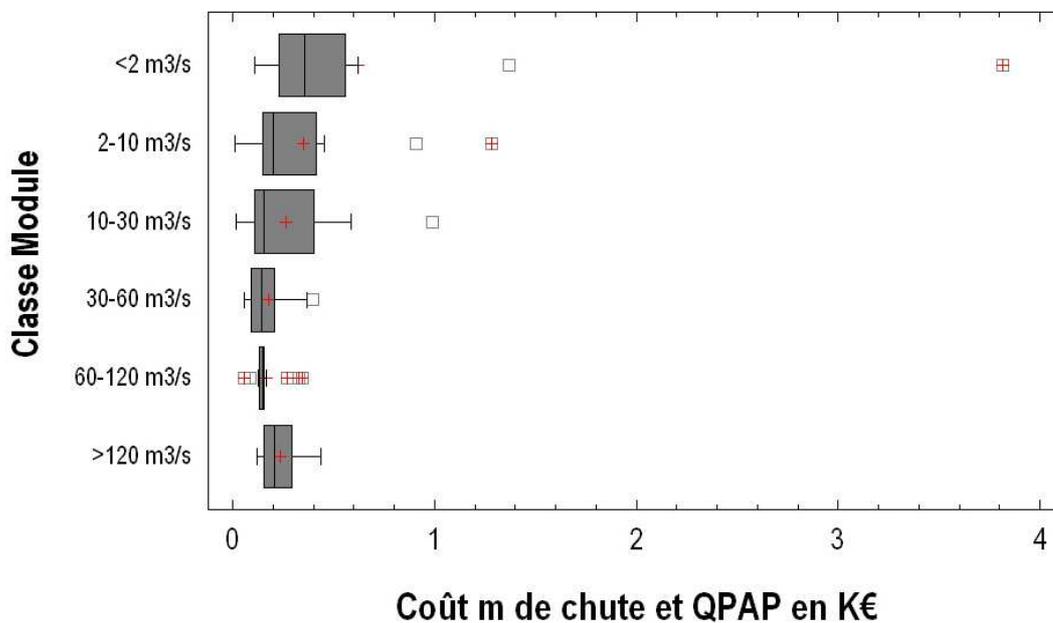


Figure 19 : Comparaison des coûts par m de chute et par l/s de débit dans la passe en fonction des classes de module des seuils et barrages étudiés.

Les coûts des passes ramenés à la hauteur de chute et au débit dans le dispositif diminuent significativement avec le module des cours d'eau. Dans les petites rivières de moins de $2 \text{ m}^3/\text{s}$ de module, 95% des passes construites ont coûté entre 0,15 et 0,6 K€ par

m de chute au barrage et par l/s de débit dans la passe. Pour les grandes rivières (>120 m³/s), ces coûts se situent entre 0,15 et 0,45 K€.

Les coûts ramenés au m³ de génie civil (volume de la passe) ne sont pas reliés au module du cours d'eau.

3.3.1.2 Relation à la hauteur de chute

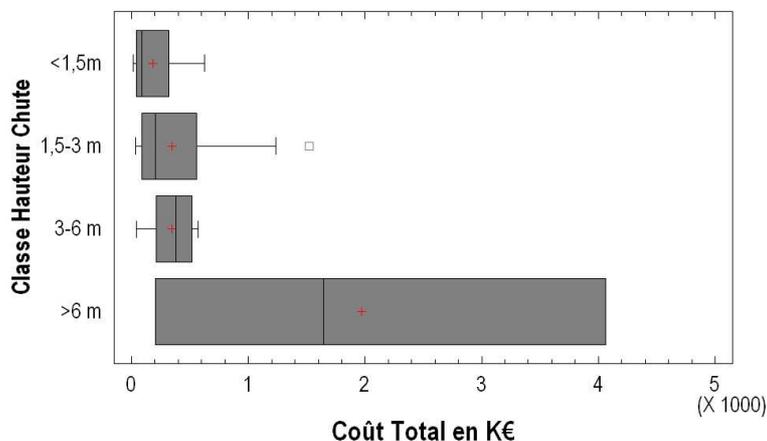


Figure 20 : Comparaison des coûts totaux en fonction des classes de hauteur de chute des seuils et barrages étudiés.

Le coût total des passes à poissons augmente significativement avec la hauteur de chute des seuils et barrages des rivières. Toutefois, ce sont essentiellement les passes construites sur des barrages de plus de 6 m de hauteur de chute qui présentent des coûts significativement plus élevés.

Les coûts ramenés au m³ de génie civil (volume de la passe) ne sont pas significativement reliés à la hauteur de chute.

3.3.2 Modèles généraux d'estimation des coûts.

Nous avons construit un modèle d'estimation des coûts sur la base du module des cours d'eau et de la hauteur de chute avec dans une 1^{ère} approche l'intégration de tous les sites puis dans un second temps, une différenciation en fonction des classes de hauteurs de chute.

3.3.2.1 Modèle basé sur les 97 sites (hors passes à anguilles)

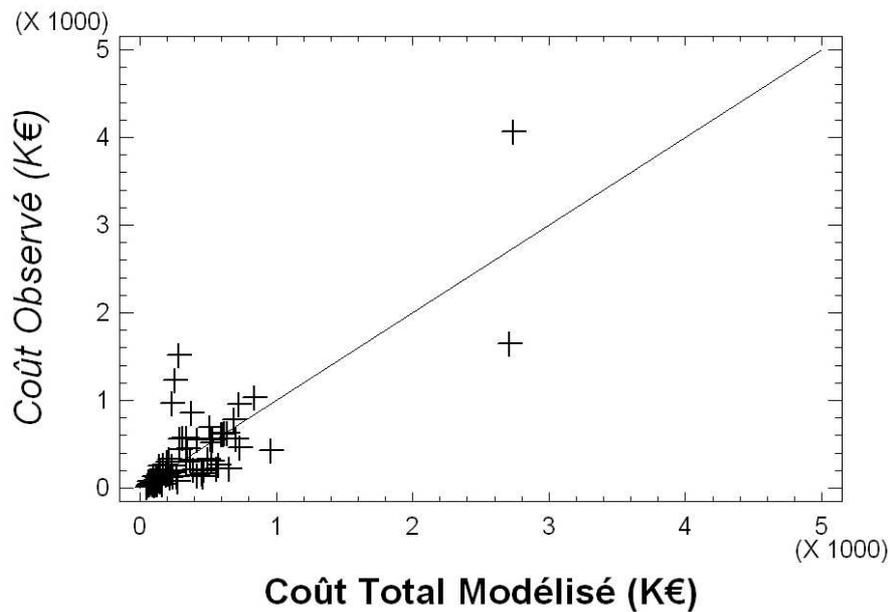


Figure 21 : Modèle d'estimation des coûts totaux basé sur le module et la hauteur de chute.

Modèle 1:

$$\text{Coût total (K€)} = 51.41(\pm 33.6) \times \text{Hauteur Chute (m)} + 4.95(\pm 1) \times \text{Module (m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$$

avec $r^2 = 0.77$ ($p < 0.05$) et test de Durbin Watson à 1.88.

Le modèle proposé est statistiquement validé avec toutefois une plage d'application qui doit se limiter aux ouvrages de moins de 1000 K€. Nous avons testé les intervalles de confiance obtenus pour différentes situations de hauteur de chute et de module (tableau 6).

Hchute (m)	Module (m ³ .s)	Coût min (K€)	Coût moy (K€)	Coût max (K€)
1	3	30	66	102
1.5	5	46	101	153
1.5	10	66	127	187
1.5	30	145	225	306
2.5	5	64	153	242
2.5	10	84	178	272
2.5	30	163	277	391
3	100	448	650	850

Tableau 6 : Estimation de coûts totaux pour quelques exemples de hauteur de chute et de module de rivière.

Les intervalles de confiance obtenus pour chaque situation hauteur de chute vs module du tableau 6 varient selon les situations de 33 à 55%. Ils sont plus importants pour les petits seuils et les rivières à faible module, que pour les seuils plus élevés dans des cours d'eau à plus fort module. Ainsi pour un seuil de 2,5 m de hauteur dans une rivière de 10 m³/s de module, le coût total de la passe à poisson serait compris entre 84 et 272 K€.

Cette approche reste générale avec des estimations qui doivent s'appuyer sur des gammes de coûts et non pas sur des valeurs fixes.

3.3.2.2 *Modèle par classe de hauteur de chute*

Nous avons construit des modèles par classe de hauteur de chute en séparant :

- les seuils de moins de 1,5 m de hauteur (27 ouvrages),
- et les seuils de 1,5 à 3 m de hauteur (53 ouvrages).

Nous n'avons pas construit de modèle pour les seuils de plus de 3 m de hauteur car nous ne disposons pas d'un échantillon statistiquement suffisant.

→ Seuils < 1,5 m de hauteur de chute

Modèle 2 :

$$\text{Coût Total (K€)} = 31.8 (\pm 9.08) \times \text{Hauteur Chute (m)} + 4.4 (\pm 1.15) \times \text{Module (m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$$

avec $r^2=0.87$ ($p<0.05$) et test de Durbin Watson à 1.92.

	<10m ³ /s	10-120m ³ /s	>120m ³ /s
1er quart.	38	131	
Med	42	229	
3ème quart.	77	616	

Tableau 7 : Statistiques des coûts estimés par le modèle 2 en fonction des classes de module (pas de sites à module > 120 m³/s dans cette classe de hauteur de chute [$< 1,5$ m]).

Pour les petits cours d'eau à faible module (< 10 m³/s), le modèle permet d'estimer un coût pour 50% des ouvrages qui varie entre 38 et 77 K€. Cette approche permet ainsi d'améliorer la qualité des estimations pour les seuils de faible hauteur en petites rivières du fait de la réduction de la taille de l'échantillon et de la suppression des fortes valeurs de coûts qui déséquilibraient l'échantillon.

→ Seuils compris entre 1,5 m et 3 m de hauteur de chute

Modèle 3 :

$$\text{Coût Total (K€)} = 58.9 (\pm 29.8) \times \text{Hauteur Chute (m)} + 4.3 (\pm 0.94) \times \text{Module (m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$$

Avec $r^2=0.78$ ($p<0.05$) et test de Durbin Watson à 1.78.

	<10m ³ /s	10-120m ³ /s	>120m ³ /s
1er quart.	40	160	149
Med	66	262	320
3ème quart.	104	615	618

Tableau 8 : Statistiques des coûts estimés par le modèle 3 en fonction des classes de module.

Comme pour les seuils de faible hauteur, la réduction de l'échantillon et la limitation des fortes valeurs de coût, permettent une estimation des coûts plus pertinente surtout pour les rivières à petits modules (<10 m³/s).

3.3.3 Influence d'autres facteurs sur le coût estimé

Nous avons analysé l'influence d'autres facteurs sur les coûts estimés par les différents modèles. Il n'y a pas d'effet significatif sur les résultats des modèles :

- de la zone géographique (bassin),
- du type de passe à poisson,
- de la présence ou non d'un débit d'attrait.

En revanche, on observe un effet :

- de la présence d'un dispositif de comptage des poissons,
- de la présence d'une installation hydroélectrique au niveau du barrage.

La présence d'un dispositif vidéo conduit à une augmentation des coûts d'un facteur 1,5. A l'opposé, la construction d'une passe à poisson sur un seuil équipé d'une turbine hydroélectrique conduit en moyenne à un coût réduit de 20%.

Il convient donc, dans le cas d'étude d'axe, d'intégrer la présence de centrales hydroélectriques en affectant les coûts estimés sur la base du module et de la hauteur de chute d'un coefficient 0.8. Cette pondération des coûts en contexte d'usage hydroélectrique est en fait liée à la valeur de débit transitant dans les dispositifs de franchissement. Dans le cas de centrales hydroélectriques, les débits transitant dans les passes à poissons et ramenés au module sont généralement inférieurs à ceux des passes hors contexte hydroélectrique.

L'analyse des 96 ouvrages (hors passes à anguilles) a permis de fournir 3 modèles généraux d'estimation des coûts des dispositifs de franchissement sur la base de la hauteur de chute et du module de la rivière :

▪ **Modèle 1: tous les ouvrages**

$$\text{Coût total (K€)} = 51.41(\pm 33.6) \times \text{Hauteur Chute (m)} + 4.95(\pm 1) \times \text{Module (m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$$

▪ **Modèle 2 : ouvrages de moins de 1,5m de hauteur de chute**

$$\text{Coût Total (K€)} = 31.82(\pm 9.08) \times \text{Hauteur Chute (m)} + 4.38(\pm 1.15) \times \text{Module (m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$$

- **Modèle 3 : ouvrages de 1,5m à 3m de hauteur de chute**

$$\text{Coût Total (K€)} = 58.93(\pm 29.85) \times \text{Hauteur Chute (m)} + 4.29 (\pm 0.94) \times \text{Module (m}^3\text{.s}^{-1}\text{)}$$

3.4 Construction d'un outil d'estimation des coûts pour les passes à bassin

3.4.1 Caractéristiques générales des dispositifs étudiés

Nous avons sélectionné 54 passes à bassins, dont 37% de passes à jet de surface avec des échancrures latérales et des orifices noyés et 35% de passes à fente verticale.

Type de passes à bassins	2013	2001
Echancrures lat, + orifice noy	20	132
Echancrures triangulaires		9
Echancrures rect,	4	13
Fente verticale	19	8
Double Fente verticale	11	6
Autres		3
Total	54	171

Tableau 9 : Présentation des 54 passes à bassins étudiées.

	2013		2001	
	CHUTE (m)	MODULE (m ³ /s)	CHUTE (m)	MODULE (m ³ /s)
Moyenne	2,6	64	3,0	40
Mediane	2,0	34	2,7	20
Min	1,2	0	0,1	0
Max	8,4	480	15,2	320
1er quartile	1,8	6	2,1	7
3ème quartile	2,8	91	3,4	47
1er décile	1,5	1	1,6	3
Dernier décile	4,0	126	4,8	97

Tableau 10 : Caractéristiques générales (chute et module) des 54 seuils équipés de passes à bassins étudiés en 2013.

Ces dispositifs équipent des seuils et barrages de hauteur comprise pour 50% d'entre eux entre 1,8 et 2,8 m pour des modules de 6 à 91 m³/s. L'étude de 2001 avait analysé un échantillon plus important (171 passes) dans des gammes de hauteur de chute plus importantes, mais de module plus restreint (plus de passes en contexte salmonicole).

	2014				2001			Différence Coût/m3 GC %
	Coût au 01/01/2014	Coût/m de chute	Coût/m3 GC	Coût/m de chute/QPAP	Coût au 01/01/2014	Coût/m3 GC	Coût/m de chute/QPAP	
	(€)	(€)	(€)	(€)	(€)	(€)	(€)	
Moyenne	354529	158644	1371	234994	232669	1148	153262	53.3%
Mediane	224420	101378	1272	176536	138681	999	125397	40.8%
Min	35937	16274	269	52663	7225	98	14654	259.4%
Max	1645084	560574	2912	1368581	2983090	3920	576535	137.4%
1er quartile	117400	46970	914	132655	72180	676	84318	57.3%
3ème quartile	556516	203190	1823	262124	224600	1441	181369	44.5%
1er décile	51567	27646	650	117485	30345	383	54258	116.5%
Dernier décile	679917	413267	2222	394714	402120	2120	285247	38.4%

Tableau 11 : Statistiques générales des différents coûts des passes à bassins étudiées en 2013-2014 par rapport à ceux de l'étude de 2001.

La moitié des passes étudiées en 2013-2014 ont coûté entre 119 000 et 557 000 € (médiane à 240 000 €) contre 72 000 à 225 000 € en 2001 (médiane à 140 000 €). Ramenés à la hauteur de chute, au volume de génie civil et au débit dans la passe, les coûts de 50% des dispositifs sont respectivement compris entre 49 000 et 219 000 € par m de chute (médiane à 102 500 €), 932 et 1834 € par m³ de génie civil (médiane à 1278 €) et 133 et 272 € par m de chute et par l/s de débit.

Pour une même hauteur de chute et un même débit dans la passe, les ouvrages construits après 2001 ont coûté 55% plus cher que ceux construits avant 2001 (ceci en tenant compte de l'évolution de l'Indice des Travaux Publics (TP02)). Une passe de 100 000 € en 2001 coûterait 250 000 € en 2014 (158000 € uniquement sur la base de l'évolution du TP02).

3.4.2 Facteurs influençant le coût des passes à bassin

Nous avons testé l'effet de différents facteurs sur le coût des passes à bassins.

3.4.2.1 Effet du type de passe à bassin

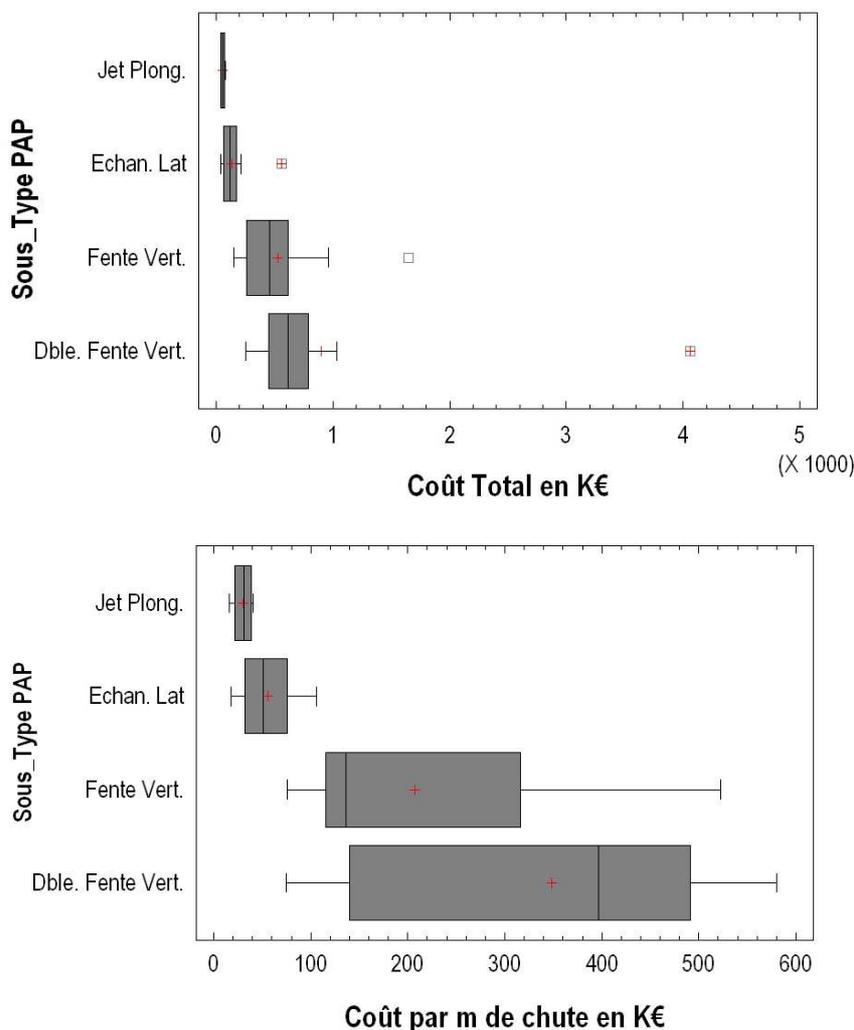


Figure 22 : Statistiques des coûts totaux et par m de chute en fonction de type de passe à bassin (Jet Plong. ; Passe à échancrure et jet plongeant ; Echan. Lat : Passe à échancrure latérale profonde ; Fente Vert. : Passe à Fente Verticale ; Dble. Fente Vert. : Passe à double fente verticale).

Les coûts totaux et les coûts par m de chute des passes à bassins varient significativement en fonction du type d'ouvrage. Les passes à double fente verticale coûtent plus chères que les passes à simple fente verticale, qui elles-mêmes sont plus chères que les passes à échancrure. Ce constat tient directement au volume de ces ouvrages. Les coûts augmentent proportionnellement aux volumes des passes à bassins. D'ailleurs, il n'y a pas de différence significative de coûts par m³ de génie civil entre ces différents types d'ouvrages.

3.4.2.2 Effet du module et de la hauteur de chute

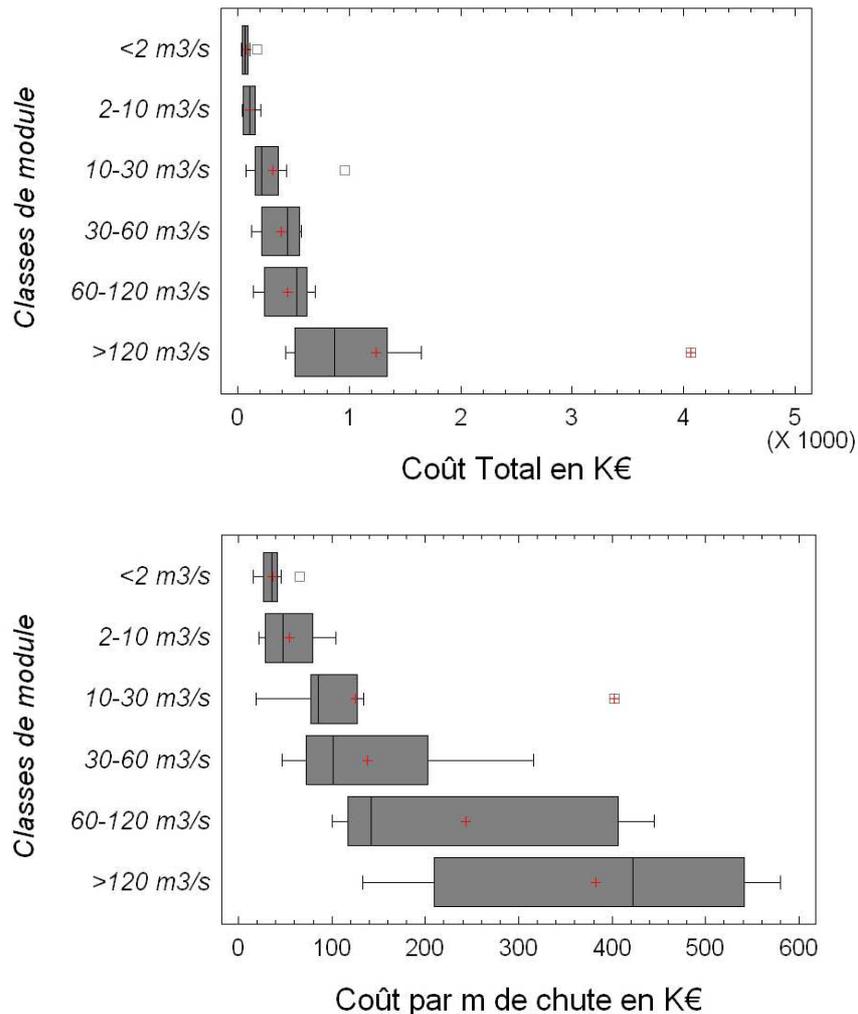


Figure 23 : Statistiques des coûts totaux et par m de chute en fonction du module de la rivière.

Le coût total et le coût par m de chute augmente significativement avec la valeur du module du cours d'eau. Dans les grands cours d'eau (> 120 m³/s), le coût médian par m de chute des passes à bassin s'élève à 425 000 € (50% entre 205 000 et 540 000 €) alors qu'il est de 102 000 € (50% entre 65 000 € et 195 000 €) pour des rivières de 30 à 60 m³/s, 55 000 € (50% entre 35 000 € et 90 000 €) pour des rivières de moins de 10 m³/s.

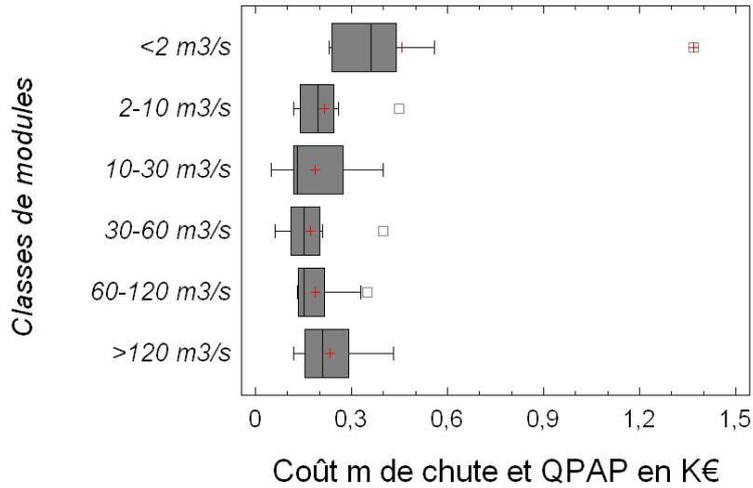


Figure 24 : Statistiques des coûts par m de chute et débit dans la passe en fonction du module de la rivière.

Les coûts ramenés à la hauteur de chute et au débit dans la passe ne diffèrent que pour les dispositifs installés sur des cours d'eau à petits module (<2 m³/s).

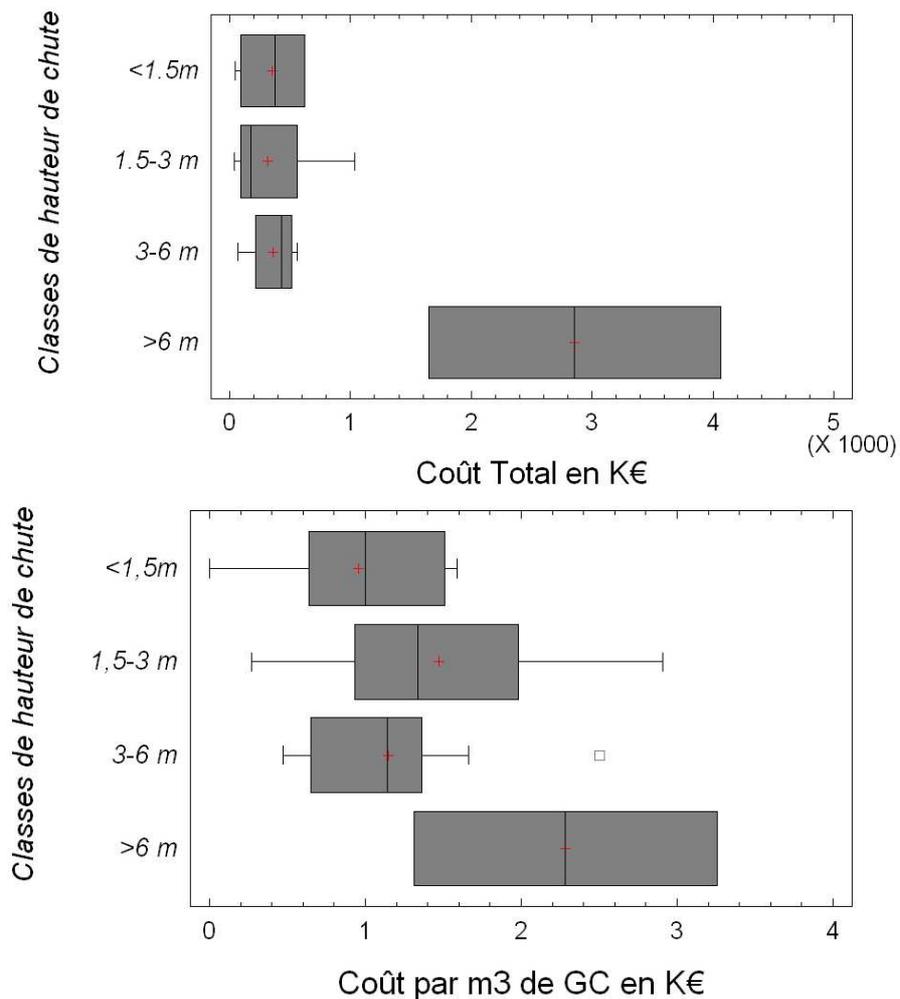


Figure 25 : Statistiques des coûts totaux et par m³ de génie civil fonction de la hauteur de chute des seuils.

Les coûts totaux et les coûts par m³ de génie civil sont significativement plus élevés uniquement pour les passes construites sur des barrages de plus de 6 m de hauteur.

3.4.2.3 Effet de la présence d'un débit d'attrait

Nous avons comparé les coûts des passes à poissons par type d'ouvrage en fonction de la présence ou non d'un débit d'attrait. Pour conduire une analyse la plus pertinente possible nous avons travaillé sur les coûts par m de chute et par l/s dans la passe (débit de la passe+débit d'attrait).

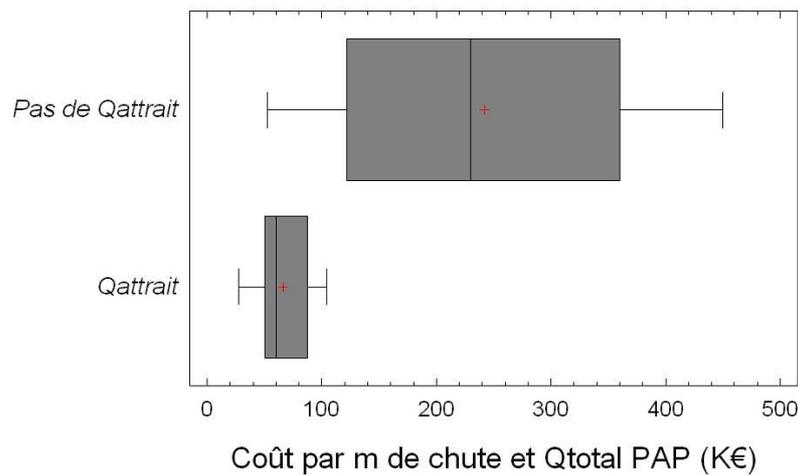


Figure 26 : Comparaison des coûts par m de chute et par m³/s dans la passe avec ou sans débit d'attrait dans une passe à échancrure.

Si l'on fait transiter la totalité du débit dans la passe, un dispositif à échancrure coûte 225 000 € par m de chute et par m³/s de débit contre 62 000 € par m de chute et par m³/s de débit si 60 à 80% du débit transite comme débit d'attrait.

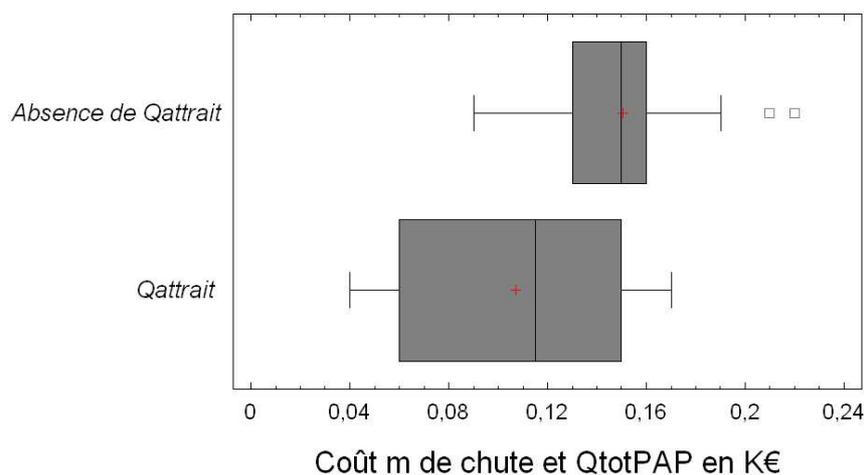


Figure 27 : Comparaison des coûts par m de chute et par m³/s dans la passe avec ou sans débit d'attrait dans une passe à fente verticale.

Pour les passes à fente verticale, la différence de coûts est nettement plus faible (< 20%) entre les dispositifs avec ou sans débit d'attrait. Comparé à des passes à double fente verticale, les coûts des passes à 1 seule fente additionnée d'un débit d'attrait sont même légèrement supérieurs.

3.4.3 Modèles statistiques d'évaluation des coûts des passes à bassins

Pour confirmer les analyses statistiques descriptives précédentes, nous avons conduit en complément des analyses prédictives sur la base de régression.

- **Modèle 1 : Hauteur de chute et module**

$$\text{Coût Total (K€)} = 54.1 (\pm 28.5) \times \text{Hauteur Chute (m)} + 3.45 (\pm 0.87) \times \text{Module (m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$$

Avec $r^2=0.84$ ($p<0.01$) et test de Durbin Watson à 1.86.

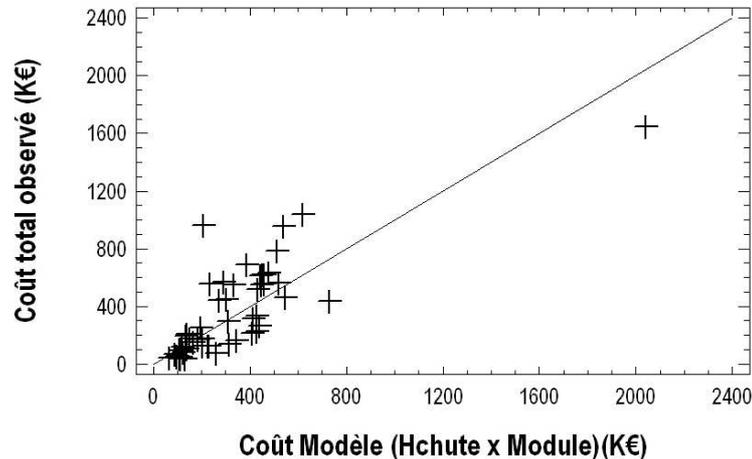


Figure 28 : Modèle d'estimation du coût total des passes à bassin en fonction du module de la rivière et de la hauteur de chute.

- **Modèle 2 : Hauteur de chute et débit dans la passe**

$$\text{Coût/m de chute (K€)} = 161.58 (\pm 19.9) \times \text{QPAB (m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$$

avec $r^2=0.84$ ($p<0.01$) et test de Durbin Watson à 1.91

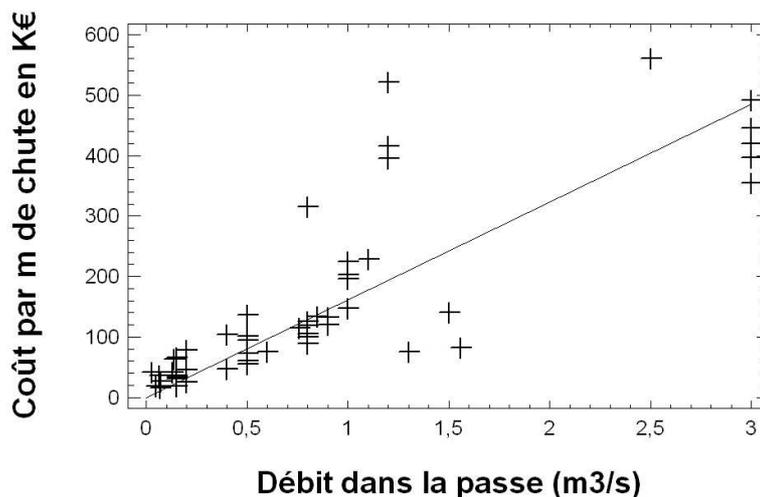


Figure 29 : Modèle d'estimation du coût par m de chute des passes à bassin en fonction du débit dans la passe.

- **Modèle 3 : Volume du génie civil**

$$\text{Coût Total (K€)} = 0.974 (\pm 0.185) \times \text{VGC (m}^3)$$

Avec $r^2=0.62$ ($p<0.05$) et Durbin Watson de 1.88

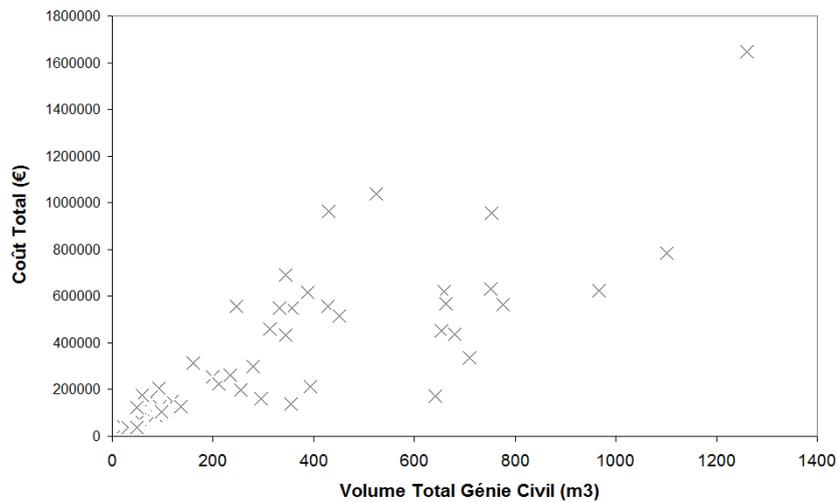


Figure 30 : Relation entre le coût total des passes à bassins et le volume de génie civil de l'ouvrage.

L'analyse des différents modèles montrent qu'il est pertinent d'utiliser les statistiques des coûts par m de chute et débit dans la passe ou par m³ de volume de génie civil.

3.4.4 Modèle d'estimation du coût des passes

Les coûts des dispositifs peuvent donc être estimés sur la base du produit de la hauteur de chute et du débit dans la passe par les coûts médians, les 1^{er} et 3^{ème} quartiles ainsi que les 1^{er} et dernier déciles

	Valeurs de référence (en €/m de chute/l.s ⁻¹ dans la passe)
1 ^{er} décile	117
1 ^{er} quartile	133
Médiane	189
3 ^{ème} quartile	212
Dernier décile	394

Tableau 12 : Statistiques utilisées pour l'estimation du coût total d'une passe sur la base de la hauteur de chute et du débit dans la passe.

La même approche basée sur le volume de génie civil peut être utilisée en réalisant le produit du volume de génie civil envisagé par le coût médian, le 1^{er} et le dernier décile par m³ de génie civil.

	Valeurs de référence (en €/m ³ de génie civil)
1 ^{er} décile	654
1 ^{er} quartile	932
Médiane	1278
3 ^{ème} quartile	1834
Dernier décile	2239

Tableau 13: Statistiques utilisées pour l'estimation du coût total d'une passe sur la base du volume de génie civil.

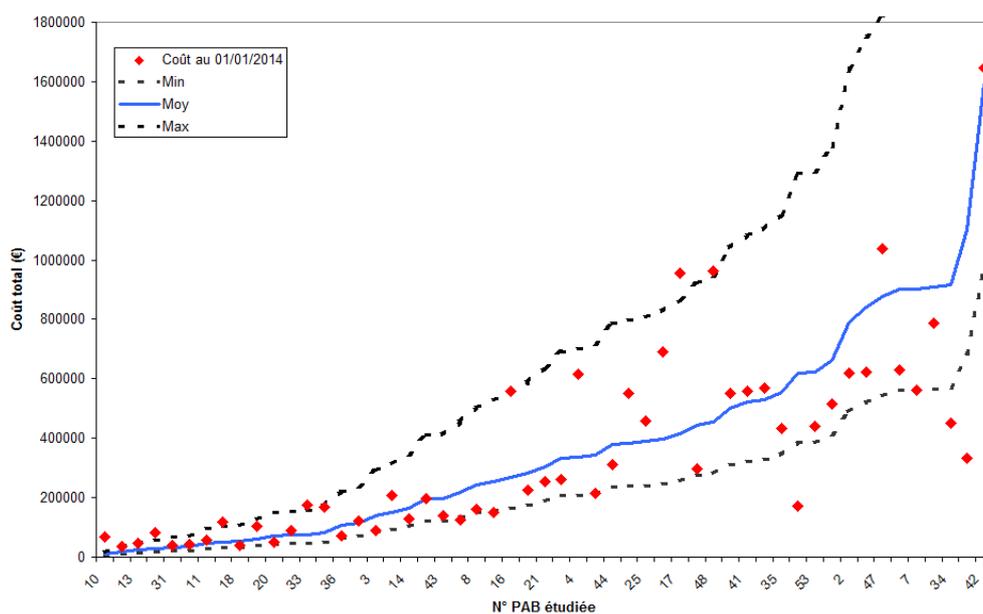


Figure 31 : Comparaison entre les coûts estimés sur la base de la médiane et des déciles des coûts par m de chute et les valeurs observées sur les 57 dossiers étudiés

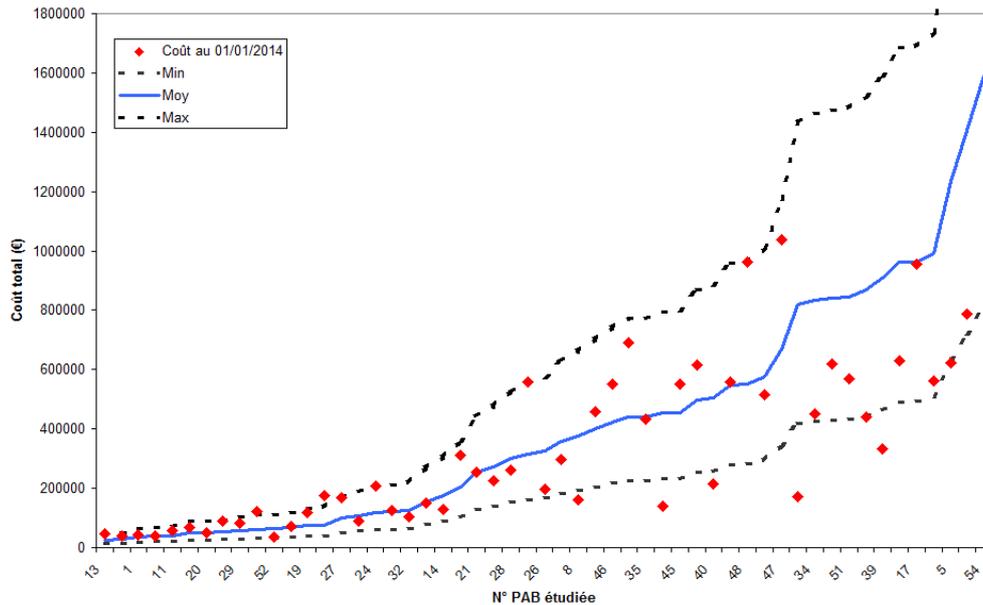


Figure 32 : Comparaison entre les coûts estimés sur la base de la médiane et des déciles des coûts par m³ de génie civil et les valeurs observées sur les 57 dossiers étudiés.

L'utilisation des coûts médians, des 1^{er} et derniers déciles comme estimateurs des coûts des passes à bassins permet d'inclure la grande majorité des coûts au sein de l'intervalle de confiance représenté par les 1^{er} et dernier décile avec toutefois une proportion moins importante de coûts estimés proches des coûts observés.

Avec seulement 57 ouvrages et la forte diversité rencontrée, il est difficile de proposer des outils plus précis. De la même façon, la faiblesse de l'échantillon ne permet pas de construire des modèles par type de passe. Nous n'avons analysé que l'effet de l'usage hydroélectrique ou non.

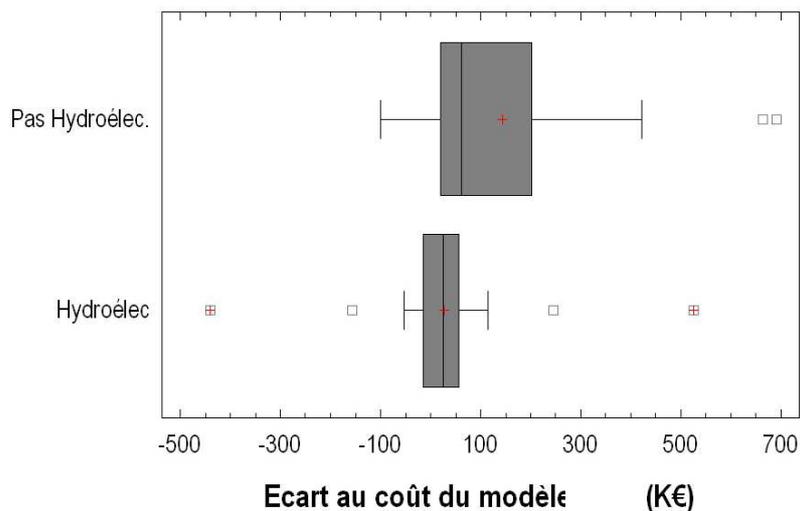


Figure 33 : Comparaison des écarts de coûts entre les estimations des modèles et les valeurs observées pour des seuils présentant ou non une centrale hydroélectrique.

Comme pour les modèles généraux basés sur la hauteur de chute et le module, les coûts estimés pour les passes à bassin en contexte hydroélectrique sont sur-estimés de l'ordre de 35%

L'analyse des 57 passes à bassin a permis de proposer deux outils d'estimation des coûts :

- un outil basé sur la hauteur de chute, le module et/ou le débit dans la passe,
- un outil basé sur le génie civil de la passe.

3.5 Construction d'un outil d'estimation des coûts pour les passes en enrochement

3.5.1 Caractéristiques générales des dispositifs étudiés.

Nous avons sélectionné 18 passes en enrochement :

- 12 passes en enrochement régulièrement répartis (ERR),
- 5 passes en enrochement en rangées périodiques (RP),
- 1 passe mixte

	CHUTE (m)	MODULE (m ³ /s)
Moyenne	1,5	22
Mediane	1,3	8
Min	0,7	1
Max	3,1	110
1er quartile	1,0	2
3ème quartile	1,8	22
1er décile	0,9	1
Dernier décile	2,2	71

Tableau 14: Caractéristiques générales (chute et module) des 18 seuils équipés de passes en enrochement.

Ces dispositifs équipent des seuils et barrages d'assez faible hauteur comprise pour 50% d'entre eux entre 1,0 et 1,8 m pour des modules de 2 à 22 m³/s.

	Coût au 01/01/2014 (€)	Coût/m de chute au 01/01/2014 (€)	Coût/m3 GC au 01/01/2014 (€)	Cout/m de chute/QPAP (€)	Coût/m3 Blocs au 01/01/2014 (€)
Moyenne	140345	102305	603	208	1312
Mediane	108774	63476	527	149	1046
Min	12272	13945	177	30	425
Max	327852	457370	1145	909	3571
1er quartile	41357	40804	389	88	701
3ème quartile	242457	108492	735	203	1719
1er décile	27272	23333	311	60	607
Dernier décile	306362	207105	1076	396	2402

Tableau 15 : Statistiques générales des différents coûts des passes en enrochement étudiées en 2013-2014.

La moitié des passes étudiées en 2013-2014 ont coûté entre 41 000 à 243 000 € (médiane à 140 000 €). Ramenés à la hauteur de chute, au volume de génie civil et de blocs, les coûts de 50% des dispositifs sont respectivement compris entre 41 000 et 108 000 € par m de chute (médiane à 63 500 €), 389 et 735 € par m³ de génie civil (médiane à 527 €), et 88 et 203 € par m de chute et par l/s de débit.

Les coûts par volume de génie civil sont environ 50% inférieurs à ceux des passes à bassins. Toutefois, il faut souligner qu'à l'exception des forts modules (> 60 m³/s), le volume des passes en enrochement est 1.5 à 4 fois plus important que celui des PAB pour une même hauteur de chute et un même débit transitant dans la passe

3.5.2 Facteurs influençant le coût des passes en enrochement

Nous avons testé l'effet de différents facteurs sur le coût des passes en enrochement.

3.5.2.1 Effet du type de passe

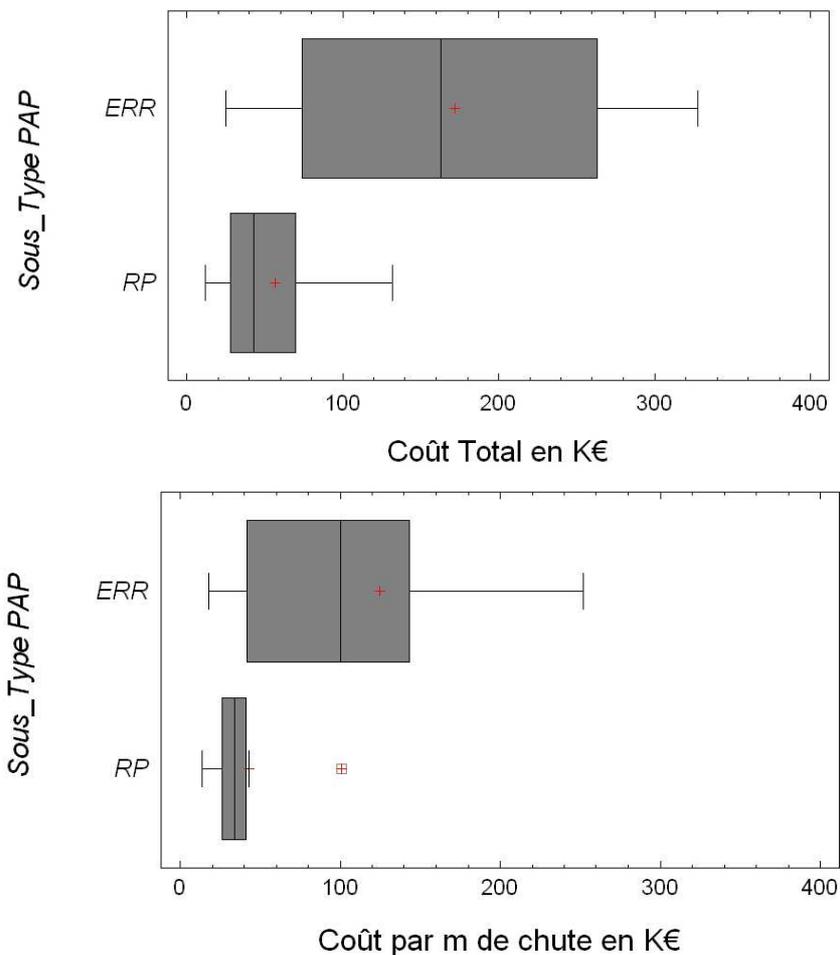


Figure 34 : Statistiques des coûts totaux et par m de chute en fonction de type de passe à bassin (ERR : Enrochements Régulièrement Répartis ; RP : Enrochement en Rangées Périodiques).

Les coûts totaux et les coûts par m de chute des passes en enrochement varient significativement en fonction du type d'ouvrage. Les passes en enrochements régulièrement répartis coûtent plus chères que les passes à rangées périodiques. Ce constat tient directement au volume de blocs utilisés. Les passes en enrochement régulièrement répartis utilisent plus de blocs que celles en rangées périodiques (+35%).

3.5.2.2 Effet du module et de la hauteur de chute

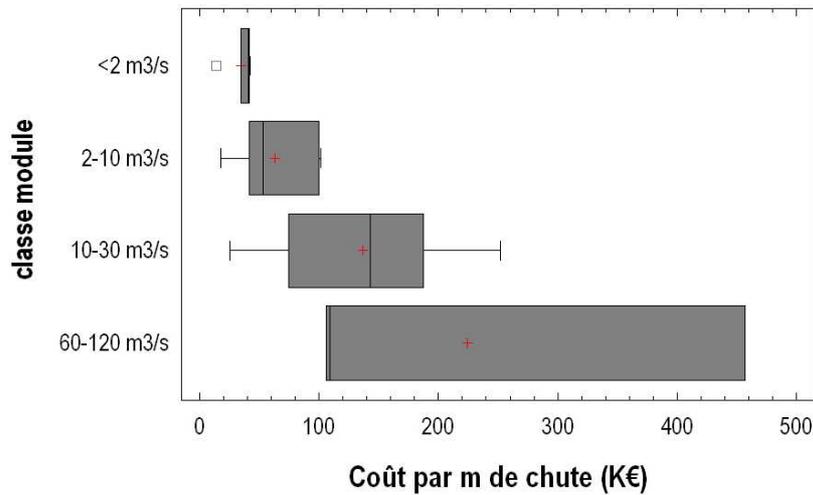


Figure 35 : Statistiques des coûts totaux et par m de chute en fonction du module de la rivière.

Le coût total ne diffère que pour les passes construites sur des cours d'eau à module $< 10 \text{ m}^3/\text{s}$. En revanche, les coûts par m de chute augmentent significativement avec la valeur du module du cours d'eau. Dans les grands cours d'eau ($60\text{-}120 \text{ m}^3/\text{s}$), le coût médian par m de chute des passes en enrochement s'élève à 221 000 € (50% entre 101 000 et 458 000 €) alors qu'il est de 140 000 € (50% entre 70 000 € et 195 000 €) pour des rivières de 30 à 60 m^3/s et 61 000 € (50% entre 31 000 € et 103 000 €) pour des rivières de moins de 10 m^3/s .

3.5.2.3 Effet des caractéristiques de la passe

Nous avons analysé les relations entre les coûts des passes en enrochement et leurs dimensions (longueur, surface, volume de génie civil, volume de blocs) et le débit transitant dans l'ouvrage. Les coûts totaux sont significativement reliés à toutes les caractéristiques des passes. Ils augmentent en fonction de la longueur de l'ouvrage, de la surface, du volume de génie civil, du volume de blocs et du débit.

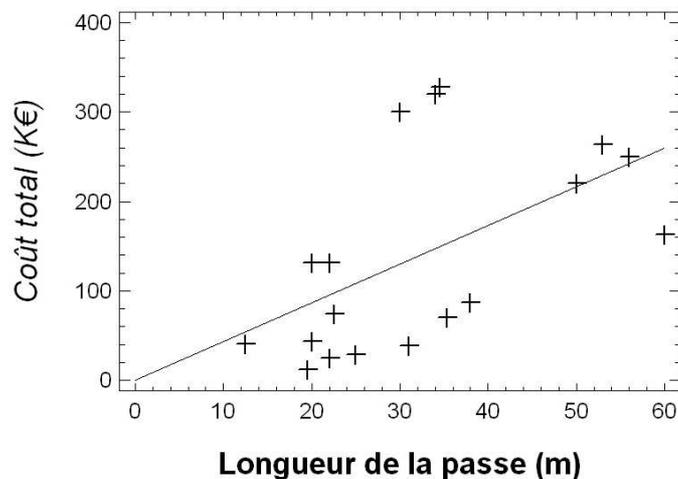


Figure 36 : Relation entre la longueur de la passe en enrochement et le coût total ($\text{Coût total (K€)} = 4.33 (\pm 1.31) \times \text{Long. PEE (m)}$ avec $r^2 = 0.74$ ($p < 0.05$)).

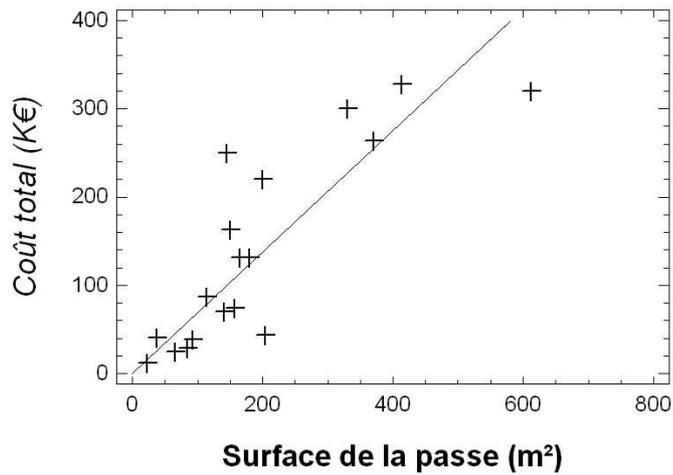


Figure 37 : Relation entre la surface de la passe en enrochement et le coût total
 ($\text{Coût total (K€)} = 0.688 (\pm 0.13) \times \text{Surf PEE (m}^2\text{)}$ avec $r^2 = 0.88$ ($p < 0.05$)).

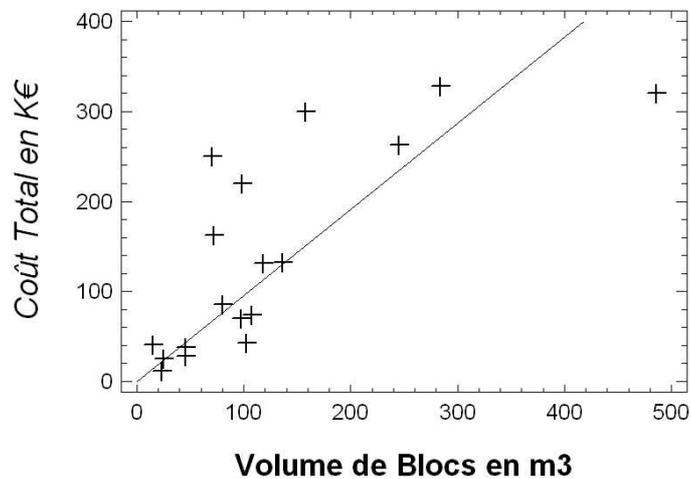


Figure 38 : Relation entre le volume de blocs de la passe en enrochement et le coût total
 ($\text{Coût total (K€)} = 0.96 (\pm 0.24) \times \text{VolBloc PEE (m}^3\text{)}$ avec $r^2 = 0.80$ ($p < 0.05$)).

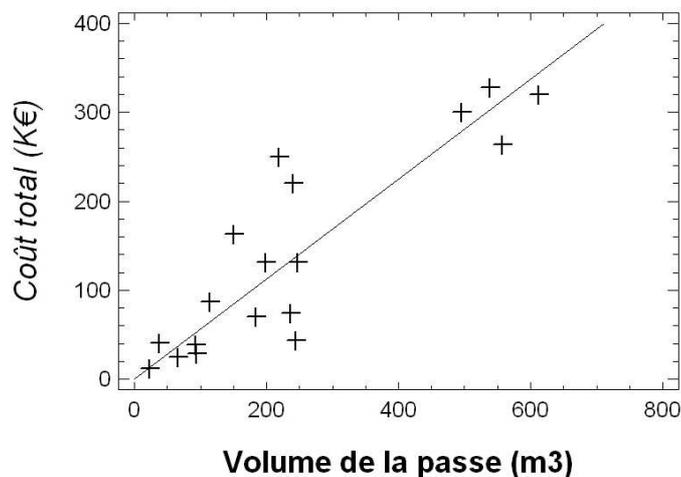


Figure 39 : Relation entre le volume de génie civil de la passe en enrochement et le coût total
 ($\text{Coût total (K€)} = 0.56 (\pm 0.09) \times \text{Vol. PEE (m}^3\text{)}$ avec $r^2 = 0.91$ ($p < 0.05$)).

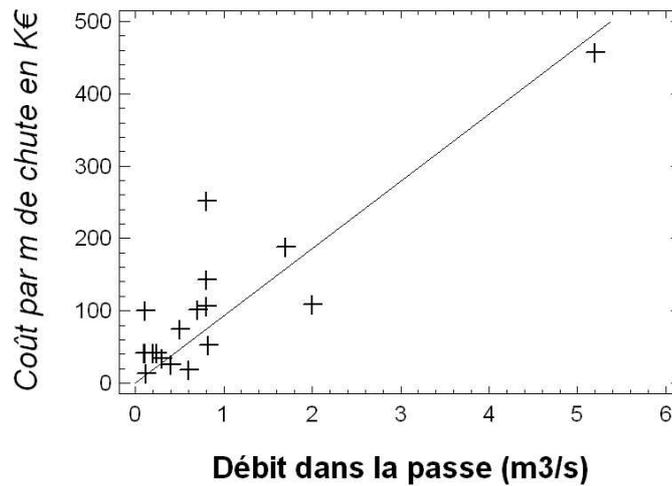


Figure 40 : Relation entre le débit de la passe en enrochement et le coût par m de chute ($\text{Coût total (K€)} = 90.8 (\pm 41.7) \times Q. PEE (m^3 \cdot s^{-1})$ avec $r^2 = 0.55$ ($p < 0.05$)).

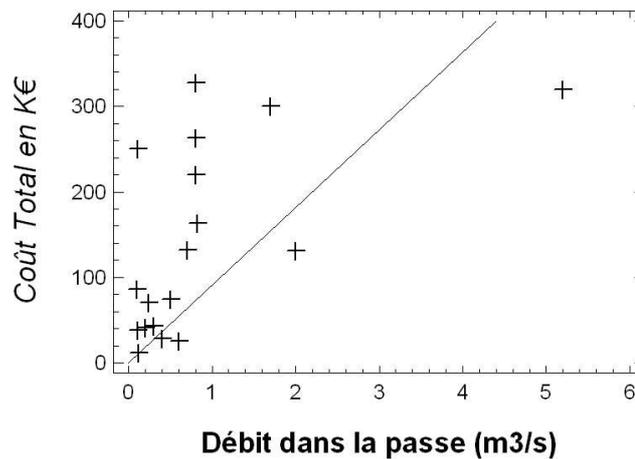


Figure 41 : Relation entre le débit de la passe en enrochement et le coût total ($\text{Coût total (K€)} = 93 (\pm 20.3) \times Q. PEE (m^3 \cdot s^{-1})$ avec $r^2 = 0.84$ ($p < 0.05$)).

3.5.2.4 Modèles d'estimation des coûts des passes en enrochement

Comme pour les passes à bassin, nous avons complété l'approche descriptive par une approche prédictive.

- **Modèle 1 : Hauteur de chute et débit dans la passe**

$$\text{Coût total (K€)} = 93.02 (\pm 28.6) \times \text{Hauteur Chute (m)} \times Q_{\text{passe}} (m^3 \cdot s^{-1})$$

Avec $r^2 = 0.84$ ($p < 0.01$) et test de Durbin Watson à 1.85

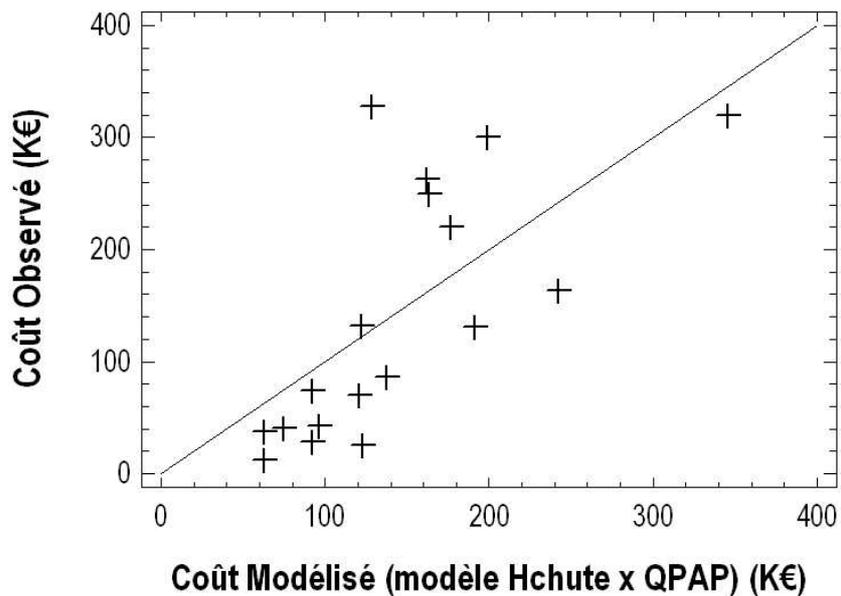


Figure 42 : Modèle d'estimation du coût total des passes à bassin en fonction du de la hauteur de chute et du débit dans la passe.

- **Modèles 2 : Volume du génie civil et Volume de Blocs**

$$\text{Coût Total (K€)} = 0.56 (\pm 0.09) \times \text{VGC (m}^3\text{)}$$

Avec $r^2=0.91$ ($p<0.05$) et Durbin Watson de 1.88 (voir Figure 39)

$$\text{Coût Total (K€)} = 0.96(\pm 0.24) \times \text{VolBloc (m}^3\text{)}$$

Avec $r^2=0.80$ ($p<0.05$) et Durbin Watson de 1.82 (voir Figure 38)

3.5.3 Modèles d'estimation des coûts des passes en enrochement.

Les coûts des dispositifs peuvent être estimés sur la base du produit de la hauteur de chute et du débit dans la passe par les coûts médians, les 1^{er} et 3^{ème} quartiles ainsi que les 1^{er} et dernier déciles.

	Valeurs de référence (en €/m de chute/l.s ⁻¹ dans la passe)
1 ^{er} décile	60
1 ^{er} quartile	88
Médiane	148
3 ^{ème} quartile	203
Dernier décile	396

Tableau 16 : Statistiques utilisées pour l'estimation du coût total d'une passe sur la base de la hauteur de chute et du débit dans la passe.

La même approche basée sur le volume de génie civil peut être utilisée en réalisant le produit du volume de génie civil ou de blocs envisagé par le coût médian, le 1^{er} et le dernier décile par m³ de génie civil.

	Valeurs de référence (en €/m ³ de génie civil)	Valeurs de référence (en €/m ³ de blocs)
1 ^{er} décile	311	607
1 ^{er} quartile	389	701
Médiane	527	1046
3 ^{ème} quartile	735	1719
Dernier décile	1076	2402

Tableau 17: Statistiques utilisées pour l'estimation du coût total d'une passe sur la base du volume de génie civil et/ou blocs.

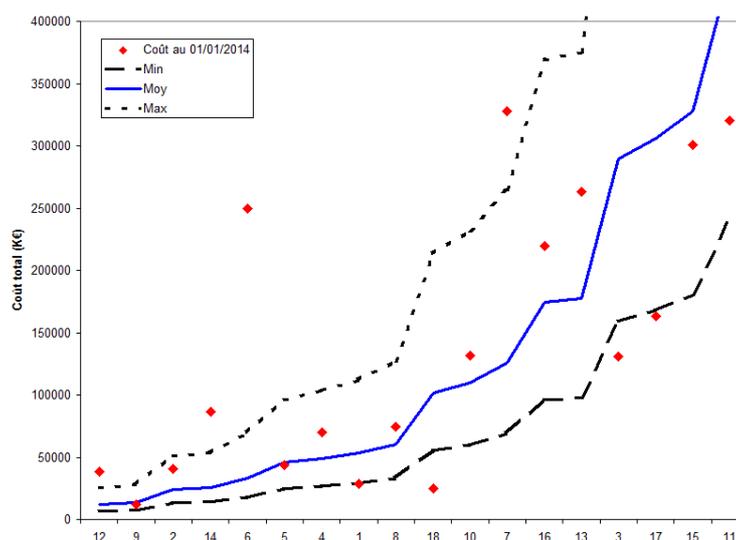


Figure 43 : Estimations des coûts totaux pour des passes en enrochement sur la base de la saisie de la hauteur de chute et du débit prévu dans la passe.

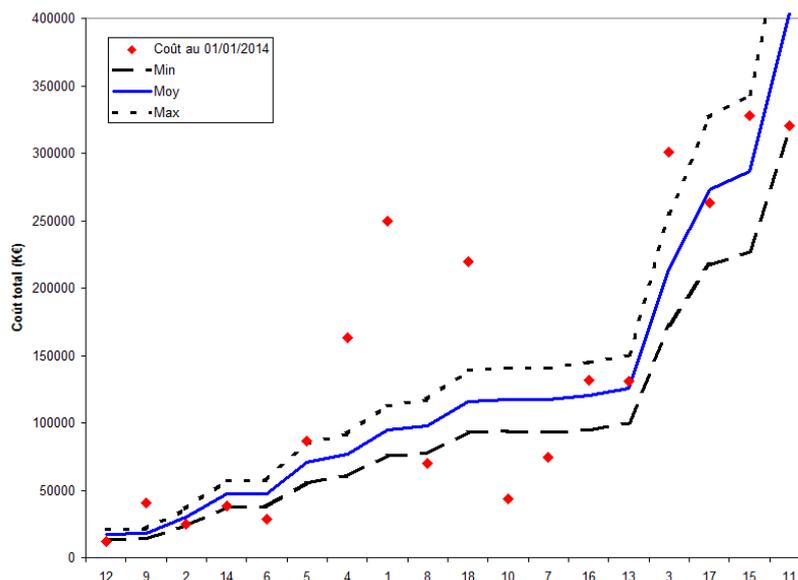


Figure 44 : Estimations des coûts totaux pour des passes en enrochement sur la base de la saisie du volume du génie civil et/ou du volume de blocs de la passe.

La mise en œuvre de la démarche utilisant la hauteur de chute et le débit de la passe permet de classer 60% des dispositifs au sein de l'intervalle de confiance du modèle avec des valeurs estimées variant de $\pm 111\%$.

La mise en œuvre de la démarche en utilisant les volumes de génie civil et de blocs permet de classer 50% des dispositifs au sein de l'intervalle de confiance du modèle avec des valeurs estimées variant de $\pm 20\%$. Cela signifie que pour un ouvrage dont le coût total de construction serait estimé à 100 000 €, le coût final de la passe aura 90% de chance de situer entre 80 000 et 120 000 €.

Avec seulement 18 ouvrages, il est difficile de proposer des outils plus précis. De la même façon, la faiblesse de l'échantillon ne permet pas de construire des modèles par type de passe en enrochement.

L'analyse des 18 passes en enrochement a permis de proposer deux outils d'estimation des coûts :

- un outil basé sur la hauteur de chute et le débit dans la passe,
- un outil basé sur le génie civil de la passe (volume total et/ou volume de blocs).

3.6 Construction d'un outil pour l'estimation des coûts des rivières de contournement.

3.6.1 Caractéristiques générales des dispositifs étudiés

Nous avons sélectionné 8 rivières de contournement comme lors de l'étude de 2001.

Nombre ouvrages	8		8	
	2014		2001	
	CHUTE (m)	MODULE (m ³ /s)	CHUTE (m)	MODULE (m ³ /s)
Moyenne	2,6	26	2,1	19
Mediane	2,6	26	1,9	26
Min	1,2	3	1,3	1
Max	3,6	49	3,0	29
1er quartile	2,4	15	1,6	14
3ème quartile	2,9	35	2,8	28
1er décile	1,8	5	1,5	6
Dernier décile	3,3	49	2,9	29

Tableau 18 : Caractéristiques générales (chute et module) des 8 seuils équipés de rivières de contournement.

Ces dispositifs équipent des seuils et barrages de hauteur assez réduite comprise pour 50% d'entre eux entre 2.4 et 2.9 m pour des modules de 15 à 35 m³/s. Comme pour les passes en enrochement, ces dispositifs, de par les prescriptions techniques de dimensionnement, sont surtout adaptés aux ouvrages de moins de 3-3,5 m de hauteur de chute.

La moitié des rivières de contournement construites depuis 2001 ont des coûts totaux compris entre 189 000 € et 950 000 € (médiane à 413000 €). En 2001, les coûts totaux, par m de chute et par m³ de génie civil étaient plus élevés (médiane à 869 000 €). Toutefois, le faible nombre de dispositifs étudiés ne permet pas de réaliser des comparaisons fiables.

	2014					2001			
	Coût total date de construction	Coût au 01/01/2014	Coût/m de chute au 01/01/2014	Coût/m ³ GCau 01/01/2014	Coût/m de chute et QPAP au 01/01/2014	Coût au 01/01/2014	Coût/m de chute au 01/01/2013	Coût/m ³ GC au 01/01/2013	Coût/m de chute et QPAP au 01/01/2014
	(€)	(€)	(€)	(€)	(€)	(€)	(€)	(€)	(€)
Moyenne	552045	602805	231161	475	311	1798552	832951	2190	1646
Mediane	378541	412557	134214	408	188	869035	294588	1739	2149
Min	41577	45313	21578	72	43	40310	20155	903	168
Max	1521000	1521757	585291	991	988	4511972	2220176	5233	2455
1er quartile	117364	188977	76522	292	73	446152	278845	1384	1052
3ème quartile	861984	950440	370306	715	420	3138121	1369023	2131	2324
1er décile	77573	105261	57639	92	48	270799	167234	1130	586
Dernier décile	1221651	1321447	521555	834	706	3812154	1821582	3701	2444

Tableau 19 : Statistiques générales des différents coûts des rivières de contournement étudiées en 2013-2014 et en 2001.

3.6.2 Facteurs influençant le coût des rivières de contournement

Nous avons testé l'effet de différents facteurs sur le coût des rivières de contournement.

3.6.2.1 Effet du module et de la hauteur de chute.

Le coût total augmente significativement avec le module et la hauteur de chute mais les relations statistiques sont de qualité médiocre (forts intervalles de confiance) ne permettant pas, sur la base de ces caractéristiques, de construire un outil d'estimation des coûts.

3.6.2.2 Effet des caractéristiques des dispositifs.

Nous avons analysé les relations entre les coûts des rivières de contournement et leurs dimensions (longueur, surface, volume de génie civil, pente) et le débit transitant dans la rivière de contournement. Les coûts totaux sont significativement reliés à toutes les caractéristiques des passes. Ils augmentent en fonction de la largeur, de la surface, du volume, du débit et de la pente des ouvrages, ainsi que de la chute, du module de la rivière. Les meilleures relations statistiques sont obtenues avec la largeur et la surface de la passe.

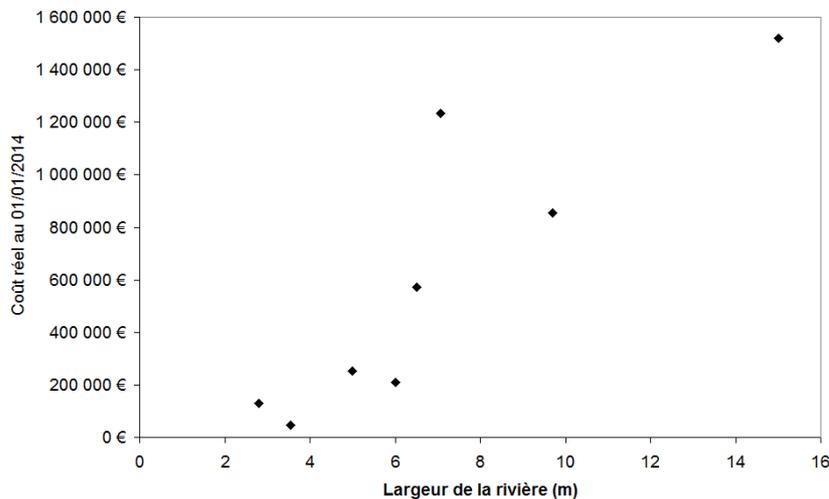


Figure 45 : Relation entre le coût total des rivières de contournement et leur largeur.

3.6.2.3 Modèles d'estimation des coûts des passes en enrochement

Nous n'avons pu construire qu'un modèle statistique utilisant comme variable la largeur et la pente de la rivière de contournement.

- **Modèle : Largeur et pente de la rivière de contournement**

Coût total (K€) = (-131.55 (±59) x pente (%)) + (133.06 (±60) x largeur RC (m)) Avec $r^2 = 0.92$ ($p < 0.05$) et Test de Durbin Watson à 1.96

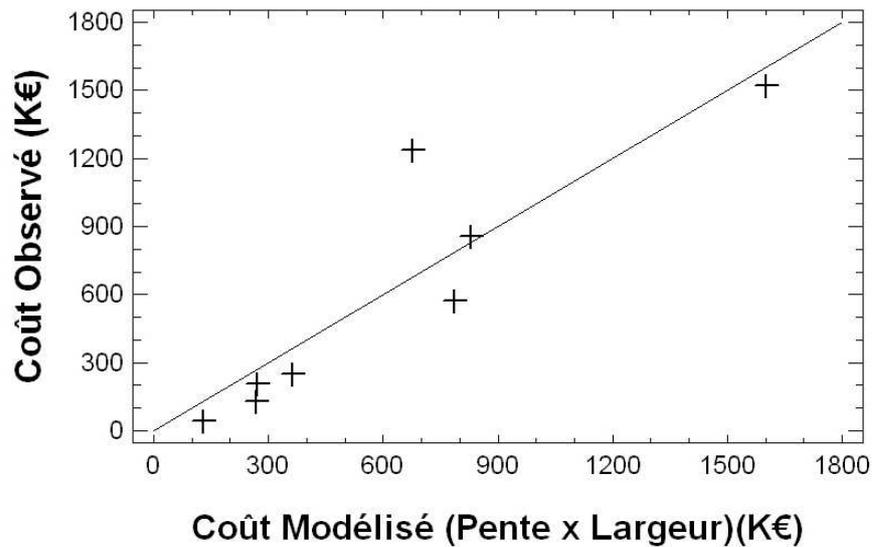


Figure 46 : Comparaison des coûts observés et modélisés à partir de la largeur et de la pente des rivières de contournement.

3.6.3 Modèles d'estimation des coûts.

Comme pour les autres types de passes, les coûts des dispositifs peuvent être estimés sur la base du produit de la hauteur de chute et du débit dans la passe par les coûts médians, les 1^{er} et 3^{ème} quartiles, ainsi que les 1^{er} et dernier déciles.

	Valeurs de référence (en €/m de chute/l.s ⁻¹ dans la passe)
1 ^{er} décile	48
1 ^{er} quartile	73
Médiane	188
3 ^{ème} quartile	420
Dernier décile	706

Tableau 20: Statistiques utilisées pour l'estimation du coût total d'une passe sur la base de la hauteur de chute et du débit dans la passe.

Cette approche fournit un intervalle de confiance très large peu compatible avec un outil d'estimation.

Nous avons donc décidé d'utiliser le modèle statistique basé sur la largeur et la pente de la rivière de contournement.

L'analyse des 8 rivières de contournement a permis de proposer un outil d'estimation des coûts basé sur les caractéristiques de l'ouvrage que sont la largeur et la pente.

3.7 Construction d'un outil pour l'estimation des coûts des pré-barrages

3.7.1 Caractéristiques générales des dispositifs étudiés

Nous n'avons obtenu des informations que sur 5 pré-barrages ce qui ne permet pas de construire un nouvel outil d'estimation des coûts. Nous proposons donc de reprendre la démarche de 2001 utilisant les coûts médians, les 1^{er} et 3^{em} quartiles, ainsi que les 1^{ers} et derniers déciles.

Nombre ouvrages	5		29	
	2014		2001	
	CHUTE (m)	MODULE (m ³ /s)	CHUTE (m)	MODULE (m ³ /s)
Moyenne	3.4	9	1.7	31
Mediane	2.0	3	1.6	20
Min	1.0	0.1	0.9	1
Max	9.8	26	4.2	125
1er quartile	1.1	0.2	1.3	14
3ème quartile	3.1	19	2.0	47
1er décile	1.0	0.1	1.1	2
Dernier décile	7.1	23	2.3	52

Tableau 21: Caractéristiques générales (chute et module) des 5 seuils équipés de pré-barrages.

Ces dispositifs équipent des seuils et barrages de hauteur assez réduite, comprises pour 50% d'entre eux entre 1.1 et 3.1 m pour des modules de 0.2 à 19 m³/s. Comme pour les passes en enrochement et les rivières de contournement, ces dispositifs, de par les prescriptions techniques de dimensionnement, sont surtout adaptés aux ouvrages de moins de 3-3,5 m de hauteur de chute. Les coûts médians des pré-barrages étudiés est de 77 000 € et 59 €/m de chute et par l.s¹ de débit dans le dispositif (coût très proche de celui de 2001).

	2013				2001	
	Coût total date de construction	Coût au 01/01/2014	Coût/m Chute/QPAP au 01/01/2014	Coût/m³ GCau 01/01/2014	Coût au 01/01/2014	Coût/m Chute/QPAP
	(€)	(€)	(€)	(€)	(€)	(€)
Moyenne	96567	108678	136	525	690448	107
Mediane	74080	77154	59	701	443814	69
Min	23683	28024	56	206	90958	
Max	191000	203127	381	776	5307911	
1er quartile	35391	41877	58	214	192432	30
3ème quartile	158682	193209	129	730	711635	110
1er décile	28366	33565	57	209	116357	14
Dernier décile	178073	199160	280	757	1118894	823

Tableau 22 : Statistiques générales des différents coûts des pré-barrages étudiés en 2013-2014 et en 2001.

3.7.2 Facteurs influençant le coût des pré-barrages

Avec seulement 5 dispositifs, nous n'avons pas effectué de tests statistiques mettant en relation les caractéristiques de la rivière ou de l'ouvrage avec le coût des pré-barrages.

Nous n'avons également pu construire de modèles statistiques avec seulement 5 pré-barrages.

3.7.3 Modèle d'estimation des coûts des prébarrages.

Nous avons repris l'outil d'estimation développé en 2001 sur la base du produit de la hauteur de chute et du débit dans la passe par les coûts médians, les 1^{er} et 3^{ème} quartiles, ainsi que les 1^{er} et dernier déciles.

	Valeurs de référence (en €/m de chute/l.s ⁻¹ dans la passe)
1 ^{er} décile	67
Médiane	20
Dernier décile	741

Tableau 23: Statistiques utilisées pour l'estimation du coût total d'un pré-barrage sur la base de la hauteur de chute et du débit dans la passe.

La mise en œuvre de cette approche permet une évaluation des coûts relativement réaliste pour les 5 dispositifs étudiés en 2013-2014.

Coût total au 01/01/2014 (en €)	Coût estimé par l'outil de calcul (en €)
203 127	235 262
77 154	40 331
41 877	50 494
28 024	4 941
193 209	221 819

Tableau 24 : Comparaison des coûts totaux des 5 pré-barrages étudiés en 2013-2014 avec les coûts estimés sur la base de l'outil de 2001.

Pour les pré-barrages, nous proposons de reprendre l'outil de calcul de l'étude de 2001 en réalisant une mise à jour des coûts médians, des quartiles et des déciles par m de chute et par l/s de débit transitant dans la passe.

3.8 Construction d'un outil pour l'estimation des coûts des passes à anguilles

3.8.1 Caractéristiques générales des dispositifs étudiés

Nous avons sélectionné 17 passes à anguille :

- 8 passes piège,
- 7 rampes installées sur un canal en génie civil avec des substrats à brosse,
- 1 rampe sur un canal en préfabriqué (canal léger),
- 1 rampe rustique en enrochement.

Type de passes à anguilles	2014	2001
Passe rustique en enrochement	1	
Rampe avec canal léger	1	18
Rampe avec canal en GC	7	
Passe piège	8	
Total	17	18

Tableau 25 : Types de passes à anguilles étudiées.

	2014		2001	
	CHUTE (m)	MODULE (m ³ /s)	CHUTE (m)	MODULE (m ³ /s)
Moyenne	5.0	34	2.1	
Mediane	2.7	2.3	1.8	
Min	0.8	0.2	1.5	
Max	19.7	460	3.5	
1er quartile	1.8	1.3	1.7	
3ème quartile	7.0	9	2.4	
1er décile	1.5	0.6	1.6	
Dernier décile	11.3	40	3.3	

Tableau 26: Caractéristiques générales (chute et module) des 17 seuils équipés de passes à anguilles été étudiés en 2014 comparés à ceux analysés en 2001.

Ces dispositifs équipent des seuils et barrages de hauteur assez significative, comprise pour 50% d'entre eux entre 1,8 et 7 m pour des modules de 1,3 à 9 m³/s. Par rapport à l'étude de 2001 où seules des rampes installées sur des canaux préfabriqués avaient été étudiées, l'étude de 2013-2014 a permis d'obtenir des informations sur des types de passes différentes, mais malheureusement en nombre limité ce qui handicape fortement la construction d'un outil d'estimation des coûts (pas de rampes avec des substrats à plots).

La moitié des passes à anguilles construites depuis 2001 ont un coût compris entre à 30 000 et 51 000 € (médiane à 42 000 €). En 2001, ce coût était de 76 000 €, mais il s'agissait de type de rampes différentes donc peu comparables avec l'étude de 2013-2014.

	2014			2001		
	Coût total date de construction	Coût au 01/01/2014	Coût/m de rampe	Coût total date de construction	Coût au 01/01/2014	Coût/m de rampe
	(€)	(€)	(€)	(€)	(€)	(€)
Moyenne	37062	46841	3536	60662	94030	14660
Mediane	32550	42101	3320	49026	75994	16887
Min	10505	12833	1524	25365	39317	4626
Max	85552	115507	6829	185394	287371	39961
1er quartile	29291	30512	2742	34116	52881	5626
3ème quartile	44277	51056	4120	67304	104325	17993
1er décile	11873	14504	2456	25584	39656	5036
Dernier décile	70014	87598	4911	111462	172773	20839

Tableau 27 : Statistiques générales des différents coûts des passes à anguilles étudiées en 2013-2014 et en 2001.

3.8.2 Facteurs influençant le coût des passes à anguille.

Nous avons testé l'effet de différents facteurs sur le coût des passes à anguilles.

3.8.2.1 Effet du type de passe

Type de passes à anguilles	Nbre	Moyenn	Mediane	Min	Max	1er quartile	3ème quartile	1er décile	Dernier décile
Passe rustique en enrochement	1	26778							
Rampe avec canal léger	1	89335							
Rampe avec canal en GC	7	44062	30512	12833	115507	14300	60490	13100	98067
Passe piège	8	46469	44802	40630	59780	42101	47623	41660	53673

Tableau 28 : Caractéristiques des coûts des différents types de passes à anguille étudiées.

Les données ne permettent pas réellement de comparer les coûts des rampes installées sur des canaux en génie civil et ceux des passes piège. Leur coût total est assez proche, mais il est important de noter la très forte homogénéité des passes piège avec un coût peu variable (entre 40 000 € et 50 000 €) quel que soit l'ouvrage, tandis que celui des rampes est beaucoup plus variable (50% entre 14 000 € et 60 000 €).

On peut souligner que pour les faibles hauteurs de chute (< 2 m) le coût des passes piège est plus élevé que celui des rampes.

3.8.2.2 Effet du module et de la hauteur de chute

Il n'y a pas d'effet du module de la rivière sur le coût des passes à anguilles. Ces ouvrages sont très spécifiques et la valeur de débit transitant dans l'ouvrage est très peu proportionnelle au débit de la rivière.

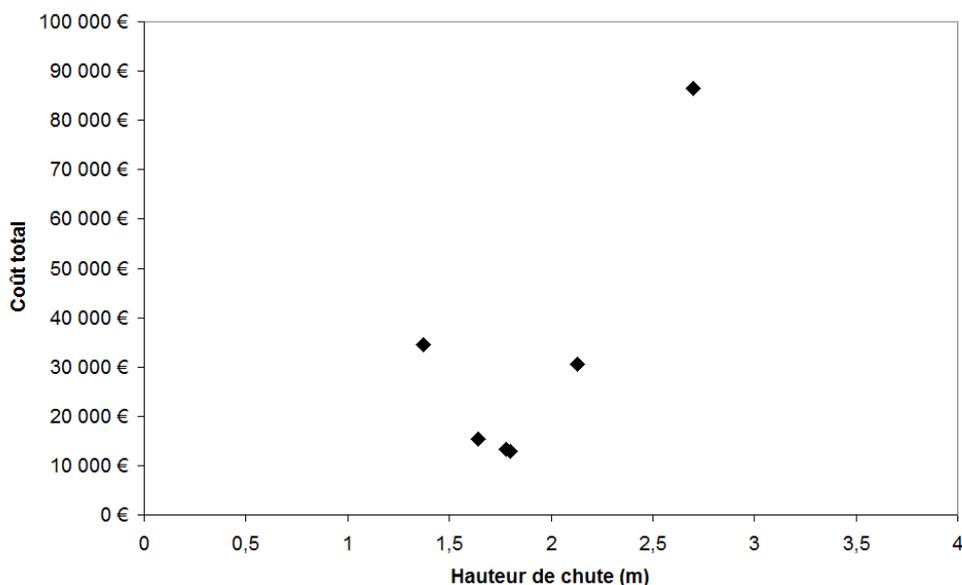


Figure 47 : Relation entre la hauteur de chute et le coût total des rampes installées sur des canaux en génie civil.

Le coût des rampes sur des canaux en génie civil est significativement corrélé à la hauteur de chute. Toutefois, du fait du faible nombre d'ouvrages, cette relation ne peut être utilisée comme outil d'estimation des coûts.

3.8.3 Modèles d'estimation des coûts des passes à anguilles

Contrairement à la majorité des autres types de passes, nous avons privilégié une approche de statistiques prédictives pour construire un modèle d'estimation des coûts. En effet, la valeur du débit dans la passe ne peut constituer pour les passes à anguilles un bon facteur explicatif. Il n'était donc pas pertinent d'utiliser des statistiques de coûts par m de chute et l/s dans la passe.

Nous n'avons pu construire qu'un modèle basé sur les caractéristiques du génie civil.

- **Modèle 1 : Longueur développée de la rampe**

$$\text{Coût total (K€)} = 2.69 (\pm 0.53) \times \text{Longueur dev. (m)}$$

Avec $r^2 = 0.89$ ($p < 0.05$) et Test de Durbin Watson à 1.94

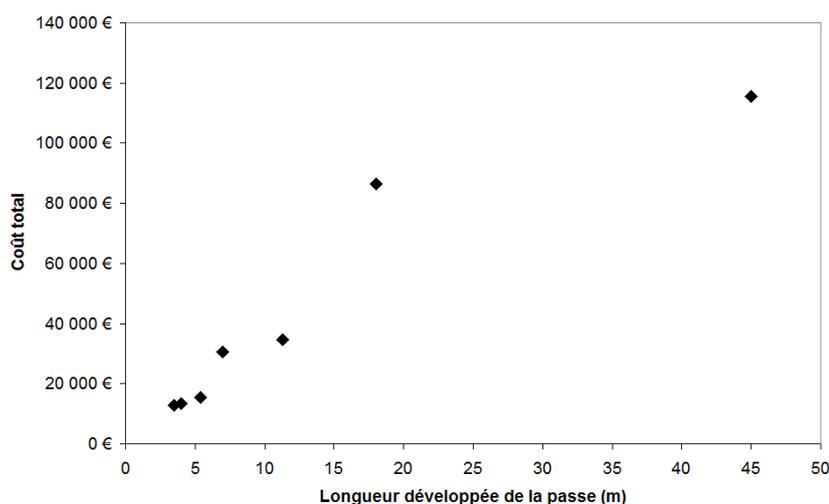


Figure 48 : Relation entre la longueur développée des rampes installées sur des canaux en génie civil et le coût total des passes.

- **Modèle 2 : Surface de la rampe**

$$\text{Coût total (K€)} = 2.53 (\pm 1.06) \times \text{Surface rampe (m}^2\text{)}$$

Avec $r^2 = 0.65$ ($p < 0.05$) et Test de Durbin Watson à 1.82

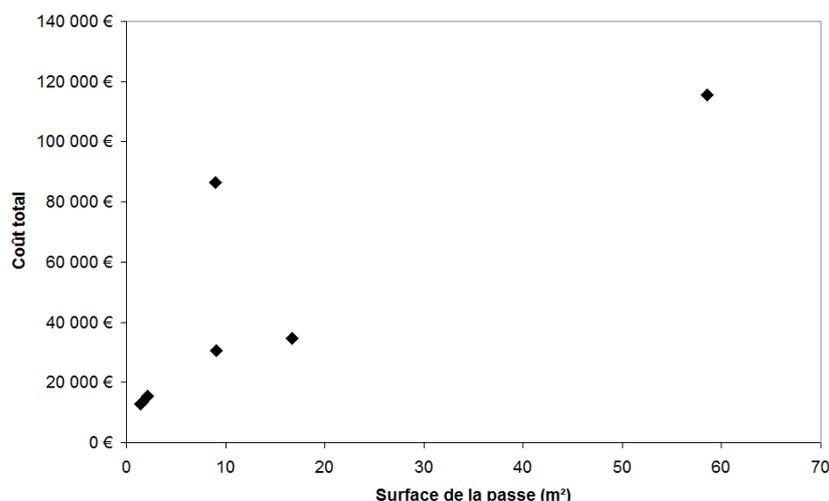


Figure 49 : Relation entre la surface des rampes installées sur des canaux en génie civil et le coût total des passes.

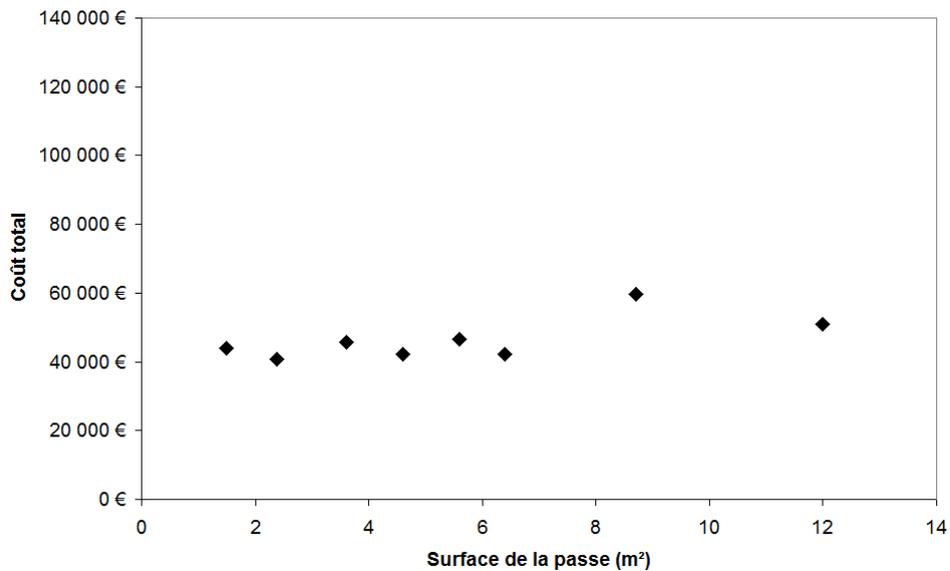


Figure 50 : Relation entre surface de la passe et coût total pour les passes piège.

Pour les passes piège, les coûts ne sont pas liés ni à la hauteur de chute, ni aux caractéristiques du génie civil. De par leur conception et leur mode de fonctionnement, les coûts sont surtout liés au dispositif de piégeage des poissons et donc assez constants quel que soit l'ouvrage.

La validité des modèles est limitée actuellement à des ouvrages de moins de 60 m² de surface et 50m de longueur.

3.8.4 Coûts des matériaux

Les rampes spécifiques aux anguilles sont équipées de type de substrat :

- des brosses avec différentes densités,
- des plots.

Nous avons recherché auprès des fournisseurs les coûts moyens par m² des différents types de support. Actuellement, 2 types de substrats sont recommandés, les brosses et les plots. Les coûts au m² installés varient de 250 à 500 €.

Cette fourchette inclue les coûts de Marseille Modelage, Sotubema, et Fishpass.

L'analyse des 17 passes à anguille et surtout des 7 rampes sur canaux en génie civil et des 8 passes pièges a permis de proposer des outils d'estimation des coûts :

- un outil basé sur les caractéristiques du génie civil (longueur développée ou surface) pour les rampes,
- un coût médian pour les passes pièges.

4 Discussion et analyse critique des résultats

4.1 Qualité du jeu de données

A l'échelle nationale, nous n'avons pu récolter des informations assez fiables que sur 114 dispositifs de franchissement. Cet échantillon reste relativement limité dans la perspective de construire des outils d'estimation des coûts fiables et totalement représentatifs des différents contextes géographiques et des différents types d'ouvrage.

De plus, les données disponibles dans les dossiers retenus ont présenté des niveaux de précision variables notamment en termes de coûts avec 11% des coûts fournis uniquement au stade APS et 54% au stade travaux. En termes de détail des coûts, il a également été très difficile d'obtenir des factures détaillées permettant d'identifier les coûts de construction des coûts d'installation de chantier, voire des coûts d'étude.

L'ensemble de ces considérations conduit à proposer des outils dont les intervalles de confiance restent importants et pour lesquels il est difficile de rechercher de manière détaillée les facteurs pouvant expliquer des écarts significatifs de coûts.

4.2 Champs d'application

Les outils proposés à l'issue de ce travail permettent des estimations de coûts à deux échelles de travail :

- pour une approche à l'échelle d'un axe de cours d'eau dans le cadre d'une étude diagnostic devant aboutir à des choix de solutions techniques et des esquisses par ouvrage,
- pour une approche à l'échelle d'un ouvrage devant aboutir à des avant-projets.

Les outils sont donc à utiliser dans des démarches amont. Il ne sont pas pertinents à partir du stade projet. A ce niveau de travail de dimensionnement d'une passe à poissons, l'estimation des coûts doit être réalisée sur la base d'une connaissance précise de l'ensemble des travaux à conduire, de leur volumétrie et des technologies à retenir.

4.3 Evaluation des coûts détaillés d'un projet de passes à poissons

4.3.1 Rappels des différentes phases et coûts des études

Un projet de définition d'une mesure de restauration de la libre circulation piscicole ou d'atténuation d'impacts d'un barrage comporte plusieurs phases :

ETAPE 1 : Récolte des informations *relatives aux enjeux liés à la continuité écologique, à l'ouvrage, aux usages associés, à l'hydrologie, à la morphologie du tronçon de cours d'eau.*

ETAPE 2 : Analyse des données *pour l'identification des enjeux écologiques, des impacts de l'ouvrage, de l'hydrologie des périodes clés de migration, du comportement hydraulique du cours d'eau, de l'évolution temporelle de la chute totale.*

ETAPE 3 : Choix de la solution technique (restauration complète ou atténuation des impacts (passes à poissons)). Si construction d'une passe à

poissons retenue alors **Choix du type de dispositif de franchissement ou du scénario de gestion** : nombre, emplacement, type. Phase Esquisse (ESQ)

ETAPE 4 : Dimensionnement du/des dispositif(s) : pente, débit, topographie, rugosité : Phase Avant-Projet (AVPS, AVPD).

ETAPE 5 : Réalisation du projet : Finalisation du projet (PRO) et réalisation des plans d'Exécution (EXE) ; construction du dispositif avec mission d'assistance à maîtrise d'œuvre.

ETAPE 6 : Recollement du projet

A chaque étape correspondent des études différentes. Elles doivent être réalisées par des cabinets d'ingénierie spécialisés ayant à la fois des compétences en hydraulique, en biologie aquatique et en travaux en cours d'eau.

4.3.2 Coûts des différentes études

4.3.2.1 Les études de diagnostic d'axe (étape 1, 2 et 3)

Ces études ont pour objectif, sur la base du recensement des obstacles, de leur caractérisation, ainsi que de l'identification des enjeux écologiques, de définir les solutions techniques les plus appropriées pour la restauration de la continuité écologique en fonction notamment des contraintes d'usages. Le coût de ces études dépend du linéaire de cours d'eau concerné et du nombre d'ouvrages à analyser. Il peut également varier selon la qualité des informations disponibles (connaissance de tous les seuils et de leurs caractéristiques, de l'hydrologie, des données biologiques).

Globalement, les fourchettes de coûts s'échelonnent de 4 000 à 8 000 € par ouvrage en sachant que quel que soit le nombre d'ouvrages, il existe une part relativement fixe propre à la définition des enjeux, à la présentation du contexte et à l'analyse hydrologique générale du bassin (5 000 à 7 000 €). Cela signifie que pour une étude diagnostic d'axe comprenant:

- 10 ouvrages, les coûts varieront entre 40 000 € et 80 000 €,
- 5 ouvrages 25 000 € et 40 000 €.

4.3.2.2 Les études de dimensionnement (étape 4 et 5)

Ces études ont pour objectif de dimensionner la ou les solutions techniques retenues pour le franchissement piscicole. Elles doivent successivement fournir les avant-projets, puis les projets aboutissant aux plans d'exécution. Le coût des études dépend des informations mises à disposition suite aux éventuelles études d'axe réalisées.

- Situation d'un ouvrage où un diagnostic d'axe a été réalisé et où le choix de la solution technique a été arrêté : coût de l'étude de 4 000 à 7 000 € par ouvrage,
- Situation d'un ouvrage où aucun diagnostic préalable n'a été effectué : coût de l'étude de 8 000 à 15 000 € par ouvrage.

4.3.2.3 Les études de maîtrise d'œuvre

En général, ces études doivent assurer :

- L'assistance pour la passation des contrats de travaux (ACT),
- L'examen de conformité visa des plans d'exécution de l'entreprise (VISA),
- La direction de l'exécution du contrat de travaux (DET),
- L'assistance lors des opérations de réception (AOR).

Les coûts sont très souvent proportionnels au montant des travaux avec une évolution du pourcentage selon le coût : de l'ordre de 10% du montant total pour des ouvrages de plus de 500 000 €, de 12-15% pour des dispositifs de 100 000 à 500 000 € et 15-20% pour des passes de moins de 100 000 €.

4.3.3 Coût des différentes phases de réalisation du chantier

Sur la base de 35 dossiers disposant de documents financiers suffisamment détaillés, nous avons pu identifier les coûts :

- de l'installation du chantier,
- de l'isolement du chantier (batardeaux, pompage),
- des travaux de construction de la passe (démolition, construction, remise en état).

	Installation du chantier	Installation+ isolement	Travaux de construction
Médiane des coûts (% du coût total hors études)	6%	18%	82%
1 ^{er} décile des coûts	2%	10%	90%
1 ^{er} quartile des coûts	3%	12%	88%
3 ^{ème} quartile des coûts	8%	21%	79%
Dernier décile des coûts	10%	26%	74%

Tableau 29 : Détail des coûts de travaux de construction de passes à poissons issus de l'analyse de 35 des 114 dossiers sélectionnés.

Les coûts d'installation et d'isolement de chantier sont assez peu variables avec 50% des dossiers dans lesquels ces coûts ont représenté de 12% à 21% du coût total. Les variations observées sont souvent liées aux conditions d'accès avec notamment la nécessité ou non de construire une piste d'accès et une plate-forme pour les engins et les matériaux.

5 Conclusions

Le travail conduit sur 114 passes à poissons réparties sur l'ensemble du territoire a permis :

- d'évaluer les principaux facteurs agissant sur les coûts de réalisation de passes à poissons,
- de construire un outil global d'estimation des coûts d'un dispositif de franchissement sur la base du module de la rivière et de la hauteur de chute au barrage,
- de construire pour les passes à bassins, les passes en enrochement, les rivières de contournement et les passes à anguilles des outils d'estimation des coûts basés sur les caractéristiques du barrage et de la passe (hauteur de chute, débit, dimensions, volumétrie du génie civil).

La moitié des 114 passes à poissons étudiées ont des coûts totaux de conception et de construction variant de 46 000 à 320 000 € (médiane à 130 000 €) et pour 90% des dispositifs les coûts varient de 36 000 à 621 000 €. Ramené à la hauteur de chute du barrage, les coûts de 50% des dispositifs varient de 27 000 € à 133 000 €/m de chute (médiane à 69 000 €/m de chute), tandis que pour le volume de génie civil ces coûts varient de 700 € à 2 300 €/m³ de volume de la passe (médiane à 1 300 €/m³). On compte en moyenne 200 €/m de chute/l.s¹ de débit dans la passe.

Les coûts sont très souvent liés à la hauteur de chute au barrage, au débit de la passe, ainsi qu'aux dimensions (longueur, largeur, volume du génie civil, volume de blocs).

Les coûts de réalisation d'une passe à poissons intègrent :

- les études initiales (diagnostic, dimensionnement) qui s'élèvent en général entre 8 000 et 15 000 € pour un ouvrage
- les études de maîtrise d'œuvre qui correspondent souvent à un pourcentage du coût des travaux (de l'ordre de 10% à 20%),
- les études propres à la construction (études géotechniques, études béton) (0.5 à 2% du coût des travaux),
- l'installation de chantier (de 2 à 10% du coût des travaux),
- l'isolement du chantier (de 8 à 16% du coût des travaux).

L'ensemble des coûts restent variables selon la géographie, les possibilités d'accès et de fourniture en matériaux.

Ce travail a permis d'observer une augmentation significative des coûts des passes à poissons depuis l'étude de 2001, augmentation supérieure à celle de l'Indice des Travaux Publics (+55% pour les passes à bassin). Ceci peut être attribué en partie à des changements dans les préconisations de dimensionnement relatives à des attentes plus fortes vis-à-vis de l'efficacité des dispositifs (augmentation des volumes de bassin, diminution des hauteurs de chute entre bassins). Il semble important, au vu de l'ampleur des futurs travaux sur la continuité écologique, d'engager un travail plus approfondi sur l'optimisation des coûts de ces dispositifs notamment par le jeu des échelles de travail, du regroupement dans la réalisation des travaux et du développement technologique.

ANNEXES

ANNEXE 1 : Liste des sites étudiés.

Bassin hydrographique	Date construction	Ouvrage	Rivière	Département	Type de PAP
LB	2008	MOULIN NEUF	Loisance	35	PAB
SN	2008	BARRAGE DE VERBERIE	Oise	60	PAB
LB	2007	NOTRE DAME	Alagnon	15	PAB
SN	2011	BARRAGE DE VENETTE	Oise	60	PAB
SN	2008	BARRAGE DE SARRON	Oise	60	PAB
SN	2006	BARRAGE DE CREIL	Oise	60	PAB
SN	2008	BARRAGE DE L'ISLE ADAM	Oise	60	PAB
LB	2010	MOULIN DE GATINEAU	Creuse	86	PAB
SN	2011	BARRAGE DE BORAN	Oise	60	PAB
RMC	2009	SEUIL DE LA DETORBE	l'Yzeron	69	PAB
RHM	2012	BARRAGE DE L'USINE	Cleurie	88	PAB
SN	2009	BARRAGE DE MAILLY LA VILLE	Yonne	89	PAB
RHM	2011	BARRAGE DES GRANDS VIAUX	Chajoux	88	PAB
RMC	2009	BARRAGE DE JALLERANGE	Ognon	25	PAB
SN	2009	VILLENEUVE SUR YONNE	Yonne	89	PAB
LB	2009	SEUIL DE CROUIN	Charente	16	PAB
SN	2008	BARRAGE DE PONTOISE	Oise	95	PAB
LB	2011	FERRIERES BAS	Sianne	43	PAB
RMC	2011	SEUIL D'OLETTE	Cabrils	66	PAB
RHM	2011	BARRAGE D'ISSENHEIM	Lauch	68	PAB
RMC	2009	SEUIL DE LANAS	Ardèche	07	PAB
RHM	2012	SEUIL DE GUEBWILLER	Lauch	68	PAB
LB	2008	MOULIN DE SAINT-MARS	Vienne	86	PAB
LB	2011	PERSIERES	Besbre	03	PAB
RMC	2010	BARRAGE D'AUXONNE	Saone	21	PAB
RHM	2009	SEUIL DE MUTZIG	Bruche	67	PAB
RHM	2008	BARRAGE DE BLIES GUERSWILLER	Blies	57	PAB
LB	2008	MOULIN DE BONNEUIL	Vienne	86	PAB
RHM	2011	BARRAGE DE LA CUVE	Chajoux	88	PAB
SN	2009	SEUIL DE PREZ SUR MARNE	Marne	52	PAB
RHM	2011	BARRAGE DES ZELLES	Chajoux	88	PAB
RHM	2011	BARRAGE DE NEUBOIS	Giessen	67	PAB
RHM	2012	BARRAGE DE BUHL	Lauch	68	PAB
AG	2005	SEUIL DES ARRATS	Adour	40	PAB
AG	2009	BARRAGE DE LAGARDE	Tarn	82	PAB
RMC	2010	SEUIL DE MOULIN NEUF	Aude	11	PAB
RMC	2012	SEUIL DE CARABOTTE	Hérault	34	PAB
RHM	2009	CENTRALE DE LA PLATINERIE	Crusnes	54	PAB
AG	2008	BARRAGE DE BIZANOS	Gave de Pau	64	PAB
RHM	2007	CENTRALE DE CHARMES	Moselle	88	PAB
RHM	2007	BARRAGE DE MEREVILLE	Moselle	54	PAB
AG	??	BARRAGE DE MALAUSE	Garonne	82	PAB
LB	2012	MOULIN DE PILAS (barrage)	Vienne	16	PAB
LB	2012	MOULIN DE VILLARS (usine)	Vienne	86	PAB
RMC	2009	SEUIL DE VALLON SALAVAS	Ardèche	07	PAB
LB	2012	ROANNE	Loire	42	PAB
LB	2008	LORRAINS	Allier	58	PAB
LB	2005	GUILY GLAZ	Aulne	29	PAB+PAA
AG	2008	BARRAGE DE MASSEYS	Gave d'Oloron	64	PAB+PAA
LB	2002	SEUIL DE BALZAC	Charente	16	PAB+PAA
RMC	2012	SEUIL DE BLADIER-RICARD	Hérault	34	PAB+PAA
SN	2007	MOULIN PERSARD	Bieu	50	PAB+PAA
AG	2008	BARRAGE DE MONTFOURRAT	Dronne	33	PAB+PAA
SN	2012	POSES	Seine	27	PAB+PAA

Bassin hydrographique	Date construction	Ouvrage	Rivière	Département	Type de PAP
AG	2009	BESETTE	Diege	19	PEE
AG	2009	Moulin MURAT	Loyre	19	PEE
LB	2012	MOULIN DE VILLARS (barrage)	Vienne	86	PEE
RHM	2011	BARRAGE DE VILLE	Giessen	67	PEE
RHM	2008	BARRAGE DE SAINT-AURICE	Giessen	67	PEE
RMC	2011	SEUIL DU ROUBION	Drôme	26	PEE
RMC	2009	SEUIL DE CALLET	Gardon	30	PEE
RMC	2011	SEUIL DES PUES	Drome	26	PEE
RMC		BELONCHAMP (La Bourre de Soie)	Radon	70	PEE
RHM		KOLBSHEIM	Bruche		PEE
LB	2013	PONT DU CHÂTEAU	Allier	63	PEE
AG	2010	LE BOUYRE	Maumont	19	PEE
RMC	2013	SEUIL DE CANET	Têt	66	PEE
LB	2013	KERNANSQUILLEC	Léguer	22	PEE
RMC	2012	MALHAUTE	Orb	34	PEE
RMC	2013	FRAISANS	Doubs	39	PEE
AG	2007	BARRAGE DE CAU AMONT	Gave d'Ossau	64	PB
LB	2011	SEUIL DE COUDES SOUS IAT5	Louze chambo	63	PB
RMC	2010	SEUIL DE CHAZOTIER	l'Yzeron	69	PB
RMC	2010	SEUIL DE LA FERME DES ADRETS	l'Yzeron	69	PB
SN	2012	BRAS DIEVET	Eure	27	PB
RHM	2010	BARRAGE D'AVOLSHEIM	Bruche	67	RIV
RHM	2010	BARRAGE DE KAYSERSBERG	Weiss	68	RIV
RMC	2009	SEUIL DU LIVRON (BAIX LOGIS NEUF)	Drôme	26	RIV
RMC	1999	BARRAGE DE CHATILLON SUR LISON	Loue	25	RIV
RMC	2010	BARRAGE DE BULLON	Loue	25	RIV
SN	2010	CLAPET DE LA VILETTE	Eure	27	RIV
SN	2004	MEREY	Eure	27	RIV
RMC	2013	BARRAGE DE VALLABREGUES	Gardon	30	RIV
LB	2013	MOULIN GRAND	Allagnon	15	PEE
LB	2013	MOULIN D'EN HAUT	Sioulet	63	PEE
LB	2004	CHATELIER	Rance	22	PAA
AG	2009	USINE DE GOLFECH	Garonne	82	PAA
AG	2005	SEUIL DES ANGUILLONS	Courant de Mimizan	40	PAA
AG	2005	SEUIL DE PONT ROUGE	Courant de Mimizan	40	PAA
AP	2008	BARRAGE DE HERNICOURT AMONT	Ternoise	62	PAA
LB	2007	LE GRAND MOULIN	Semnon	35	PAA
LB	2007	ROCHEREUIL	Semnon	35	PAA
LB	2007	BAS GERMIGNE	Semnon	35	PAA
LB	2011	SEUIL DE MALON	Vilaine	35	PAA
LB	2005	BARRAGE D'APREMONT	Vie	85	PAA
LB	2005	BARRAGE DE ROCHEREAU	Grand Lay	85	PAA
LB	2005	BARRAGE DE SORIN	Chatenay	85	PAA
LB	2005	BARRAGE DU JAUNAY	Jaunay	85	PAA
LB	2006	ECLUSE DU JAUNAY	Jaunay	85	PAA
LB	2007	BARRAGE D'ARZAL	Vilaine	35	PAA
LB	2005	VALLEES	Vie	85	PAA
LB	2009	BARRAGE DU RIBEROU	Seudre	17	PAA
RHM	2010	SEUIL DE NIEDERBRUCK	Doller	68	PAR
RHM	2009	BARRAGE DES MEIX FREITEUX	Ventron	88	PAR
RHM	2011	SEUIL DE MASEVAUX	Doller	68	PAR+PAA
RHM	2010	BARRAGE DE BEAUMENIL	Vologne	88	PAR+PB
AP	2012	BARRAGE DE LA TOUR DES CHAUSSEES	Canche	62	PAR+PAA
AP	2009	BARRAGE DE MONCHY-CAYEUX	Ternoise	62	PAR+PAA
AP	2009	BARRAGE DE HERNICOURT AVAL	Ternoise	62	PAR+PAA
AP	2010	BARRAGE D'AUCHY LES HESDIN	Ternoise	62	PAR+PAA
AP	2008	MOULIN SNICK	Basse Meldyck	62	PAR+PAA
LB	2011/2012	MOULIN DE PILAS (usine)	Vienne	16	PAR+PAA
SN	2002	SEUIL DES EGRIEUX	Odon	14	PAR+PAA
AG	2011	BARRAGE DE SOUSTONS	courant Soustons	40	PAR+PAA

ANNEXE 2 : OUTILS DE CALCUL.



OUTILS D'ESTIMATION DES COÛTS DES PASSES A POISSONS

Outils développées sur la base des données statistiques nationales de projets de passes à poissons réalisés de 2001 à 2014

Précautions d'utilisation : outils valables pour des estimations n'allant que jusqu'aux **stades avant-projet et esquisses**

Intégrer systématiquement **les fourchettes hautes et basses des estimations** au minimum entre 1er et 3ème quartile

COÛT PASSE - APPROCHE LARGE ECHELLE

en fonction de la hauteur de chute et du module de la rivière

I1= valeur de l'index (TP02) à la date de commencement des travaux
I0= valeur de l'index (TP02) à la date le 01/2014 à la date d'établissement des formules

I₁ (champs à remplir)

I₀

Lien internet pour accéder à la valeur actualisée du TP02

<http://www.bdm.insee.fr/bdm2/affichageSeries.action?idbank=001688278&codeGroupe=1530>

$$N = \frac{I_1 - I_0}{I_0}$$

0.00 = $\frac{0}{704.5}$

Page 1

H chute maximale (m) (champs à remplir)

Module Module du cours d'eau (m³/s) (champs à remplir)

Estimation coût d'une passe à poissons

C_{moy} coût moyen de l'ouvrage (€)
C_{min} coût min de l'ouvrage (€)
C_{max} coût max de l'ouvrage (€)

	Hchute <1,5m	1,5m < Hchute < 3m	Hchute > 3m
C _{moy}	0 €	0 €	0 €
C _{min}	0 €	0 €	0 €
C _{max}	0 €	0 €	0 €

COÛT PASSE A BASSINS

OUTIL 1 : en fonction de la chute et du débit dans la passe

I1= valeur de l'index (TP02) à la date de commencement des travaux
I0= valeur de l'index (TP02) à la date le 02/2001 à la date d'établissement des formules

I₁ (champs à remplir)

I₀

Lien internet pour accéder à la valeur actualisée du TP02

<http://www.bdm.insee.fr/bdm2/affichageSeries.action?idbank=001688278&codeGroupe=1530>

$$N = \frac{I_1 - I_0}{I_0}$$

0.00 = $\frac{0}{704.5}$

Récapitulatif de l'estimation des coûts

C_{med} coût médian de l'ouvrage (€)
C₂₅ coût 1er quartile de l'ouvrage (€)
C₇₅ coût troisième quartile de l'ouvrage (€)
C₁₀ coût 1er décile de l'ouvrage (€)
C₉₀ coût dernier décile quartile de l'ouvrage (€)

	Outil 1 (Hchute et QPAP)	Outil 2 Vol Génie civil
C _{med}	0 €	0 €
C ₂₅	0 €	0 €
C ₇₅	0 €	0 €
C ₁₀	0 €	0 €
C ₉₀	0 €	0 €

H	chute maximale (m)	<input type="text"/>	(champs à remplir)
QPAB	débit de la passe en étiage (m ³ /s)	<input type="text"/>	(champs à remplir)

Valeurs de Référence		
K_{med}	coût médian de l'ouvrage par mètre de chute et par m ³ /s dans la passe (€)	177 €
K₂₅	coût 1er quartile de l'ouvrage par mètre de chute et par m ³ /s dans la passe (€)	133 €
K₇₅	coût 3ème quartile de l'ouvrage par mètre de chute et par m ³ /s dans la passe (€)	262 €
K₁₀	coût 1er décile de l'ouvrage par mètre de chute et par m ³ /s dans la passe (€)	118 €
K₉₀	coût dernier décile de l'ouvrage par mètre de chute et par m ³ /s dans la passe (€)	395 €

Estimation coût d'une PAB

C_{med}	coût médian de l'ouvrage (€)	0 €
C₂₅	coût 1er quartile de l'ouvrage (€)	0 €
C₇₅	coût troisième quartile de l'ouvrage (€)	0 €
C₁₀	coût 1er décile de l'ouvrage (€)	0 €
C₉₀	coût dernier décile quartile de l'ouvrage (€)	0 €

OUTIL 2 : en fonction du volume de génie civil

VGCPAP (m³)	volume total du génie civil (comprenant volume de tous les bassins + le volume nécessaire à la prise, au transit et à la dissipation du débit complémentaire d'attrait + le volume prévu pour le piégeage et/ou la visualisation du poisson)	<input type="text"/>	(champs à remplir)
-------------------------------	--	----------------------	--------------------

Valeurs de Référence		
K_{med}	rapport coût/volume interne génie civil médians de l'ouvrage (€/m ³)	1 270 €
K₂₅	rapport coût/volume interne génie civil premier quartile de l'ouvrage (€/m ³)	910 €
K₇₅	rapport coût/volume interne génie civil dernier quartile de l'ouvrage (€/m ³)	1 825 €
K₁₀	rapport coût/volume interne génie civil min de l'ouvrage (€/m ³)	650 €
K₉₀	rapport coût/volume interne génie civil max de l'ouvrage (€/m ³)	2 220 €

Estimation coût d'une PAB

C_{med}	coût médian de l'ouvrage (€)	0 €
C₂₅	coût 1er quartile de l'ouvrage (€)	0 €
C₇₅	coût troisième quartile de l'ouvrage (€)	0 €
C₁₀	coût 1er décile de l'ouvrage (€)	0 €
C₉₀	coût dernier décile quartile de l'ouvrage (€)	0 €